

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
GAMTOS TYRIMŲ CENTRAS

AUDRIUS  
INDRIULIONIS

**Įvairiasluoksnių kvartero nuogulų šilumos perdavimo  
modelis ir šilumos parametrų vertinimas vertikaliais  
šilumos kolektoriais**

**DAKTARO DISERTACIJA**  
GAMTOS MOKSLAI, GEOLOGIJA (N 005)

---

VILNIUS 2019

Disertacija rengta 2013 - 2018 metais (Gamtos Tyrimų Centre, bendradarbiaujant su Vilniaus Universitetu, Chalmers ir Luleå technologijų universitetais (Švedija))

**Mokslinis vadovas:**

**prof. dr. Petras Šinkūnas** (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, geologija - N 005 )

**Mokslinis konsultantas:**

**prof. habil. dr. Robert Mokrik** (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, geologija - N 005)

# Padėka

Noriu padėkoti tiems žmonėms, kurie padėjo, palaikė ir įnešė savo indėlį į šį tiriamąjį darbą. Dauguma dalykų buvo man nepažįstami ir neatrasti. Doktorantūros studijų metu sutikti žmonės pateikė konstruktyvią kritiką ir rekomendacijas, neskaičiavo savo laiko, padėjo savo patirtimi buvo atviri ir į tyrimo tikslą orientuoti žmonės. Ačiū Dievui, kuris davė jėgų ir padrąšinimą įveikti ilgą išbandymų, džiaugsmo ir nusivilimų kupiną kelią bei galimybę sutikti daug nuoširdžių ir patikimų žmonių. Pirmiausia aš noriu padėkoti mano vadovams profesoriams Petru Šinkūnui ir Robert Mokrik, už jų vadovavimą, patirtį ir bendras pastangas doktorantūros studijų metu. Mano vadovas Petras Šinkūnas visada pagelbėdavo man įvairiose situacijose, dalinosi mokslinė patirtimi. Mokslinio darbo konsultantas profesorius Robert Mokrik buvo atidus detalėms ir reiklus man nukreipdavo visas žmogiškąsias pastangas esminių tyrimų linkme. Nepamatuojamą pagalbą ir indėlį į šį darbą įdėjo matematikos habilituotas daktaras profesorius emeritas Mifodijus Sapagovas ir docentas daktaras Pranas Vaitkus. Mifodijui liksiu skolingas dėl nesuskaičiuojamo laiko, diskutuojant matematinio uždavinio formulavimą, suvokti jo sprendimą, taikyti skaitinio modeliavimo metodus. Paprastumas, kuklumas ir pozityvus požiūris į gyvenimą yra išskirtinės Jūsų savybės. Pranas visada palaikė ir skatino ieškoti ir diegti tik pačius naujausius matematinius taikomuosius dalykus. Ačiū Pranai už kantrybę ir įkvėpimą sudėtingose matematinėse paieškose. Dėkoju geologui Žygimantui Palaičiui, kuris yra puikus sekliosios geotermijos pradininkas ir vystytojas Lietuvoje. Jis labai drąsus, įžvalgas ir veržlus inovacijose ir buvo mano bendrakeivis praktiniuose geologijos tyrimuose, padėjo suprasti praktinės geologijos sudėtingumus, susijusius su šilumos atsako testo duomenimis ir praktiniais eksperimentais Lietuvoje. Esu dėkingas profesoriui Bo Nordell iš Luleå Universiteto Švedijoje už suteiktą galimybę susipažinti su praktiniais in-situ šilumos temperatūros atsako bandymų rezultatais bei galimybę naudotis praktiniais duomenimis. Taip pat ne mažiau esu dėkingas dr. Javed Saqib iš Chalmers universiteto Švedijoje, kuris leido naudotis smėlio laboratorijos duomenimis (JAV) bei pateikė nemažai praktinių rekomendacijų. Dėkoju daktarui Mariui Gregorauskiui, kuris padėjo praktinėmis rekomendacijomis ir pastabomis tobulinant kvartero storymės šilumos perdavimo modelį, pateikiant realius hidrogeologinius parametrus iš tiriamosios vietovės. Matematikas daktaras Svajūnas Sajavičius mane sudomino ir palaikė sprendžiant diferencialines lygtis dalinėmis išvestinėmis, taikant pažangias radialines bazines funkcijas. Nuoširdžiai esu dėkingas Svajūnui už įvairiapusę profesionalią pagalbą, ir tikiuosi dar tęsime pradėtus mokslinius taikomuosius darbus ateityje. Noriu padėkoti savo mylimai šeimai: žmonai Linai, vaikams Rapolui, Barborai, Jurgiui ir Mortai, kurie visada mane palaiko ir besąlygiškai myli, nepaisant aplinkybių ir laiko. Jaučiuosi nepaprastai laimingas bei nuoširdžiai džiaugiuosi, galėdamas būti, dirbti ir gyventi kartu su Jumis.

# Turinys

Žymėjimai ir sutrumpinimai	6
Įvadas	9
<b>1 Šilumos perdavimo modeliai, <i>in-situ</i> eksperimentai ir programinė įranga</b>	<b>14</b>
1.1 Temperatūros atsako funkcijos	18
1.2 Šilumos perdavimo modeliai įtakoti požeminio vandens filtracijos	19
1.3 <i>In-situ</i> šilumos atsako testo eksperimentinė aparatūra	20
1.4 Uždarų patalpų <i>in-situ</i> šilumos atsako eksperimentiniai tyrimai	20
1.5 Uolienu šiluminių parametrų vertinimas naudojant TRT duomenis	21
1.6 Programinės įrangos priemonės	22
1.7 Diskusija	23
<b>2 Eksperimentiniai tyrimo objektai ir jų charakteristikos</b>	<b>24</b>
2.1 Laboratorinėmis sąlygomis temperatūrinio atsako tyrimas ir geologinė aplinka	30
2.2 Lietuvos šilumos atsako eksperimentinis prototipas	32
2.3 Diskusija	39
<b>3 Praktinė TRT duomenų analizė ir šilumos parametrų vertinimas evoliuciniais algoritmais</b>	<b>41</b>
3.1 Šilumos parametrų vertinimo metodika evoliuciniais algoritmais <i>in-situ</i> TRT duomenų pagrindu	42
3.1.1 Begalinio ilgio tiesinis šaltinio modelis (ILS)	42
3.1.2 Baigtinio ilgio tiesinio šaltinio modelis (FLS)	42
3.1.3 Begalinio ilgio cilindrinio šaltinio modelis (ICS)	43
3.2 Dalelių spiečiaus optimizavimo evoliucinis algoritmas	43
3.3 Rezultatai	46
3.4 Neapibrėžtumų analizė	50
3.5 Diskusija	52
<b>4 Įvairiasluoksnis kvartero nuogulų šilumos perdavimo modelis</b>	<b>55</b>
<b>Įvairiasluoksnis kvartero nuogulų šilumos perdavimo modelis</b>	<b>55</b>
4.1 Uolienu šilumos parametrų analizė ir vertinimas	56
4.2 Įvairiasluoksnis šilumos perdavimo modelis	58
4.3 Įvairiasluoksnio šilumos perdavimo modelio validavimo rezultatai	59
4.4 Hidrogeologinių ir šilumos laidumo parametrų jautrumo analizė	61
4.5 Diskusija	62
<b>5 Išvados</b>	<b>64</b>
<b>6 Praktinės rekomendacijos tobulinimui</b>	<b>65</b>

<b>A Šilumos atsako testų eksperimentiniai duomenys</b>	<b>66</b>
A.1 TRT įvairiasluoksniuje kvartero nuogulų stovymėje . . . . .	66
A.2 Uždarų patalpų smėlio dėžės temperatūros atsako testo eksperimentiniai duomenys	67
<b>B Santykiniai jautrumo koeficientai: Matlab programinis kodas</b>	<b>70</b>
<b>C Dalelių spiečiaus algoritmas šilumos parametrų paieškai: Matlab programinis kodas</b>	<b>72</b>
Literatūros sąrašas	77
Doktoranto publikacijų sąrašas	83

# Žymėjimai ir sutrumpinimai

## Žymėjimai

- $\alpha$  šilumos sklaida [ $\frac{m^2}{s}$ ]  
 $\gamma$  Euler konstanta [-]  
 $\theta$  aktyvusis poringumas [-]  
 $\lambda$  šilumos laidumas [ $\frac{W}{mK}$ ]  
 $\rho$  tankis [ $\frac{g}{m^3}$ ]  
 $\tau, t$  laikas [s]  
 $c$  specifinė šilumos talpa [ $\frac{J}{kgK}$ ]  
 $C$  tūrinė šilumos talpa [ $\frac{J}{m^3K}$ ]  
 $h$  hidraulinis spūdis [m]  
 $h$  konvekcinis šilumos perdavimo koeficientas [ $\frac{W}{m^2K}$ ]  
 $H$  vertikalaus šilumos kolektoriaus ilgis [m]  
 $i$  hidraulinis gradientas [ $\frac{m}{m}$ ]  
 $I_0$  modifikuota pirmos rūšies ir 0 eilės Baselio  
 $k$  filtracijos koeficientas [ $\frac{m}{s}$ ]  
 $K_0$  modifikuota antros rūšies ir 0 eilės Baselio modified  
 $Q$  įpumpuotos/išgautos šilumos kiekis [W]  
 $q$  šilumos perdavimo norma [ $\frac{W}{m}$ ]  
 $\dot{q}$  šilumos srauto norma [ $\frac{W}{m^2}$ ]  
 $r$  atstumas nuo vertikalaus gręžinio centro [m]  
 $R$  šilumos varža [ $\frac{Km}{W}$ ]  
 $T$  temperatūra [°C] or [K]  
 $T_0$  nepaliesta uolienų temperatūra [°C]  
 $L_s$  atstumo pusė tarp U - formos vamzdelių centrų  
 $u$  požeminio vandens filtracijos greitis [ $\frac{m}{s}$ ]  
 $x, y, z$  Dekarto koordinatės

## Indeksai

- $b$  savybės 'ant' vertikalaus gręžinio sienelės
- $g$  užpildo medžiagos savybės
- $f$  skysčio savybės

- – vidinė srities dalis
- + išorinė srities dalis
- $sg$  uolienu prisotintų vandeniui savybės
- $s$  uolienu savybės
- $w$  vandens savybės

# Sutrumpinimai

*1D* - vienos dimensijos

*2D* - dviejų dimensijų

*3D* - trijų dimensijų

*ASHRAE* - Šildymo, vėdinimo ir kondicionavimo Amerikos asociacija

*EED* - Earth Energy Designer programa

*EnergyPlus* - Building Energy Simulation programa

*eQUEST/DOE – 2.2* - VSK projektavimo ir modeliavimo programa

*FLS* - baigtinio ilgio tiesinio šaltinio metodas

*FDM* - baigtinių skirtumų metodas

*FVM* - baigtinių tūrių metodas

*FEM* - baigtinių elementų metodas

*GSHP* - šilumos siurblys 'žemė- vanduo'

*GLHEPRO* - VSK projektavimo ir modeliavimo programa

*GeoStar* - VSK projektavimo ir modeliavimo programa

*GchpCalc* - VSK projektavimo ir modeliavimo programa

*ICS* - begalinio ilgio cilindrinio šilumos šaltinio metodas

*ILS* - begalinio ilgio tiesinio šilumos šaltinio metodas

*PSO* - dalelių spiečiaus optimizavimo algoritmas

*MKM* - mažiausių kvadratų metodas

*MILS* - judančio begalinio ilgio tiesinio šaltinio metodas

*MFLS* - judančio baigtinio ilgio tiesinio šaltinio metodas

*TRT* - šilumos atsako testas

*TRNSYS* - VSK modeliavimo programa

*VSK* - vertikalus šilumos kolektorius



# Įvadas

Sekliają geoterminę energiją galima naudoti pastatų šildymui ir vėdinimui, įrengiant vertikalius šilumos kolektorius kartu su geoterminiais šilumos siurbliais gruntas - vanduo. Tokiu būdu yra išgaunama ir tiekiamas atsinaujinanti šilumos energija iš požeminių vandeningų sluoksnių (pvz: Lietuvos kvartero tarpmoreninių nuogulų) į administracinius pastatus, gamyklas ar gyvenamuosius namus turint tikslą šildyti arba vėdinti patalpas, gaminti karštą vandenį buityje. Praktikoje galima taikyti kelias skirtingas technologijas, kuriomis į pastatus tiekiamas šiluma ar karštas vanduo:

- atviro tipo sistemos, kai naudojamas požeminis gruntinis vanduo;
- uždaro tipo sistemos, kai naudojami keli skirtingi šilumos kolektorai: vertikalūs, horizontalūs ir kitų (pvz: spiralės) konfigūracijų tipo.

Didžiausias iššūkis sekliosios geotermijos inžinieriams ir projektuotojams ne tik mokėti interpretuoti geologinius ir hidrogeologinius objekto aplinkos parametrus, bet ir balansuoti pastato energijos poreikius kartu su sekliosios geoterminės energijos ištekiais. Profesionaliai įrengta bei efektyviai veikianti geoterminių šilumos siurblių sistema apima ne tik pastato metinius šilumos ir vėsos energijos poreikius, taip pat ir oro aplinkos temperatūros pokyčius, požeminių geologinių sluoksnių fizikines, hidrodinamines ir šilumos savybes ir t.t. Įprastai šilumos perdavimas iš vertikalios šilumos kolektoriaus į uolienų sluoksnius vyksta trimis būsenomis: tranzityvia, kvazistacionaria ir stacionaria. Visų šilumos perdavimo būsenų eksperimentiniai duomenys paprastai naudojami uolienų šilumos parametrų vertinimui ir analizei. Vertikalius šilumos kolektorius yra instaliuotas U-formos vamzdelis užpildytas cirkuliuojančiu žinomų fizikinių ir šilumos savybių skysčiu (pvz: vandeniu arba vandens ir 37% santykio antifrizu).

Šilumos perdavimas vadinamas tranzityviu, kai šilumos perdavimas vyksta tik U-formos vamzdelio skystyje, o šis procesas užtruks nuo pusės minutės iki kelių dešimčių minučių. Po to prasideda kvazistacionarus procesas, kuriame šilumos perdavimas vyksta tarp U-formos vamzdelio sienelės paviršiaus ir užpildo medžiagos, esančios vertikaliame gręžinyje. Paskutinėje, stacionarioje būsenoje U-formos vamzdelyje cirkuliuojančio įeinančio ir grįžtančio skysčio temperatūrų pokytis per fiksuotą laiko vienetą yra beveik pastovus dydis. Paprastai vienas iš vertinamų parametrų yra cirkuliuojančio skysčio temperatūra, kuri gali būti gaunama analitiniais, skaitiniais ar mišriais modeliavimo metodais. Iš praktinių rezultatų yra žinoma, kad skaitiniai modeliavimo metodai yra tikslesni bei reikalauja papildomų kompiuterinių resursų ir skaičiavimo laiko, kai norime modeliuoti dešimtis ar šimtus vienetų vertikalų šilumos kolektorių. Dėl šios priežasties visada tyrėjams naudingas praktinis analitinių sprendinių poreikis. Šiame darbe taikomas

efektyvus evoliucinis algoritmas uolienų šilumos laidumo parametrų vertinimui, atlikta metodo veikimo analizė neapibrėžtims, gauti rezultatai palyginti su kitų mokslininkų rezultatais. Sukurtas ir pritaikytas įvairiasluoksnis kvartero nuogulų sąlygomis šilumos perdavimo modelis, nustatyti šilumos parametrai skirtingais metodais, atlikta šilumos ir hidrogeologinių parametrų įtakos analizė cirkuliuojančiai skysto temperatūrai.

## Problemos formulavimas

Skandinavijos šalyse ir JAV dedamos didelės mokslininkų, verslo bei technologinių įmonių pastangos, vykdamas geologinius šilumos atsako bandymus (TRT) (angl. Thermal Response Test), siekiant kuo tiksliau nustatyti uolienų sluoksnių hidrodinaminius ir šilumos parametrus, gauti naujus bei efektyvius šilumos perdavimo skaitinius ir analitinius modelius. Taip pat visada siekiama kokybiškai įvertinti sekliosios geotermijos šilumos potencialą bei sudaryti sekliosios geotermijos potencialo žemėlapius. Ypač svarbios žinios ir patirtis, modeliuojant šilumos perdavimą skirtingomis geologinėmis sąlygomis, vertinant hidrodinaminių parametrų poveikio efektą, esant įvairiasluoksnei nuogulų storumės sandarai Lietuvos sąlygomis. Pastaruoju metu Lietuvoje neatliekami panašūs moksliniai tyrimai ar bendradarbiaujama su verslo įmonėmis, kurios įprastai pasitelkia ekspertus iš užsienio. Dėl šių priežasčių mokslo tyrėjams nepateikiami geologinių darbų metu gauti TRT duomenys ir praktinė patirtis. Gauti rezultatai padėtų vystyti sekliosios geotermijos patirtį Lietuvoje. Lietuvos Respublikos Aplinkos ministerijoje nėra perengtų tinkamų įstatyminių aktų ir teisinių potvarkių, siekiant efektyviai valdyti sekliosios geotermijos potencialą Lietuvoje. Nekaupiami išžvalgytų vietovių duomenys Lietuvos geologijos tarnyboje, nėra paruoštų specialistų, kurie turėtų pakankamą teorinę ir praktinę kompetenciją bei galėtų naudotis skaitmenine informacija tinkamai tiek regioniniu, tiek ir savivaldybių bei verslo ekonominių poreikių mastu.

## Darbo aktualumas

Didėjantis mažaenergių arba 'žaliųjų' pastatų poreikis, pasikeitusios Lietuvos statybos reglamento sąlygos bei įsipareigojimai Europos Sąjungai skatina didinti atsinaujinačios energijos panaudojimą (30% iki 2030 metų Europos aplinkos apsaugos agentūros (2017)[2], dabar apie 17% ), tuo būdu mažinti  $CO_2$  emisiją. Šie reikalavimai kelia iššūkius valstybei reguliuojant teisės aktus, o verslo įmonėms pritaikant technologijas suderinamas su 'žaliosiomis' aplinkosaugos socialinėmis vertybėmis. Seklioji geotermija yra viena iš atsinaujinančios energetikos sričių, kurios potencialas Lietuvoje yra nežinomas, o tik naudojamas pavienių verslo įmonių ir namų ūkių. Šiuo metu Lietuvoje nėra praktinių tyrėjų, mokslinių publikacijų ir išsamesnių tyrimų, susijusių su sekliąja geotermija, pasitelkiant įvairiasluoksnę geologinę ir hidrogeologinę sandarą, geoinžinerinius uolienų parametrus bei matematinio modeliavimo priemones.

## Tyrimų objektų charakteristika

Tyrimų objektai buvo pasirinkti su skirtingomis geologinėmis, hidrogeologinėmis ir TRT matavimo tikslumo sąlygomis, siekiama gauti specifinių žinių, esant skirtingoms šių tyrimo objektų paskirtims. Aukštos kokybės TRT duomenų, kurie leidžia patikrinti naujai sukurtų modelių tikslumą ir įvertinti uolienų šilumos laidumo parametrus. Iš eksperimentinės smėlio laboratorijos buvo gauti iš Chalmers technologijos universiteto mokslininko dr. Javed Saqib. Lietuvos kvartero storymės sandaros skaičiavimams buvo pasirinktas objektas su detaliomis stratigrafinėmis ir hidrogeologinėmis charakteristikomis. TRT testui buvo panaudoti Vokietijos kompanijos pateikti duomenys, gauti bendradarbiaujant su UAB 'Stiebel Eltron' reziduojančia Lietuvoje. Visorių apylinkės hidrogeologinių parametrų duomenims tikslinti pasinaudota dr. Mariaus Gregorausko praktinėmis rekomendacijomis ir publikacijomis [10], [9]. Papildomai informacijai gauti buvo pasinaudota UAB 'HidroGeoConsulting' ataskaitomis iš Lietuvos geologijos tarnybos fondo. Įgyta šilumos perdavimo modeliavimo patirtis vertikaliais šilumos kolektoriais, 2015 metais balandžio mėnesį lankytis pas prof. Bo Nordell Švedijos Lulea technologijų universitete. Universiteto teritorijoje įrengta TRT bandymų laboratorija, kurioje 1995 metais atliktas vienas iš pirmųjų TRT bandymų Europoje. To rezultatas - profesoriaus Bo Nordell ir jo doktorantės Sighild Gehlin 1996 metais sukurta pirmoji TRT eksperimentinė aparatūra.

## Praktinė darbo reikšmė

Sekliosios geotermijos potencialo skaičiavimai, esant skirtingoms Lietuvos kvartero geologinėms sąlygoms yra viškai netyrinėti. Derinant matematinio modeliavimo ir skaičiavimo metodikas skirtingų geologinių sąlygų TRT duomenis buvo siekiama įgyti praktinės uolienų šilumos perdavimo parametrų nustatymo ir šilumos perdavimo modelio taikymo patirties ir žinių perteikti praktines rekomendacijas geologams inžinieriams, projektuojantiems vertikalius šilumos kolektorius. Praktinėse išvadose siekiama pateikti TRT trukmės ir skaičiavimo pradžios prielaidas, taikant efektyvų evoliucinį algoritmą uolienų šiluminių parametrų vertinimui. Pritaikytas efektyvus šilumos parametrų vertinimo metodas bei šilumos perdavimo modelio praktinio taikymo įvairiasluoksnyje geologinėje aplinkoje. Taip pat pritaikyti metodai bei pateikta parametrų jautrumo analizė kartu su praktinėmis programinėmis priemonėmis gali būti panaudojamos kaip efektyvi mokomoji priemonė Lietuvos geologijos tarnyboje ir Vilniaus universiteto geologijos mokslų studentų praktiniuose užsiėmimuose. Disertacijoje gauti duomenys gali būti efektyviai panaudoti Lietuvos geologijos tarnyboje, vystant sekliosios geotermijos vertinimo metodiką, praktinį taikymą bei tyrimų duomenų pagrindu sudaryti Lietuvos sekliosios geotermijos žemėlapi.

## Darbo struktūra

Disertacijos darbą sudaro įvadas, 4 skyriai, išvados, naudotos literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų sąrašas. Disertacijos apimtis: 88 puslapiai teksto su priedais, 25 paveikslėliai ir 15 lentelių.

## Tyrimų tikslas

Naudojant TRT tyrimo objektų informaciją, efektyviai vertinti uolienų šilumos parametrus evoliucinio algoritmo pagalba, modeliuojant šilumos perdavimą analitiniais metodais, pritaikyti skaitinį šilumos perdavimo metodą įvairiasluoksnei Lietuvos kvartero nuogulų storumei, įtraukiant į skaičiavimus tyrimo vietovę atitinkančias geologines, hidrogeologines sąlygas ir parametrus, vertikaliais šilumos kolektoriais.

## Darbo uždaviniai

Tiriamajame darbe buvo numatyti šie uždaviniai:

1. pristatyti ir iširti esamus šilumos perdavimo modelius vertikaliais šilumos kolektoriais;
2. aprašyti tyrimo objektus;
3. pasiūlyti ir pritaikyti efektyvius uolienų šilumos laidumo parametrų vertinimo metodus;
4. skirtingomis geologinėmis ir hidrogeologinėmis sąlygomis imituoti šilumos perdavimo procesą, atlikti neapibrėžtumų analizę;
5. pateikti praktines rekomendacijas ir išvadas uolienų šilumos parametrų vertinimo ir šilumos perdavimo modeliavime kvartero nuogulų sąlygomis;

## Ginami teiginiai

1. Atsitiktinių dalelių spiečiaus optimizavimo algoritmas patikimiau nustato uolienų šilumos laidumo parametrus, nes vidutinės santykinės paklaidų reikšmės yra mažesnės nei genetiniu algoritmu ar tradiciniu metodu.
2. Trumpo laikotarpio (iki 500h) temperatūrinis šilumos atsakas keičiant šilumos laidumo reikšmes nekeičia temperatūros kitimo struktūros, o temperatūrinių pokyčių trendas nežymiai skiriasi lyginant su požeminio vandens filtracija.

## Duomenų šaltiniai

Tyrimui pasitelkta Mokslininkų gatvėje Vilniuje, UAB 'BOD Groups' įrengtų 117 vertikalių šilumos kolektorių kartu su geoterminių šilumos siurblių sistema 2012 - 2014 metais. Geologinė ir hidrogeologinė informacija buvo surinkta iš Lietuvos geologijos tarnybos fonde saugomų ataskaitų [85], [48], įmonės 'Vilniaus Hidrogeologija' įvertintais hidrodinaminiais vietovės parametrais [9, 10]. UAB 'Stiebel Eltron' kompanijos pateiktais TRT eksperimento duomenimis, gautais iš konsultacinės 'HidroGeoConsulting Ltd' registruotos Vokietijoje. Taip pat UAB 'HidroGeoConsulting' kompanijos ataskaitomis, pateiktomis Lietuvos geologijos tarnybai. Dr. Saqib Javed

iš Chalmers technologijų universiteto, Švedijoje pateikė laboratorinius eksperimentinius TRT duomenis. Šie duomenys buvo naudojami skirtingose publikacijose nuo 2002 metų. Švedijos Lulea technologijų universiteto profesorius geologijos mokslų daktaras Bo Nordell leido mokslinių tyrimo tikslams naudotis Lulea technologijų universiteto ir kitų Švedijos vietovėse vykdytų 1997 - 2008 metų laikotarpyje TRT tyrimų duomenimis.

## **Darbo mokslinis naujumas**

Remiantis turimais duomenų šaltiniais, tyrimų objektais, praktikoje pritaikytas dalelių spiečiaus optimizavimo evoliucinis algoritmas uolienu šilumos parametrus vertinti kartu su parametru netiesiškumo ir jautrumo, bei TRT trukmės bei pradžios momentų analize, pateikti vertinimo atvejai kai tyrimo duomenys turi fiksuotas neapibrėžtis. Praktiškai pritaikytas įvairiasluoksnis kvartero nuogulų šilumos perdavimo modelis, naudojant skirtingus hidrodinaminius parametrus bei požeminio vandens filtracijos įtaką.

## **Darbo mokslinė aprobacija**

Mokslinių tyrimų rezultatai disertacijos tema pristatyti trijose tarptautinėse ir keturiose vietinėse mokslinėse geologų ir matematikų konferencijose, o 3 publikacijos paskelbtos recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose, 2 iš jų ISI Web of Science moksliniuose žurnaluose.

Disertacijos struktūra pagal studijų tikslus yra pateikta penkiuose skyriuose. Šis skyrius apima problemos formulavimą ir aktualumą, tyrimų tikslus, uždavinius, mokslinio darbo naujumą. Disertaciją sudaro šie skyriai:

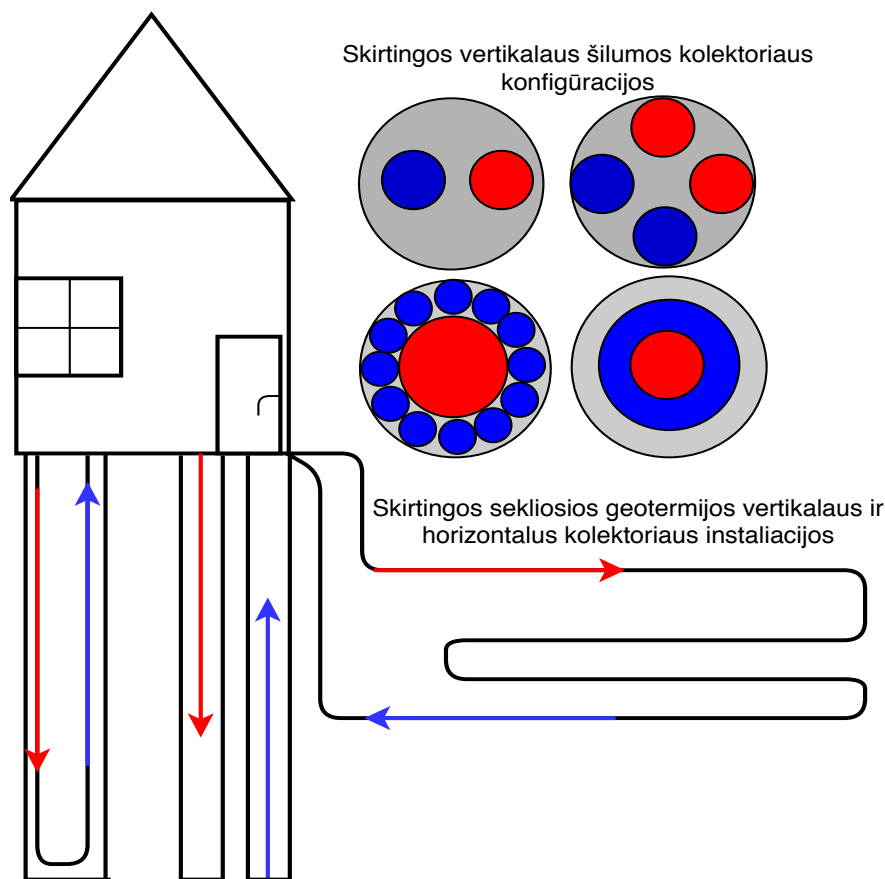
1. Įvade pateikta įžanginė dalis kartu jau aukščiau minėtais aspektais.
2. 1 skyrių sudaro šilumos perdavimo modelių, eksperimentinių tyrimų ir naudojamos programinės įrangos analizė.
3. 2 skyriuje pateikiami tyrimo objektai, jų charakteristikos, hidrogeologiniu bei techniniu aspektu.
4. 3 skyrius apima šilumos perdavimo modelių teorinę, algoritmų realizavimo dalį bei atsitiktinių dalelių optimizavimo evoliucinio algoritma, rezultatus ir jautrumą neapibrėžtumams.
5. 4 skyriuje pateikiami įvairiasluoksnio šilumos perdavimo modelio metodika, uolienu šilumos parametrų rezultatai, hidrodinaminių parametrų jautrumo analizė cirkuliuojančio skysčio temperatūrai.
6. Išvadose ir praktinėse rekomendacijose pateikiami gautų rezultatų pagrindu suformuluoti išvadiniai teiginiai.

## skyrius 1

# Šilumos perdavimo modeliai, *in-situ* eksperimentai ir programinė įranga

Geologai inžinieriai projektuoja ir įrenginėja vertikalų šilumos kolektorių sistemas turėdami tikslą optimizuoti jų veikimą, vertindami U-formos vamzdelyje cirkuliuojančio skysčio vidutinę temperatūrą. U-formos uždaro tipo vamzdelis, užpildytas skysčiu, yra įmontuotas vertikaliame gręžinyje užpildytas biriomis uolienomis, vadinamas vertikaliu šilumos kolektoriumi (VSK). Optimalus VSK sistemų projektavimas yra ypatingai svarbus tiek trumpu, tiek ir ilgu eksploatavimo laikotarpiu turi būti paremtas ne tik ekstremaliomis šilumos ar šalčio poreikių reikšmėmis, o ir kokybišku dinaminiu šilumos perdavimo modeliu. Šilumos perdavimas turi būti modeliuojamas, įtraukiant VSK, gręžinio užpildo uolienų ir uolienų, esančių už vertikalaus gręžinio sienelės šilumos laidumo ir savitosios talpos reikšmes. Nuosėdinių uolienų storymė už vertikalaus gręžinio sienelės yra šilumos saugykla ir kartu šilumos šaltinis - viso šilumos mainų (perdavimo ar išgavimo) proceso metu. Praktijoje, kai įrengiamas VSK, yra žinomi šie parametrai, t.y. U-formos vamzdelio skersmuo, sienelės storis, medžiagos (politeleno), skysčio ir užpildo, uolienų šilumos laidumo (angl. thermal conductivity) ir šilumos sklaidos (angl. thermal diffusivity) vertės. Aukštos kokybės U-formos vamzdelių gyvavimo trukmė yra iki 50 metų. Cirkuliuojantis skystis U-formos vamzdelyje yra antifrizo ir vandens mišinys, etilengliukolis, labai retais atvejais būna vanduo. Dažniausiai vanduo naudojamas šilumos atsako testo (TRT) (angl. thermal response test) atveju, tačiau jo naudojimo vengiama dėl užšalimo, esant atšiauroms klimato sąlygoms vertikalaus gręžinio eksploatacijos metu. Taip pat geologai inžinieriai parenka efektyvią cirkuliuojančio skysčio klampą (paprastai nustatomas efektyvus 37% antifrizo santykis vandenyje) norėdami gerinti šilumos perdavimą cirkuliuojančiame skystyje į U-formos vamzdelio sieneles. Viena kryptimi cirkuliuojančio skysčio U-formos vamzdelyje temperatūra keičiasi nuo fiksuotu galingumu veikiančių elektrinių tenų ir pastovaus skysčio srauto greičio. Vertikalaus gręžinio tarpai tarp U-formos vamzdelio ir gręžinio sienelės užpildomi biriomis medžiagomis su išmatuota šilumos laidumo verte. Panašiai Lietuvoje ir Skandinavijos šalyse vertikalaus gręžinio skersmuo kinta nuo 90 mm iki 190 mm, o jo ilgis kinta nuo 40 iki 250 metrų. Visas šilumos atsako eksperimentas vyksta nuo 40 iki 120 valandų, kartais iki kelių parų, fiksuojant cirkuliuojančio skysčio, lauko temperatūras, elektrinių tenų galią, elektros srovę ir skysčio srauto greitį. Labiausiai paplitę vertikalų šilumos kolektorių tipai ir jų instaliacijos pavaizduotos 1.1

paveikslėlyje. Analitiniais ir skaitiniais metodais visada tyrejai vertina vidutinę skysčio tem-



1.1 Paveikslas Vertikalių šilumos kolektorių konfigūracijos.

peratūrą U-formos vamzdelyje. Skaitiniai metodai yra žymiai tikslesni, tačiau reikalaujantys didesnių kompiuterinių resursų ir skaičiavimo laiko, kai turime daugiau nei kelis vertikalius šilumos kolektorius ar sudėtingą hidrodinaminę ir geologinę aplinką. Daugeliu atvejų analitiniai metodai atrodo patrauklūs skaičiavimo greičio prasme, bet nėra patikimų rezultatų analizuojant didesnes VSK sistemas. Šiaurės Europos šalyse, Norvegijoje, Švedijoje ar Suomijoje vyrauja kristalinės uolienos, o nuosėdinių uolienų yra tik keli ar keliolika metrų žemės paviršiuje. Įprastai vertikalaus gręžinio užpildas yra gruntinis vanduo, kuris yra puikus šilumos 'pernešėjas' į cirkuliuojantį skystį. Skandinavijoje įrenginėjant VSK paprastai nukasami viršutiniai nuosėdinių uolienų sluoksniai nuo 4 iki 10 metrų, vengiant įsiskverbti į gruntinį vandenį, U-formos vamzdelį izoliuojant nuo išorinių temperatūros pokyčių įtakos iš žemės paviršiaus. Vertikalūs šilumos kolektorai yra veikiami dviejų procesų: kondukcijos ir advekcijos dėl horizontalios ar vertikalios požeminio vandens filtracijos, esant plyšiuotoms ir poringoms uolienoms.

Šilumos perdavimas uolienose yra skirstomas į tris būsenas: tranzityvus, kvazistacionarus, pastovus (stacionarus), o laiko intervalai yra naudojami TRT duomenų analizei ir uolienų šilumos parametrų nustatymui. Šilumos perdavimas vadinamas tranzityviu, kai skystis šildomas elektriniu tenu U-formos vamzdelyje 'keliauja' nuo pusės minutės iki kelių dešimčių minučių. Kvazistacionarus procesas prasideda kai šilumos perdavimas vyksta tarp U-formos plastikinio vamzdelio išorinės sienelės su vertikalaus gręžinio užpildu. Tada prasideda stacionari būse-

na, kurios metu šilumos perdavimas vyksta tarp vertikalaus gręžinio sienelės kai temperatūra perduodama nuosėdinėms uolienoms, esančioms už vertikalaus gręžinio sienelės. Paskutinėje stacionarioje būsenoje tarp įeinančio ir grįžtančio skysčio temperatūros skirtumas yra beveik pastovus nekintantis laike dydis. Tuose VSK, kur naudojamas užpildas, šilumos perdavimo procesas susideda iš trijų fizikinių šilumos perdavimo procesų. Pirmas, kai konvencinis šilumos perdavimas vyksta skystyje, perduodant šilumą į U-formos plastikinio vamzdelio sienelę. Antras - kondukcinis šilumos perdavimas vyksta per U-formos polietileno medžiagos sienelę bei vertikalaus gręžinio užpildą. Trečias - kondukcinis šilumos perdavimas vyksta tarp vertikalaus gręžinio sienelės ir uolienų už VSK ribų. Papildomai reikia paminėti, kad advekcija vyksta tuomet, jei vertikalaus gręžinio užpildas yra gruntinis vanduo.

Nuosėdinės uolienos užtikrina pastovią temperatūrą, kurią galima žymiai efektyviau išnaudoti kaip šilumos talpyklą, nei oro lauko temperatūra. Pastaraisiais dešimtmečiais yra pastebimi žymūs oro temperatūros svyravimai, vyksta staigūs atšalimai ar atšilimai tiek trumpuoju, tiek ir ilguoju periodu. Išoriniai temperatūriniai kitimai stipriai veikia šilumos ar šalčio energijos suvartojimo poreikius, taip įtakojamas geoterminių šilumos siurblių veikimo efektyvumas. VSK supančios nuosėdinės uolienos yra skirtingos hidrodinamine, geomorfologine bei geofizikine prasme visame vertikalaus gręžinio gylyje. Toks eksperimentinis tyrimas buvo atliktas 2012 metais bei detaliai išnagrinėtas Lietuvos kvartero nuogulų stovymės sąlygomis (Žr. 2 skyriuje). Paprastai šilumos perdavimo modeliavimas yra realizuotas gerai išvystytose VSK projektavimo taikomuosiose programose, turinčiomse skirtingas paskirtis:

- TRT duomenų analizė;
- VSK projektavimui, kai nustatomi atstumai tarp VSK, jų skaičius, geometriniš išdėstymas, ilgis ir t.t.;
- Taikomų programų sąsajos su pastatų energetinėmis simuliacijomis, siekiant imituoti 'žemė - vanduo' geoterminių šilumos siurblių veikimą.

Vertikalus uolienų geoterminis gradientas kinta priklausomai nuo vertikalaus gręžinio gylio. Žemės paviršiaus temperatūros pokyčiai ir saulės spinduliavimo intensyvumas ištisus metus veikia uolienų temperatūrą iki 10 – 15 metrų po žeme. Mokslininkai Kusuda ir Achenbach (1965) [54] pateikė vidutinę uolienų temperatūros sinuso funkciją, kuri vertina vertikalaus gręžinio gylį ir skirtingais laiko momentais. Geoterminis gradientas užtikrina tikslesnį temperatūrinį pasiskirstymą, kurio reikšmės gali kisti intervalu  $0.001 - 0.03^{\circ}C/m$  priklausomai nuo vietovės, vandens filtracijos ir uolienų litologijos. Paprastai VSK šilumos perdavimo modeliai skirstomi į tris skirtingas kategorijas: analitinius, temperatūrinių atsako 'g-funkcijų' ir diskretizuotus skaitinius modelius. Kiekvieną šilumos perdavimo modelių kategoriją apžvelgsime atskirai, bus paminėti modelių privalumai ir apribojimai. Pagal Kelvino (1890) [51] teoriją uolienų temperatūra yra nustatoma remiantis prielaidomis, kad vertikalus gręžinys yra begalinio ilgio šilumos šaltinis, o šilumos perdavimo norma yra laikoma pastovia. Ši teorija neįtraukia geometrinių ir termofizikinių gręžinio užpildo, U-formos vamzdelio ir skysčio parametrų. Carslaw ir Jager (1947) [14] pasiūlė panašų sprendinį, kuriame U-formos vamzdelio geometrija aproksimuojama vienu ištisu vamzdeliu, taip pakeičiant U-formos vamzdelio geometriją. Turime žinoti pradinę 'nepaveiktą' (angl. undisturbed) uolienų temperatūrą ir šilumos perdavimo normą vienam vertikalaus gręži-



nio metru. Tada uolienu temperatūra kinta atstumu  $r$  nuo vertikalaus gręžinio sienelės pagal 1.1 formulę, pateiktą Ingersol (1954) [45]:

$$T_b(t) - T_0 = \frac{q}{2\pi\lambda_s} \int_{\frac{r_b^2}{4\alpha_s t}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{q}{2\pi\lambda_s} I(x), \quad (1.1)$$

kur žymėsime  $T_b$  - uolienu temperatūrą atstumu  $r = r_b$ ,  $T_0$  - nepaveikta uolienu temperatūra,  $q$  - šilumos perdavimo norma vertikalaus gręžinio metru,  $r$  - spindulys nuo tiesinio šilumos šaltinio,  $\lambda_s$  - uolienu šilumos laidumas,  $\alpha_s$  - uolienu šilumos sklaida,  $t$  laikas, o  $x$  integralo kintamasis. Kai  $x < 2$ , tada  $I(x)$  pagal [45] yra lygus tokiam skleidiniui:

$$I(x) = 2.303 \log_{10}\left(\frac{1}{x} + \frac{x^2}{2} - \frac{x^4}{8}\right) - 0.2886. \quad (1.2)$$

Carslaw [14] naudoja eksponentinio integralo išraišką turėdamas tikslą aproksimuoti tiesinio šilumos šaltinio sprendinį, kuris paprastai naudojamas praktikoje, nustatant efektyvias uolienu šilumos laidumo ir gręžinio šilumos varžos parametrų vertes. Aproksimuota išraiška užrašoma tokia forma:

$$T_b(t) - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \int_{\frac{r_b^2}{4\alpha_s t}}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \ln\left(\frac{4\alpha_s t}{r_b^2}\right) + \gamma, \quad (1.3)$$

kur  $\gamma$  yra Eulerio konstanta, kuri lygi 0.5772. Paklaida mažesnė nei 2, 5%, kai nelygybė  $t_s \geq \frac{20r_b^2}{\alpha_s}$ , o kai tenkinama tokia sąlyga  $t_s \geq \frac{5r_b^2}{\alpha_s}$  paklaida yra artima 10%. Tada vidutinė vertikalaus gręžinio sienelės temperatūra laiko momentu  $t$  bus lygi:

$$T_b(t) = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \left( \ln\left(\frac{r_b^2}{4\alpha_s t}\right) - \gamma \right) + T_0, \quad (1.4)$$

paprastai  $t_s$  reikšmė svyruoja nuo 3 iki 10 valandų praktiniuose TRT bandymuose. Tarsime, kad šilumos perdavimas VSK yra pastovios būsenos bei sąryšis tarp vidutinės skysčio ir vertikalaus gręžinio sienelės temperatūros apibrėžiamas panaudojus efektyvią gręžinio šilumos varžą:

$$T_f(t) = T_b(t) + qR_b = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \ln t + q \left( R_b + \frac{1}{4\pi\lambda} \left[ \ln\left(\frac{4\alpha_s}{r_b^2}\right) - \gamma \right] \right) + T_0, \quad (1.5)$$

kur  $T_f(t)$  yra vidutinė skysčio temperatūra,  $T_b(t)$  vidutinė VSK sienelės temperatūra,  $R_b$  efektyvioji gręžinio šilumos varža.

Iš 1.5 formulės matyti, kad veikiant pastoviai šilumos perdavimo normai vidutinė skysčio temperatūra kinta pagal natūralaus logaritmo dėsnį. Tada turėtume lygtį  $T_f = m \ln t + n$ , kur daugiklis  $m = \frac{q}{4\pi\lambda_s}$  yra tiesinės lygties nuolydis (angl. slope), gaunamas tiesinis trendas  $n$ . Įvertinus efektyvią  $\lambda_s$  reikšmę, tada išsireiškia  $R_b$  iš 1.5 lygties. Metodo prielaidos, kurio- mis remiantis skysčio, vamzdelio, užpildo šilumos laidumo parametrai bei VSK apatinė dalies temperatūros efektas paprastai neįtraukiami į  $\lambda_s$  ir  $R_b$  nustatymą. Dėl šios priežasties šis metodas nėra tinkamas modeliuoti trumpas šilumos perdavimo simuliacijas vertikaliame šilumos kolektoriuje. Nepaisant minėtų apribojimų, šis metodas dėl paprasto pritaikomumo yra plačiai taikomas TRT analizėje, nustatinėjant efektyvius uolienu šilumos laidumo ir vertikalaus gręžinio šilumos varžos reikšmes. Kavanaugh pateikė [50] aproksimaciją, kurią plačiai taiko geologai

praktikai. Vėliau šis rezultatas buvo ištestuotas, naudojant praktinius TRT testo duomenis įvairiais scenarijais [49] bei pritaikytas begalinio ilgio cilindrinio šilumos šaltinio modelis praktiškam veikimui. U-formos vamzdelių tarpusavio sujungimo efektas buvo tyrinėtas Kavanaugh (1985) [50] ir Yavuzturk (1999) [87] disertacijoje.

## 1.1 Temperatūros atsako funkcijos

Temperatūros atsako funkcijų analizinės išraiškos buvo gautos, sprendžiant fizikinį šilumos perdavimo uždavinį dvimačiu baigtinių skirtumų metodu (angl. finite difference method), siekiant nustatyti uolienu temperatūros atsaką, kiekvienai VSK konfigūracijai su pastovia šilumos perdavimo norma. Tokie normalizuoti temperatūros atsako sprendiniai vadinami 'g-funkcijomis'. Eskilson (1987) [27] yra suskaičiavęs virš 200 parametrizuotų 'g-funkcijų' realizacijų skirtingoms VSK masyvų konfigūracijoms, išdėstant VSK masyvus: vienoje tiesėje, taisyklingame kvadrato ar stačiakampio formos, esant skirtingiems atstumams tarp vertikalių šilumos kolektorių. G-funkcijos matematinė išraiška priklauso nuo pastovios  $q$  šilumos perdavimo normos su pastovia 'nepaliesia'  $T_0$  uolienu temperatūra už VSK masyvo ribų, vertikalaus gręžinio sienelės temperatūros  $T_b(t)$ . Temperatūros atsako funkcijos priklausomos nuo gręžinio ilgio ir atstumo tarp gręžinių bei gręžinio spindulio santykio ( $\frac{B}{H}$ ) bei praktiškai yra taikomos EED (angl. Earth Energy Designer) programoje. Sudėtinga U-formos vamzdelio geometrija yra supaprastinama į baigtinio ilgio cilindrą su fiksuotu diametru. Cirkuliuojančio skysčio, U-formos vamzdelio, gręžinio užpildo šilumos parametrai yra neįtraukiami, tik skaičiuojama temperatūra ant vertikalaus gręžinio sienelės. Apibendrinta 'g-funkcijos' išraiška pateikiama 1.6 formulėje [27]

$$g\left(\frac{t}{t_s}; \frac{r_b}{H}\right) = \frac{2\pi\lambda_s \cdot (T_b(t) - T_f(t))}{q}. \quad (1.6)$$

Ilgą laikotarpio 'g-funkcijomis' galima apskaičiuoti patikimą rezultatą, kai šilumos perdavimo normos žingsnis yra 1 mėnuo, praktikoje simuliuojant šilumos perdavimą VSK'ių masyve iki 20 - 25 metų. Šio sprendinio rezultatų negalima naudoti, vykdant vienos valandos ir trumpesnės šilumos perdavimo simuliacijas VSK. Yavuzturk (1999) [87] išplėtė ilgo laikotarpio 'g-funkcijų' sprendinį taikydamas dvidimensinį skaitinį modelį polinių koordinatų gardelėje ir gavo trumpo laikotarpio 'g-funkcijos' sprendinio išraiškas. Dėl šilumos perdavimo simetrijos tik viena vertikalaus gręžinio pusė buvo modeliuojama, įtraukiant VSK fizinius ir šiluminius medžiagų parametrus. Skystis U-formos vamzdelyje nebuvo tiesiogiai modeliuotas, o tik pasinaudota šilumos srauto krašine sąlyga ant vertikalaus gręžinio sienelės, matematiškai pritaikius baigtinių tūrių metodą (angl. finite volume method). Pasinaudosime gręžinio varža  $R_b$ , kuri puikiai iliustruoja sąryšį tarp skysčio ir gręžinio sienelės temperatūros ir apibrėžiama tokia skaitine išraiška:

$$g\left(\frac{t}{t_s}; \frac{r_b}{H}\right) = \frac{2\pi\lambda_s(T_f(t) - qR_b - T_b(t))}{q}, \quad (1.7)$$

žinomiems gręžinio spindulio ir vertikalaus gręžinio ilgio santykiams šią trumpo laiko žingsnio 'g-funkciją' galima naudoti nuo 1 minutės iki 200 valandų. Baigtinių tūrių metodu realizuotas šilumos perdavimo modelis išplėtė ilgo laikotarpio 'g-funkcijų' panaudojimą, kurio mažiausias

laiko žingsnis - meniu. VSK projektavimo ir cirkuliuojančio skysčio vidutinės temperatūros vertinimas yra realizuotas kompiuterinėse simuliacijose GLHEPRO [36], EnergyPlus [20]. Skaitiniai metodai nebuvo pritaikyti šilumos perdavimui skystyje - tai didžiausias ir vienintelis šio metodo trūkumas. Tačiau šis trūkumas yra pakeistas kraštine sąlyga, esant fiksuotam šilumos srautui ant vamzdelio sienelės.

## 1.2 Šilumos perdavimo modeliai įtakoti požeminio vandens filtracijos

Al-Khoury [3] sukūrė trimatį baigtiniais elementais paremtą šilumos perdavimo modelį, skirtą simuliuoti viengubo ir dvigubo U-formos vamzdelio tipo VSK, tranzityviai ir pastoviai šilumos perdavimo būsenoms kartu su požeminio vandens filtracija. Disertacijoje He (2012) [34] pasiūlė taip pat sudėtingą baigtiniais tūriais paremtą skaitinį modelį, kurį pritaikė vienam VSK ir konkrečioms konfigūracijoms. Praktiškai ne visada skaitiniai sprendiniai pasiteisina dėl sudėtingų diskretizacijų schemų ir realizavimo, todėl ILS ir ICS modeliai praktiniu aspektu naudingesni, jei yra patenkintos šios sąlygos:

- jei VSK vidinė varža yra minimizuojama;
- už VSK uolienų litologija yra beveik homogeniška;
- horizontalus šilumos perdavimas pagerinamas, esant nedidelei požeminio vandens filtracijai.

Pirmieji VSK skaitiniai tyrimai gauti Eskilson (1987) [27] aprašo analitines išraiškas stacionarios požeminio vandens filtracijos sąlygomis. Vėliau Kavanaugh ir Rafferty (1997) [49] panaudojo 'temperatūrinę baudą' (angl. temperature penalty) požeminio vandens įtakai įvertinti. Vėliau mokslininkas Chiasson (2000) [18] pasiūlė forsutos konvekcijos šilumos perdavimo skaitinį modelį. Mokslininkas nustatė geologines, hidrogeologines sąlygas bei prielaidas, kad negalima remtis in-situ TRT gautais rezultatais, esant 'didelei' požeminio vandens filtracijai. Gehlin [31] pritaikė baigtinių skirtumų metodą trims skirtingiems šilumos perdavimo atvejams su požeminio vandens filtracija:

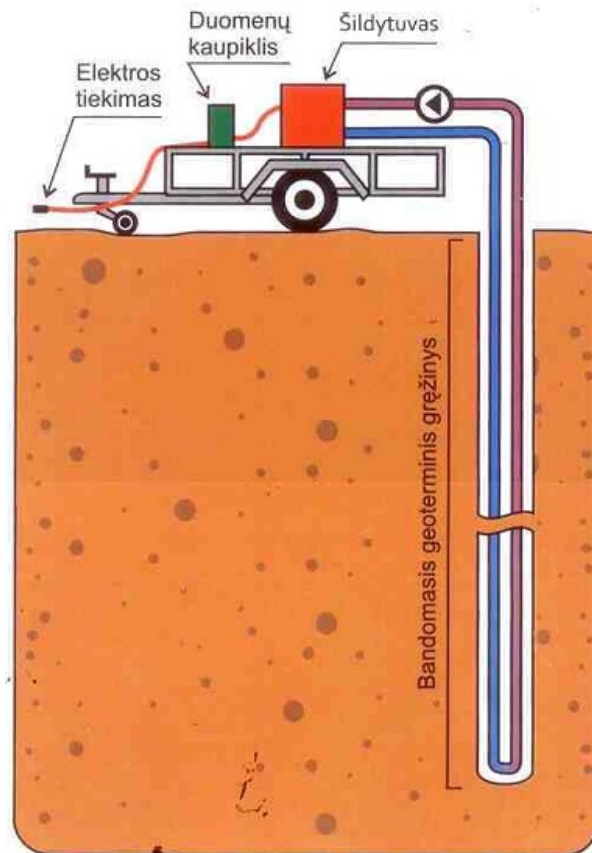
- yra homogeniškoje poringoje uolienoje;
- yra fiksuoto horizontalaus pločio ir fiksuotu atstumu nutolusi nuo VSK;
- yra per vertikaluojį plyšį, kuris gali būti išsidėstęs skirtingais atstumais nuo VSK.

Diao (2004) [23] apskaičiavo gręžinio sienelės temperatūrą, kuri buvo gauta pastoviomis šilumos perdavimo sąlygomis, tai vienas reikšmingesnių analitinių sprendinių, sprendžiant šilumos laidumo fizikines lygtis, įtraukus difuzijos narį dėl požeminio vandens filtracijos. Toliau tyrėjai gavo sprendinius skirtingiems atvejams: baigtinio tiesinio šaltinio (FLS) (angl. Finite Line Source), judančio begalinio tiesinio šaltinio (MILS) (angl. Moving Infinite Line Source), judančio baigtinio ilgio (MFLS) (angl. Moving Finite Line Source) su požeminio vandens judėjimo sąly-

gomis. Mokslininko Molina (2011) [64] buvo gauti patikimi sprendiniai, kai  $Pe < 1.2$ ,  $Pe > 10$ ,  $1.2 < Pe < 10$ .

### 1.3 *In-situ* šilumos atsako testo eksperimentinė aparatūra

Svarbu šilumos perdavimo modelyje naudoti tinkamus nuosėdinių uolienuų sluoksnių hidrogeologinius ir šilumos laidumo parametrus, kurie yra skirtingi nuo vietovės, gylio bei slūgsojimo sąlygų. Uolienuų šilumos laidumo parametrų reikšmių nežinojimas yra pakankamai didelė kliūtis, modeliuojant šilumos perdavimą vertikaliais šilumos kolektoriais. Praktikoje geologai inžinieriai remiamasi ASHRAE (2011) [4] rekomendacijomis, kuriose pateikti siūlymai, kaip atlikti *in-situ* TRT eksperimentą ir panaudoti gautus duomenis analizei. *In-situ* TRT eksperimentams reikalinga speciali aparatinė įranga 1.2 paveikslėlyje, imituojanti geoterminio šilumos siurblio veikimą. Tokią eksperimentinę aparatūrą pirmieji pasigamino švedai 1996 metais [30] ir metais vėliau amerikiečiai. Vėliau kitos valstybės dėjo visas pastangas TRT įrangai vystyti ir kurti: Lotynų Amerikoje [78], Kinijoje [89], Kipre [28], Japonijoje [29], Turkijoje [26], Saudo Arabijoje [81], Korėjoje [42], Tunise [65], Kanadoje [75]. TRT aparatūrą sudaro elektriniai kaitinimo elementai, kurių pagalba šildomas cirkuliuojantis skystis, o cirkuliacinis skysčio siurblys veikia abiejomis kryptimis. Aparatūra eksperimento metu kaupia oro lauko ir skysčio temperatūros, skysčio cirkuliacijos greičio, elektrinių tenų veikimo duomenis kompiuteryje. Skirtingos TRT aparatūros konfigūracijos yra tobulinamos norint mažinti TRT eksperimentinių duomenų neapibrėžtis.



1.2 Paveikslas Temperatūros atsako eksperimentinis prototipas.

*In-situ* TRT rezultatai gali būti naudojami ir įvairiasluoksnei nuosėdinių uolienu stovymei pasitelkus paskirstyto šilumos atsako testo sprendimus (angl. distributed thermal response test) konkrečioje vietovėje. Deja Lietuvoje tokių eksperimentinių tyrimų nėra daug atlikta. Kokybiškai atlikti TRT eksperimentiniai duomenys gali būti gauti tik specialiai įrengtose eksperimentinėse smėlio dėžės laboratorijose: laboratorinėmis sąlygomis ištirta geologinė aplinka bei stabilus TRT aparatūros veikimas ir besąlygiškai užtikrinamas kokybiškas duomenų kaupimas viso TRT eksperimento metu.

## 1.4 Uždarų patalpų *in-situ* šilumos atsako eksperimentiniai tyrimai

Praktiniu požiūriu galima įvardinti keletą svarbiausių tokio tipo TRT eksperimentinių duomenų privalumų. Pirma, atlikti teorinius ir praktinius šilumos perdavimo modelių validavimus. Antra, turime nepriklausomai laboratorijoje nustatytas uolienu šilumos parametrų reikšmes. Trečia, galimas praktinis šių duomenų panaudojimas nustatant uolienu šiluminių parametrų reikšmes. Smėlio dėžėje laboratorinėmis sąlygomis visi TRT eksperimentiniai duomenys yra didelio tikslumo, turi nedideles matuojamų parametrų neapibrėžtis (angl. uncertainty). Visos išvardintos prielaidos įgalina validuoti sukurtą matematinį modelį su praktiniais TRT eksperimento duomenimis. Nepaisant išvardintų privalumų, tik keletas mokslininkų pateikė tokio tipo duomenų pritaikymo ir tyrimo pavyzdžius: Yu (2008) [89], Beier (2011) [8], Park (2012) [71] kartu pateikdami validuotų šilumos perdavimo modelių rezultatus ir jų paklaidas. Reuss (1997) [77] vykdė šilumos perdavimo modelio testavimus ir validavimą skirtingoms uolienoms. Erol (2014) [25] vykdė trumpos trukmės TRT eksperimentus, keisdamas gręžinio užpildo turinį. Panašiai eksperimentus atliko mokslininkai Shirazi (2014) [82] ir Bernier (2011) [8] sudėtingomis geologinėmis sąlygomis su viengubu U-formos vamzdeliu vertikaliame gręžinyje. Paeiliui spausdintose mokslininko Beier skirtingose publikacijose yra pateikti instaliuoto vertikalaus šilumos kolektoriaus ir jį supančios geologinės aplinkos parametrai. Savo publikuotuose rezultatuose pateikė ieškomų šilumos parametrų paklaidas ir pagrindė, kad smėlio dėžės eksperimentai gali būti patikimai naudojami, norint patikrinti sukurtų šilumos perdavimo modelių ir uolienu šilumos parametrų vertinimo metodų tikslumą ir kokybę. Tokio TRT eksperimento duomenimis, gautais iš mokslininko daktaro Saqib Javed iš Chalmers technologijų universiteto Švedijoje, naudosisi savo tyrime.

## 1.5 Uolienu šiluminių parametrų vertinimas naudojant TRT duomenis

*In-situ* TRT ar eksperimentinės smėlio dėžės duomenimis galima naudotis nustatant uolienu šilumos laidumo parametrus, sprendžiant atvirkštinį šilumos perdavimo uždavinį. Tyrėjai Rainieri (2011) [74] ir Raymond (2011) [76] panaudojo skirtingus uolienu šilumos laidumo parametrų paieškos metodus turint tikslą gauti užpildo uolienu šilumos sklaidos ir laidumo parametrų įverčius. Praktikoje vis dar plačiai taikomi minėti begalinio ilgio tiesinio ir cilindrinio šilumos

šaltinio analitiniai metodai, kurie yra paprastai ir greitai pritaikomi, nors su didesnėmis įverčių reikšmių paklaidomis.

Tik keletas iš jų, esant pastoviai (angl. steady state) šilumos perdavimo būsenai, Roth (2004) [78], Fuji (2009) [29], Li (2012) [57] pateikė patikimus rezultatus, bet tik turint ilgos trukmės TRT eksperimento duomenis. Naudodami skaitinius šilumos perdavimo modelius Shonder(2000) [83] ir Bozzoli (2011) [13] gavo patikimus vertikalaus gręžinio užpildo šilumos talpos rezultatus. Svarbu pabrėžti, kad minėti metodai yra 'jautrūs' turimoms parametru reikšmėms bei reikalauja didelio pradinių TRT eksperimento duomenų kiekio.

Box [12] siūlė visose modeliavimo procedūrose privalomai pateikti ne tik parametro įverčio reikšmę, bet ir paklaidos vertę. Šiose Popov (2016) [73] ir Zhang (2018) [91] publikacijose detalai aprašomi pažangūs evoliuciniai algoritmai, kurie įgalina efektyviai vertinti uolienų šilumos parametrus su maža santykinė paklaida, o parametrai paieškomi - paraleliai.

## 1.6 Programinės įrangos priemonės

Šiuo metu pasaulyje yra sukurta apie 400 programinės įrangos priemonių, skirtų energijos efektyvumui, atsinaujinančiai energetikai, pastatų tvarumui vertinti. Tokius duomenis pateikė JAV energetikos departamentas. Praktikoje šilumos perdavimo procesams modeliuoti vertikaliais šilumos kolektoriais geologai naudojami jau išvystytomis taikomosiomis programomis. Trumpai aptarsime penkias populiariausias programas, skirtas šilumos perdavimui modeliuoti VSK, įtraukiant pastato energetinius poreikius šiltam vandeniui ir šilumai, šilumos siurblių ir vertikalių šilumos kolektorių modeliavimui: DOE-2.1e, eQUEST, EnergyPlus, TRNSYS ir EnergyGauge. Liu ir Hellström (2006) [61] DOE-2.1e programoje integravo geoterminių šilumos siurblių ir pastato energetinių poreikių modeliavimą. eQUEST/DOE-2.2 naudojasi temperatūros atsako 'g-funkcijomis', pasiūlytomis Eskilson (1987) [27], kurios vertina vidutinę cirkuliuojančio skysčio temperatūrą. Minėtose programose buvo įdiegti Yavuzturk ir Spitler [88] trumpo laikotarpio 'g-funkcijų' sprendiniai. Autorių Jin ir Spitler EnergyPlus [20] programa naudojama metinei pastato energetinių poreikių simuliacijai kartu su vertikaliu šilumos kolektoriumi, naudojant 'vanduo - vanduo' geoterminio šilumos siurblio veikimą. Šioje programoje buvo realizuotos Yavuzturk ir Spitler trumpo laikotarpio 'g-funkcijos'. Panašiu principu veikia TRNSYS [53] programos modulis, skirtas VSK modeliavimui, kuriame įdiegtas šilumos perdavimo modelis pasiūlytas Hellström [36] kartu su bendrautoriumi Thornton [86].

Kitos sukurtos programinės įrangos naudoja analitinius begalinio ilgio tiesinio ir cilindrinio šilumos šaltinio metodus, įtraukiant į šilumos perdavimo simuliaciją vertikalių šilumos kolektorių sistemas kartu optimizuojant geoterminių šilumos siurblių veikimą. Yang (2010) [63] pateikė kelias VSK projektavimo priemones, paremtas begalinio ilgio cilindrinio šaltinio metodais. Begalinio ilgio tiesinio šilumos šaltinio metodų pritaikymas yra realizuotas EED [37], GLHEPRO [84] ir GeoStar [22] programose, o GchpCalc [50] - begalinio ilgio cilindrinio šilumos šaltinio metodas. Lund Universiteto Švedijoje sukurta programa EED, paremta [27] ilgo laikotarpio g-funkcijų modeliavimu skirtingoms daugiau nei 200 VSK sistemų konfigūracijoms, kuri plačiai taikoma Lietuvos geologų praktikoje. Ši programa pateikia skaičiavimo rezultatus per minutę

skirtingiems mėnesiniams pastato šalčio ir šilumos energetiniams poreikiams 20 - 25 metų laikotarpiui, nustatytam efektyviam šilumos siurblio veikimo koeficientui (pvz. ne mažiau 4, 5). GLHEPRO programa gali simuliuoti valandos žingsniu šilumos ar šalčio poreikius, išskiriant mėnesio ekstremalias reikšmes, skirtingoms vertikalių šilumos kolektorių sistemoms. Kinijos mokslininkų sukurta GeoStar programa apima šilumos perdavimo modeliavimą ir gręžinio viduje, ir už vertikalaus gręžinio sienelės, tai didelis privalumas modeliuojant trumpo laikotarpio vidutinės skysčio temperatūros vertikaliame šilumos kolektoriuje.

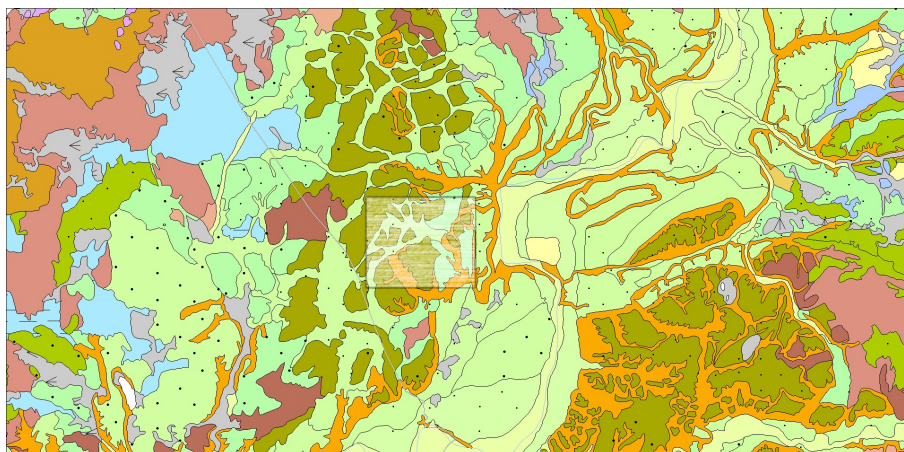
## 1.7 Diskusija

Šiame skyriuje buvo pristatyti skirtingi analitiniai, temperatūros atsako 'g-funkcijų' ir skaitiniai modeliai, įgalinantys modeliuoti šilumos perdavimą VSK. Skaitiniai sprendiniai buvo gauti, sprendžiant diferencialines lygtis dalinėmis išvestinėmis, panaudojus tradicines baigtinių skirtumų, baigtinių tūrių ir baigtinių elementų diskretizavimo schemas. Taip pat buvo pateikti ir paaiškinti skirtingi šilumos perdavimo procesai: skystyje, U-formos per plastikinį vamzdelį, gręžinio užpilde bei už vertikalaus gręžinio sienelės. Pateiktas TRT eksperimentinės aparatūros atsiradimas, jos tolesnis tobulinamas, dedant pastangas kokybiškai gerinti techninės įrangos veikimą, mažinant eksperimento matavimų neapibrėžtis. Kitame skyriuje pateiksiu lietuviškos įmonės TRT eksperimentinės aparatūros prototipo realizaciją, neatskleidžiant konfidencialių techninės realizacijos detalių, bet nurodant esminius principus, kuriais remiantis buvo sukonstruotas TRT eksperimentinis prototipas. Svarbu pabrėžti, kad temperatūros atsako duomenų analizės rezultatas tiesiogiai priklauso nuo matavimo paklaidų, kurios įtakoja šilumos perdavimo modelio ir ieškomų šilumos parametrų rezultatus. Nėra dažni atvejai, kai vienoje tiriamojoje mokslinėje publikacijoje yra aprašoma pati vertinimo procedūra ir pateikiami parametro įverčiai bei jų paklaidos, parametrų jautrumo analizė neapibrėžtims. Disertacijos skaitiniame tyrime buvo nuspręsta atlikti tokį skaitinį eksperimentą vertinant uolienu šilumos parametrus, su itin tiksliais TRT eksperimento duomenimis. Praktikoje inžinieriai įprastai naudojami ASHRAE metodika, kuri realizuota naudojamose programinėse įrangose, galinčiose analizuoti TRT eksperimento duomenis, nustatyti apibendrintos geologinės stovymės šilumos parametrus. Sertifikuotos kompiuterinės programos skirtos projektuoti ir optimizuoti VSK sistemas su geoterminių šilumos siurblių veikimu pagal pastato šilumos ir šalčio energetinius poreikius.

## skyrius 2

# Eksperimentiniai tyrimo objektai ir jų charakteristikos

Tiriamasis objektas yra Vilniaus miesto Visorių mikrorajone, kaip matome iš 2.1 paveikslėlio, Dzūkijos pakraštinės moreninės aukštumos srityje, Sudervės moreniniame kalvyne. Ši objekto dalis Vilniaus mieste, esanti dešiniajame Neries klonio šlaite, įsikūrusi paskutiniojo apledėjimo pakraštinių darinių ruože. Skirtinga geomorfologija, paviršiaus ir gelmių geologine sandara pasižymi Pagubės, Žaliųjų ežerų, Gulbinų, Ežerėlių, Visorių, Pašilaičių bei Gudelių mikrorajonai. Aukščiausiai iškilęs paviršius su išlikusiomis apardytomis senojo – Medininkų – ledyno sudaryto reljefo pakilumomis būdingas Visorių ir Pašilaičių mikrorajonams (Bajorų fliuvioglacialinis masivas) Stankevičiūtė (2012) [85]. Čia yra charakterizuojama tiriamojo objekto, esančio Visorių mikrorajone geologinė ir geomorfologinė aplinka. Paskutinio apledėjimo Grūdų stadijos fliuvog-



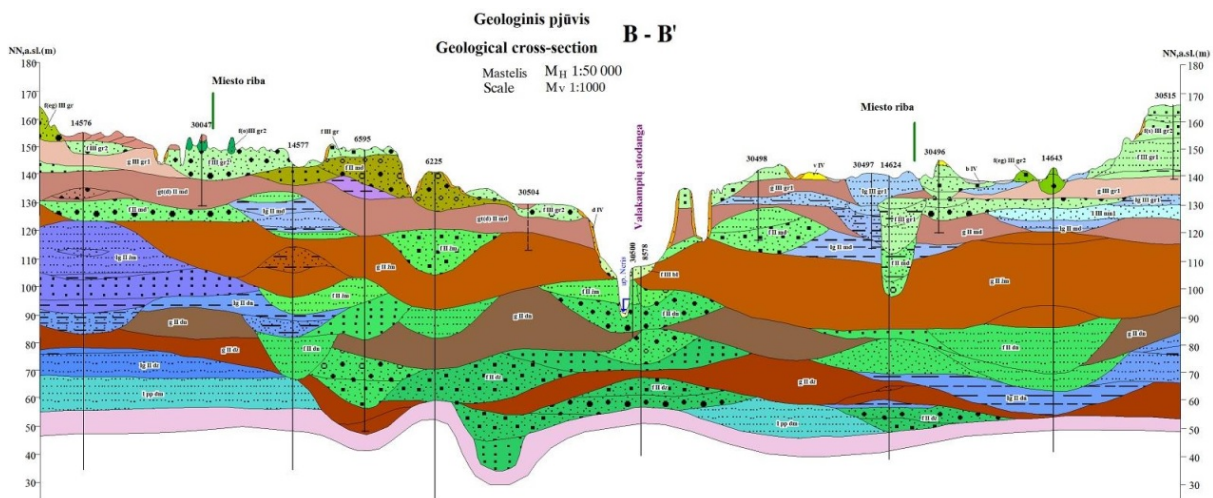
2.1 Paveikslas Vilniaus miesto Visorių mikrorajono geologinis žemėlapis pagal Stankevičiūtės (2012)[85].

lacialinės nuogulos (f III gr) yra plačiai paplitę beveik visoje Vilniaus miesto teritorijoje, išskyrus pietrytinę dalį. Nuogulų storis vietomis siekia 16,8 m.. Fliuvioglacialinių kraštinių darinių nuogulos daugiausia paplitę Vilniaus miesto šiaurinėje dalyje, o jų storis kinta nuo 0,2 iki 11 metrų. Šias nuogulas sudaro dulkingas, molingas bei žvirgždingas smėlis, taip pat smėlis ir žvyras. Grūdų stadijos glacialinės nuogulos (g III gr) paplitę ribotai rytinėje Vilniaus miesto teritorijos



dalyje. Nuogulų storis vietomis siekia net iki 25,9 metrų, o kraštinių darinių nuogulos, kurias sudaro moreninis smėlingas ir dulkingas molis, paplitę šiaurinėje, šiaurvakarinėje ir šiaurrietinėje Vilniaus miesto teritorijos dalyse. Jų storis kinta nuo 0,2 iki 13,8 metrų. Vidurinio pleistoceno nuogulas sudaro Medininkų svitos limnoglacialiniai (lg II md), kraštinių darinių limnoglacialiniai ( $lgt_t$  II md), fluvioglacialinės (f II md), kraštinių darinių fluvioglacialinės ( $ft_t$  II md) nuogulos, glacialinės pagrindinės morenos (g II md) ir kraštinių darinių glacialinės ( $gt_t$  II md) pagrindinės morenos ir Žemaitijos limnoglacialinės ir glacialinės pagrindinės morenos nuogulos. Medininkų svitos limnoglacialinės (lg II md) ir kraštinių darinių limnoglacialinės ( $lgt_t$  II md) uolienos žemės paviršiuje paplitę tik pietinėje dalyje, čia juos sudaro molis ir dulkingas molis iki 0,9 metrų storio. Storis kinta nuo 0,1 metro kraštinių darinių uolienose, kurios plačiai paplitę vakarinėje pietrytinėje ir pietinėje Vilniaus miesto dalyse. Medininkų svitos fluvioglacialinės (f II md) ir kraštinių darinių fluvioglacialinės ( $ft_t$  II md) nuogulos labai ribotai aptinkamos vakarinėje dalyje, storis gana kaitus nuo 0,2 iki 16,3 metrų. Fluvioglacialinės kraštinių darinių nuogulos plačiai paplitę rytinėje ir pietinėje dalyse, bei retai sutinkamos šiaurės vakarinėje dalyje, kurių storis siekia nuo 0,2 iki 17,8 m. Jas sudaro dulkingas, molingas žvirgždingas smėlis, vidutinis smėlis, vietomis žvyras iki 14,4 metrų storio. Medininkų svitos pagrindinės morenos glacialinės (g II md) uolienos paplitę nedideliu ploteliu vakarinėje ir šiaurinėje dalyse, kai jų storis siekia net iki 28 metrų. Kraštinių darinių ( $gt_t$  II md) gruntai paplitę daugiausia rytinėje, pietinėje dalyse, kiek rečiau vakarinėje Vilniaus miesto dalyje. Uolienas sudaro moreninis smėlingas, dulkingas priemolis ir priemolis. Žemaitijos posvitės limnoglacialinės (lg II žm), glacialinės (g II žm) pagrindinės morenos ir kraštinių darinių glacialinės ( $gt_t$  II žm) nuogulos labai mažais ploteliais paplitę tik centrinėje Vilniaus miesto teritorijos dalyse. Limnoglacialines nuogulas sudaro dulgis, vidutinis ir dulkingas smėlis. Glacialines ir kraštinių darinių glacialines nuogulas sudaro moreninis smėlingas, dulkingas priemolis ir priemolis. Jų storis kinta nuo 0,2 iki 6,8 m. Vietomis kartografuotame plote aptinkami prekvartero kreidos sistemos uolienų luistai. Giliau slūgsantys vidurinio pleistoceno Dainavos, Dzūkijos limnoglacialinės, fluvioglacialinės ir glacialinės pagrindinės morenos uolienos, taip pat apatinio pleistoceno Kalvių limnoglacialinės ir glacialinės pagrindinės morenos uolienos, bei prepleistoceno limninės neaprašomos dėl informacijos apie jų paplitimą, fizikines - mechanines uolienų savybes. Vilniuje gruntinio vandens lygio svyravimo amplitudė kinta maksimaliai iki 4 ar 6 metrų aukštesnėse upių terasose pavasarį ir rudenį, o žemesnėse neviršija 0,5 – 1,5 metrų upių pavasario metu. Laisvasis vandens paviršius atkartoja žemės paviršiaus reljefą. Hidroizohipsės žemėja nuo aukštesnių terasų upės vagos kryptimi, kur gruntinio vandens laisvasis paviršius žemėja nuo 130–180 metrų iki 90 metrų absoliutaus aukščio. Tarpmoreniniai vandeningieji sluoksniai slūgso tarp dviejų mažai vandeniui laidžių molingų (moreninių nuogulų) sluoksnių. Tarpmoreninis požeminis vanduo yra susikaupęs ledyno tirpimo nuogulų lęšiuose ir tarp sluoksniuose, įvairios granuliometrinės sudėties smėlyje ir žvyre [85]. Tarpmoreninių sluoksnių storis kinta nuo 5 iki 40 m. Jų požeminis vanduo yra paprastai giliau negu 15–20 metrų. Skirtingai negu gruntinis vanduo, jis turi spūdjį, kuris priklauso nuo sluoksnių slūgsojimo gylio. Spūdis virš sluoksnio kraigo siekia nuo keleto iki 10 m, pjezometrinis lygis nusistovi aukštesnėse terasose 2–3 m gylyje nuo gruntinio vandens laisvojo paviršiaus, išskyrus I ir II viršsalpines terasas, kur vyksta spūdžių inversija bei dalinė tarpmoreninio vandens iškrova į gruntinį sluoksnį. Tačiau iškrovos debitai nėra dideli, nes priemolių filtracijos koeficientai siekia vos iki 3–10  $\frac{m}{d}$ . Daugelyje vietų moreniniai dariniai pleišėti, tada tarpmoreniniai sluoksniai

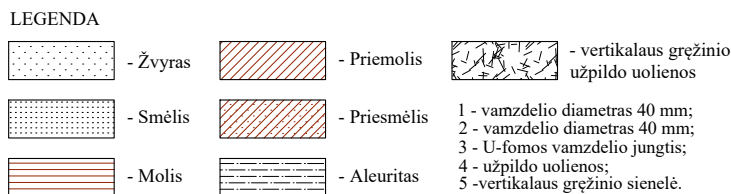
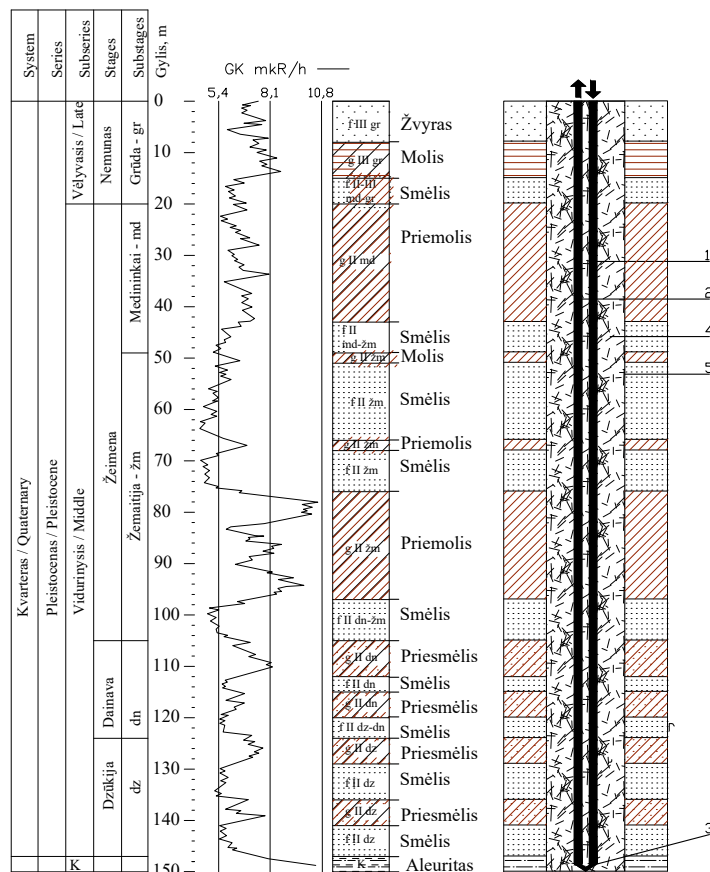
slūgso vienas ant kito sudarydami vieną vandeningą kompleksą, kurio storis labai padidėja. Vietomis kvartero darinius kerta gilūs eroziniai įrėžiai, kurie daug kartų buvo ledynų performuoti. Tokiuose įrėžiuose aptinkami keli skirtingo amžiaus tarpmoreniniai sluoksniai. Savitasis gręžinių debitas sudaro nuo 0,1 iki  $3 \frac{l}{s}$ , o filtracijos koeficientas nuo 1 iki 30 metrų per dieną. Vidurinio pleistoceno Dzūkijos ledyno moreninės (g II dz), fluvioglacialinės (f II dz) ir limnoglacialinės (lg II dz) nuogulos paplitusios beveik visoje Vilniaus miesto teritorijoje ir kinta nuo 50 iki 70 metrų absoliučiam aukštyje, pietinėje ir vakarinėje miesto dalyse. Dzūkijos ledynmečio nuogulos slūgso 50 - 10 metrų absoliučiam aukštyje, kur nuogulų storis siekia nuo 30 iki 40 metrų, o Dzūkijos moreninių nuogulų storis kinta nuo 5 iki 20 metrų. Vidurinio pleistoceno Dainavos ledyno glacialinės (g II dn), fluvioglacialinės (f II dn) ir limnoglacialinės (lg II dn) nuogulos išplitusios maždaug kinta 70 - 90 metrų absoliučiam aukštyje. Vilniaus vakarinėje ir pietinėje miesto dalyse jos aptinkamos giliau apytiksliai intervale 60-20 metrų absoliutaus aukščio. Dainavos ledynmečio nuogulų storis gali siekti 30 - 40 metrų. Dainavos moreninės nuogulos – tai dažnai pilkas moreninis priemelis, kuriame dažnai aptinkami kreidos luistai. Limnoglacialinės Dainavos ledyno nuosėdos dažnai yra dislokuotos. Dainavos ledyno nuogulos miesto teritorijoje aptinkamos beveik visur, o žalsvai pilkas smulkus limnoglacialinis Dainavos ledynmečio smėlis dažnai buvo priskiriamas Butėnų tarpledynmečio ežerinėms nuosėdoms. Vidurinio pleistoceno Medininkų ledyno nuogulos šiaurvakarinėje ir šiaurinėje miesto dalyje slūgso po nestora paskutiniojo ledyno nuogulų danga, o pietryčiuose Medininkų ledyno pakraštiniai dariniai sudaro reljefo mezoformą – Medininkų kalvyną [85]. Tyrimų plotas pasižymi sudėtinga geologine sandara bei



2.2 Pavikslas Vilniaus miesto geologinis pjūvis pagal Stakevičiūtės (2012), [85].

hidrogeologinėmis sąlygomis. Viršutinę geologinio pjūvio sandarą ir litologinę sudėtį formavo ledynmečių, tarpledynmečių geologiniai procesai. Geologinė stovymė aprašyta, atsižvelgiant į uolienų mėginių tyrimo rezultatus: spalvą, drėgnumą, litologinę sudėtį. Geologiniai sluoksniai pavaizduoti 2.3 paveikslėlyje pasitelkus skirtingas vertikalių gręžinių litologines kolonėles bei bandomuosius gręžinius.

Šie vietovės parametrai buvo nustatyti remiantis Ž.Palaičio techninėmis ataskaitomis [68], UAB 'Vilniaus Hidrogeologija' ataskaitomis ir publikacijomis [9, 10] kartu su dr. Mariaus Grogorsko techninėmis ir praktinėmis nuorodomis. Hidrogeologinės sąlygos pavaizduotos 2.3 paveikslėlyje, jas sudaro aštuoni vandeningi sluoksniai: Grūdės (f III gr), Medininkų - Grūdės (f



### 2.3 Pavikslas Eksperimentinis vertikalus šilumos kolektorius kvartero nuogulose iš publikacijos Indriulionis (2018) [43].

III md - gr), Žemaitijos - Medininkų (f II žm - md), Žemaitijos (f II žm), Dainavos - Žemaitijos (f II dn - žm), Dainavos (f II dn), Dzūkijos - Dainavos (f II dz - dn) ir Dzūkijos (f II dz). *In-situ* TRT tiriamajai vietai yra nustatyti modeliuojami hidrodinaminiai parametrai. Detaliam bus pateikta kiekvieno litologinio sluoksnio, susieto su hidrodinaminiais parametrais, t.y. modeliujamo hidrodinaminio gradiento, aktyvaus uolienu poringumo ir filtracijos koeficientų reikšmės tiriamajai vietai, priskiriant minėtus parametrus kiekvienam litologiniam sluoksniui. Vietovės paviršiuje slūgso fluvioglacialinių Grūdų (f III gr) stadijos nuogulų sluoksnis sudarytas iš įvairaus smėlio ir žvirgždo. Eksperimentinio tyrimo ploto dalyje sluoksnio storis siekia apie 8 metrus, o vakarinėje dalyje iki 13 metrų storio. Vidutinis viršutinių nuosėdinių uolienu storis apie 10,5 metrų visame tiriamajame plote. Šis litologinis sluoksnis yra nuolat veikiamas temperatūrinių

pokyčių, kritulių, o filtracijos koeficiento reikšmė yra lygi  $30 \frac{m}{d}$ , aktyvusis poringumas yra lygus 0,35. Priklausomai nuo iškritusių vidutinio metinio kritulių kiekio, vandeningos dalies storis kinta nuo 2 iki 5 metrų. Pirmoji vandenspara, mažai laidus vandeniui yra apie 8 - 15 metrų gylyje, o litologinis sluoksnis yra sudarytas iš glacialinių Grūdų (g III gr) stadijos metu susiklosčiusių nuogulų molio, moreninio priemolio, priesmėlio, kurio modeliuojama filtracijos koeficiento reikšmė yra lygi  $8 \cdot 10^{-4} \frac{m}{d}$ , o aktyvusis uolienu poringumas yra lygus 0,01. Nuo 15 iki 20 metrų gylyje yra Grūdų - Medininkų (f III md - gr) fliuvioglacialinių nuogulų sluoksnis. Šiame litologiniame sluoksnyje filtracijos koeficiento modeliuojama reikšmė yra lygi  $7 \frac{m}{d}$ , o aktyvusis poringumas yra lygus 0,22. Bendras nuogulų storis vakarinėje dalyje siekia iki 14 metrų, o rytinėje iki 30 metrų, kurios slūgso ant glacialinių Medininkų (g II md) stadijos darinių, kur filtracijos koeficientas yra lygus  $8 \cdot 10^{-4}$  ir aktyvusis poringumas 0,01. Centrinio stebimojo vertikalios gręžinio tyrimo vietovėje Medininkų (g II md) glacialinių nuogulų sluoksnis siekia 23 metrus, kuris sudarytas iš moreninio priemolio ir priesmėlio bei puikiai apsaugo giluminius vandeningus sluoksnius nuo išorinės taršos. Vandeninga Medininkų fliuvioglacialinė (f II žm - md) storė yra 43 metrų gylyje, kurios storis siekia 6 metrus, sluoksnio kraigas yra aptiktas 49 metrų gylyje. Eksperimentiniame plote kinta nuo 35 iki 49 metrų, sudarytoje iš vidutinio ir stambaus smėlio. Vakarinėje ir centrinėje tyrimo dalyse buvo aptiktos šios nuosėdos. Nuo centrinės dalies einant pietvakarių kryptimi sluoksnis storėja, hidrodinamiai parametrai filtracijos koeficientas ir aktyvusis uolienu poringumas yra lygūs  $3 \frac{m}{d}$ , 0,15 atitinkamai. Po smėlingais Medininkų stadijos dariniais apačioje slūgso Žemaitijos (g II žm) moreninio priemolio, priesmėlio ir molio sluoksniai. Vakarinėje dalyje šie dariniai slūgso ant glacialinių Žemaitijos (g II žm) darinių net trijų skirtingo storio sluoksnių (49 – 51, 65 – 68, 76 – 97 metrų gylyje), kurių bendras storis centrinėje dalyje siekia 24 metrus, o rytinėje tik 11 metrų. Hidrodinamiai modeliavimo parametrai: filtracijos koeficiento reikšmė siekia  $2 \cdot 10^{-4} \frac{m}{d}$ , o aktyvusis uolienu poringumas 0,009. Bendras vidutinis storis siekia iki 28 metrų. Centrinėje ir rytinėje dalyje aptikta nedidelė dalis smėlingo tarp sluoksnio iki 2 - 3 metrų vandeningais skirtingų frakcijų smėlio ir žvyro lėšiais. Tarp Žemaitijos stadijos (g II žm) tarp sluoksnių slūgso fliuvioglacialiniai Žemaitijos (f II žm) ir Dainavos - Žemaitijos (f II dn - žm) dariniai skirtinguose gyliuose: 51 – 65, 68 – 76, 97 – 105 metrų gylyje, kurių bendras storis centrinėje dalyje siekia 30 metrų. Hidrodinamiai modeliavimo parametrai: filtracijos koeficiento reikšmė siekia  $5 \frac{m}{d}$ , o aktyvusis uolienu poringumas 0,2. Vandeniui atsparus ir mažai laidus glacialinis Dainavos (g II dn) sluoksnis kinta vakarų kryptimi nuo 120 iki 132 metrų rytuose. Jo hidrogeologiniai parametrai yra lygūs t.y. filtracijos koeficientas  $5 \cdot 10^{-4}$ , o aktyvusis poringumas - 0,01, o centriniame gręžinyje yra skirtingame gylyje esantys sluoksniai 105 - 112 ir 115 - 120 metrų. Moreninio priemolio, priesmėlio dariniai paplitę visame tiriamajame plote, kur storis siekia skirtinguose sluoksniuose 5 ir 7 metrus atitinkamai. Tarp moreninio Dzūkijos - Dainavos (f II dz - dn) vandeningas sluoksnis sudarytas iš smulkaus smėlio centrinėje dalyje. Šis sluoksnis ypatingai gerai atskirtas nuo kitų vandeningų sluoksnių ir neturi tiesioginio sąlyčio su kitais vandeningais sluoksniais, tačiau maždaug tiriamajame vertikaliame gręžinyje yra apie 3 metrų storio, maždaug 120 - 123 metrų gylyje, kur filtracijos koeficientas  $5 \frac{m}{d}$ , aktyvusis poringumas - 0,2. Fliuvioglacialinės kilmės Dzūkijos (f II dz) stadijos nuosėdos, kurios sudarytos iš vidutinio ir stambaus smėlio, kurių storis keičiasi vakarų kryptimi nuo 127 iki 137 metrų. Centrinėje, tiriamojo vertikalios gręžinio dalyje, 123 - 129 ir 135 - 141 metrų gyliuose aptikti Dzūkijos (g II dz) moreninio priemolio tarp sluoksniai. Šis sluoksnis aptinkamas gilesnių paleoėžerų tarp-

luoksniuose nepasižymi dideliu filtracijos koeficientu  $5 \cdot 10^{-4}$ , o aktyvusis poringumas - 0,01. Kraigas yra maždaug 148 metrų gylyje, kai kuriose tiriamojo ploto vietose buvo aptiktas 144 metrų gylyje. Požeminis vanduo tiesiogiai nudrenuojamas Neries senslėniu. Fluvioglacialiniai Dzūkijos (f II dz) dariniai slūgso ant viršutinio devono ( $K$ ) Upninkų aleurito, mergelio ir kelių centimetrų storio dolomito sluoksnių. Aktyviojo poringumo reikšmė yra lygi 0,009, o filtracijos koeficientas - 0,0001. Požeminio vandens srautas iš aukštuminės dalies krypsta link Neries upės. Vandens lygiai sluoksniuose skirtingi ir kaitūs nuo 2 metrų iki daugiau nei 20 metrų. Hidraulinis gradientas šioje vietovėje kinta intervale 0,001 - 0,02 skirtinguose eksperimentinio vertikalaus šilumos kolektoriaus gyliuose. Detaliau hidrogeologiniai parametrai pateikti priede A lentelėje.

Eksperimento metu buvo laikomasi aukštų TRT vykdymo techninių reikalavimų pagal ASH-RAE (2009) procedūras, t.y. matavimų neapibrėžtumai yra labai maži, įtaka vidinio U-formos vamzdelyje cirkuliuojančio skysčio ir išorinių temperatūrinių pokyčių yra minimali, todėl tokie eksperimentiniai duomenys neturi įtakos TRT analizės rezultatams. Taip pat svarbu paminėti, kad atstumai tarp vamzdelių taip pat buvo fiksuoti laikantis minėtų reikalavimų. Tada turime, kad įpumpuotos šilumos norma, cirkuliuojančio skysčio greitis yra lygūs konstantai viso eksperimento metu. In-situ TRT eksperimento aprašymas yra pateiktas 2.1 lentelėje, rodančioje vertikalaus šiluminio kolektoriaus, U-formos plastikinio vamzdelio fizinius bei TRT aparatūros veikimo parametrus. Cirkuliuojantis skystis U-formos vamzdelyje juda  $0,5 \frac{l}{s}$  greičiu, o trimis

Eksperimentiniai parametrai	Reikšmės
Vertikalaus kolektoriaus ilgis ( $H$ )	150 m
Gręžinio išorinis diametras ( $d_{bout}$ )	0,190 m
Gręžinio vidinis diametras ( $d_{bin}$ )	0,186 m
U-formos vamzdelio vidinis diametras ( $d_{out}$ )	0,0326 m
U-formos vamzdelio išorinis diametras ( $d_{in}$ )	0,4 m
Atstumo pusė tarp U-formos vamzdelio centrų ( $L_s$ )	0,073 m
Skysčio judėjimo greitis ( $v_f$ )	0,5 l/s
Įpumpuota šilumos norma ( $Q$ )	6656 W
Pradinė temperatūra ( $T_0$ )	7,1 °C

2.1 Lentelė *in-situ* TRT eksperimento aprašymas

tenais, kurių vieno galia apie 3 kW, pateikiama 6656 W šildymo galia cirkuliuojančiam skysčiui, bei užtikrinama viso TRT testo metu labai maži matavimo neapibrėžtumai 1% abiemis minėtiems matuojamiems dydžiams. Skysčio temperatūros matavimo prietaisai veikia labai aukštu matavimo tikslumu, kur matavimo paklaida neviršija  $\pm 0,03^\circ C$ . Visi temperatūros, skysčio judėjimo greičio ir įpumpuotos šilumos galios rodmenys buvo įrašomi į kompiuterį kas 10 sekundžių. Šilumos atsako testas vykdytas 71,5 valandos, o buvo parinktas centrinis Nr. 52 gręžinys visoje VSK sistemoje. Daugiau techninių detalių galima rasti Palaičio (2012) [68] techninėje ataskaitoje, kuri buvo pateikta ir saugoma Lietuvos geologijos tarnybos archyve. TRT testo pradžioje buvo pamatuota po žeme esanti temperatūra, cirkuliuojant skystį U-formos vamzdeliu, nešildant skysčio elektriniais tenais maždaug apie keletą minučių. Buvo nustatyta  $7,1^\circ C$  temperatūra visam vertikalaus šilumos kolektoriaus ilgiui, o cirkuliuojantį skystį U-formos vamzdelyje sudaro 37% antifrizo ir vandens mišinys. Po to kai buvo atlikti šie matavimai, bei atlikus TRT aparatūros sandarumo ir nuorinimo veiksmus, yra įjungiami šilumos tenai, kurie pradeda šildyti minėtą

skystį. Skysčio temperatūra matuojama abiejuose U-formos vamzdelio pusėse t.y. judančio į žemės gelmes ir išeinančio iš jų abiejomis kryptimis. Lentelėje Nr. 2.2 pateikti in-situ TRT testo skysčio judančio U-formos vamzdelyje, plastikinio vamzdelio, vertikalaus gręžinio užpildo ir vertikalų gręžinį supančių uolienu šilumos parametrai.

Parametras	Vertė
Skysčio šiluminis laidumas ( $W/(mK)$ )	0,48
Vamzdelio šiluminis laidumas ( $W/(mK)$ )	0,42
Uolienu šiluminis laidumas ( $W/(mK)$ )	2,21
Skysčio šiluminė talpa ( $MJ/(m^3K)$ )	3,992
Uolienu šiluminė talpa ( $MJ/(m^3K)$ )	2,460
Skysčio šiluminė sklaida ( $m^2/s$ )	1,2e-07
Uolienu šiluminė sklaida ( $m^2/s$ )	8,98e-07

2.2 Lentelė *in-situ* TRT eksperimento šiluminiai parametrai.

Daugiau eksperimento techninių detalių galima rasti A priede.

## 2.1 Laboratorinėmis sąlygomis temperatūrinio atsako tyrimas ir geologinė aplinka

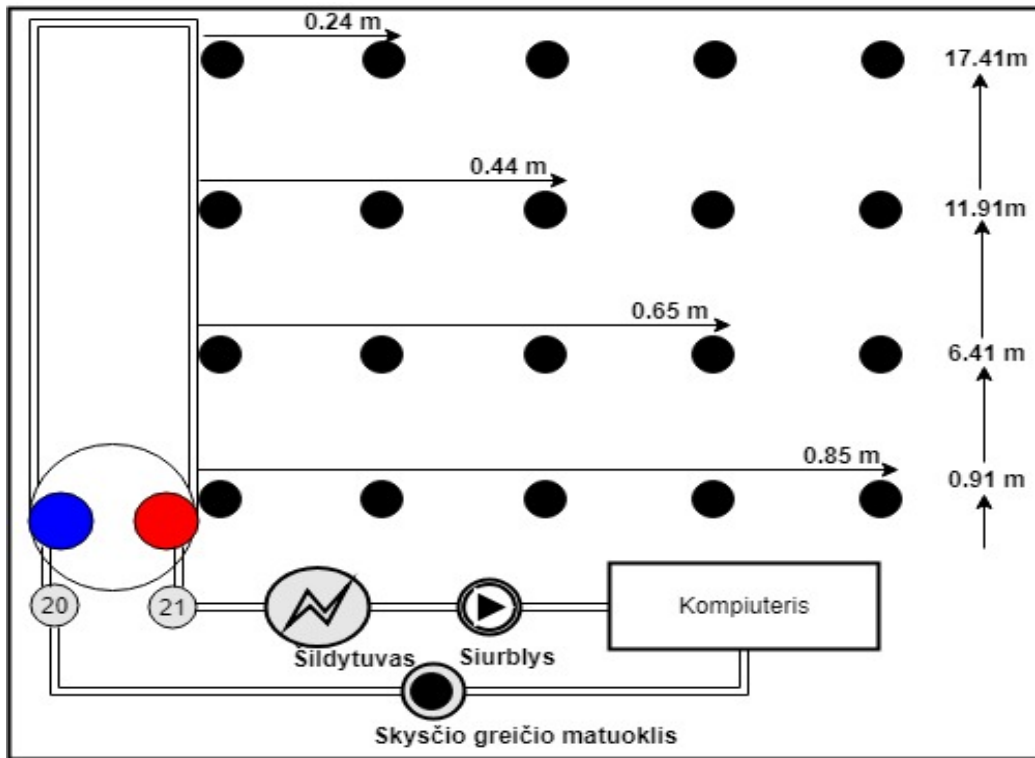
Praktiškai daugelis šilumos atsako testų yra vykdomi realiomis *in-situ* geologinėmis sąlygomis. Didelės smėlio dėžės laboratorijose TRT duomenys dažnai naudojami šilumos perdavimo modelių testavimui ir validavimui, nes šių eksperimentų duomenų kokybė yra labai aukšta ir patikima dėl mažų matavimų neapibrėžčių. Laboratorijoje smėlio dėžė yra sukonstruota iš medinio rėmo, o konstrukcija yra 1,83 metro pločio ir 18,32 metrų ilgio. Vertikalus šilumos kolektorius sumontuotas horizontalioje padėtyje palei smėlio dėžės ilgį. Plastikinė plėvelė saugo medinę dėžę nuo vandens ištekėjimo iš smėlio. Dėžėje esantis smėlis yra prisotinamas vandeniu tiesiai iš vandens tiekimo sistemos, kuri sujungta su penkiais paraleliai vienodais tarpais sumontuotais vamzdeliais su skylutėmis dėžės dugne. Visa medinės dėžės išorė yra termiškai izoliuota, siekiant sumažinti išorinį laboratorijos patalpos temperatūros poveikį. Sukontruotos eksperimentinės smėlio dėžės ir sumontuoto VSK fiziniai parametrai yra pateikti 2.3 lentelėje.

Eksperimento parametrai	Reikšmės
Kolektoriaus ilgis (H)	18,32 m
Kolektoriaus išorinis spindulys ( $r_{bout}$ )	0,065 m
Kolektoriaus vidinis spindulys ( $r_{bin}$ )	0,063 m
U-formos vamzdelių išorinis spindulys ( $r_{out}$ )	0,0167 m
U-formos vamzdelių vidinis spindulys ( $r_{in}$ )	0,0137 m
Atstumas tarp U-formos vamzdelių centrų ( $L_s$ )	0,053 m
Skysčio judėjimo greitis ( $m_f$ )	0,197 kg/s
Įpumpuotas šilumos perdavimo norma ( $q$ )	57,7 W/m
Pradinė smėlio temperatūra ( $T_0$ )	22°C

2.3 Lentelė Smėlio dėžės praktinio eksperimento techniniai duomenys.

TRT eksperimento vykdymo kokybė užrikinama, kai įpumpuotos šilumos perdavimo nor-

ma ir skysčio srauto greitis būtų beveik konstantos, o prietaisų matavimai su kiek įmanoma mažomis neapibrėžčių reikšmėmis. U-formos vamzdelis yra sumontuotas horizontaliame aukšto šilumos laidumo aliuminio cilindre imituojama vertikalaus gręžinio sienelės forma. Atstumas tarp U-formos vamzdelių yra fiksuotas, taip užtikrinami aukšti TRT eksperimento vykdymo reikalavimai pagal ASHRAE (2011) [4] procedūras ir standartus. Temperatūrinio šilumos atsako eksperimentiniai duomenys yra matuojami ir kaupiami kas minutę ir tiesiogiai įrašomi į kompiuterio duomenų kaupimo diską viso TRT eksperimento metu. Prieš prasidedant TRT eksperimentui matuojamos skirtingos temperatūros: skysčio U-formos vamzdelyje, smėlio dėžėje ir oro laboratorijos aplinkoje. Ši temperatūra yra vadinama nepaliesta (angl. undisturbed) ir laikoma pradine eksperimento temperatūra. Eksperimentinėje laboratorijoje palaikoma pa-



2.4 Paveikslas Matavimo taškų išdėstymo schema vienoje smėlio dėžės pusėje pateikta publikacijoje [44].

stovi oro temperatūra, kuri neturi išorinės įtakos nei skysčio U-formos vamzdelyje, nei smėlio dėžėje esančių uolienu temperatūroms. Prasidėjus TRT eksperimentui, tuo pačiu metu pradeda veikti cirkuliacinis siurblys, cirkuliuojantis skystį U-formos vamzdelyje pastoviu greičiu uždarame cikle. Tuo pačiu metu įjungiami elektriniai šildymo tenai pastoviu galingumu 'paveikdami' cirkuliuojantį skystį 'beveik' pastoviai šilumos perdavimo norma. Termistoriai, skirti temperatūrai matuoti smėlio dėžėje, yra išdėstyti horizontaliai palei kolektoriaus sienelę bei tolygiais atstumais vertikaliai ir horizontaliai ašimis, smėlio dėžėje įmontuoto horizontalaus kolektoriaus atžvilgiu beveik vienodais atstumais palei gręžinio sienelę tolygiai iki smėlio dėžės krašto. Termistorių išdėstymo schema yra pateikta 2.4 paveikslėlyje. Įeinančio ir išeinančio (grįžtančio) skysčio temperatūros matavimai yra fiksuojami duomenų kaupimo sistemoje, kurie vėliau panaudoti šilumos perdavimo modeliavime. Beier [8] aprašė matavimo procedūras norint gauti uolienu ir gręžinio užpildo šilumos laidumo reikšmes, naudojo nestacionarių šilumos zon-

do metodą, sukurtą Hooper ir Lepper [40]. Šiais matavimais gauta vidutinė smėlio prisotinto vandeniui šilumos laidumo reikšmė  $2,82 \frac{W}{mK}$ , kuri natūraliai yra artima geologinei aplinkai. TRT aparatūra yra prijungta prie U-formos plastikinių vamzdelių, kurie buvo sumontuoti horizontaliame cilindre iš aliuminio. Vienu metu du elektriniai tenai veikė vidutiniu 1056 W galingumu šildydami cirkuliuojantį skystį TRT eksperimento metu. Šių kaitinimo elementų įtampa ir srovė buvo matuojama kiekvienam elementui atskirai, o elektros energijos matavimo neapibrėžtis yra apie  $\pm 1\%$ . Srovės išlygintojas buvo naudojamas eliminuoti elektros energijos perkritimus elektros linijoje. Vandens siurblys cirkuliavo U-formos vamzdelyje esantį vandenį, kurio greitis matuojamas skysčio srauto matuokliu. Skysčio greičio prietaiso matavimo neapibrėžtis yra lygi  $\pm 0,05\%$ , o temperatūrinių skysčio ir smėlio prisotinto vandeniui matavimų neapibrėžtys yra lygios  $\pm 0,03K$ . Visos paminėtos eksperimento matavimų neapibrėžčių reikšmės užtikrina kokybišką TRT duomenų analizę. Tokius pačius eksperimentinius duomenis savo disertacijoje naudojo Javed [46] TRT analizei ir šilumos perdavimo modelio validavimui. TRT aparatinė įranga TRT testo metu buvo sujungta su įeinančiu ir išeinančiu U-formos vamzdeliais. U-formos vamzdelio, gręžinio užpildo ir smėlio prisotinto vandeniui šilumos parametrai žinomi iš laboratorinių tyrimų ir pateikti 2.4 lentelėje. Aliuminio cilindre tarp U-formos vamzdelio ir sienelių

Šilumos parametrai	Reikšmės
Smėlio šilumos laidumas ( $\lambda_s$ )	2,82 W/m °C
Smėlio šilumos sklaida ( $\alpha_s$ )	1,47e-6 m <sup>2</sup> /s
Užpildo šilumos laidumas ( $\lambda_g$ )	0,73 W/m °C
Užpildo šilumos sklaida ( $\alpha_g$ )	1,9e-7 m <sup>2</sup> /s
Gręžinio šilumos varža ( $R_b$ )	0,173 mK/W
U-formos vamzdelio šilumos laidumas ( $\lambda_p$ )	0,39 W/mK

2.4 Lentelė Šilumos parametrų eksperimentinės reikšmės.

užpildoma 20% biriomis uolienomis sumaišytomis su vandeniu. Cirkuliuojantis U-formos vamzdelyje skystis yra šildomas pastovia šilumos srauto norma, tiekama fiksuota galia elektriniams tenams viso TRT metu nenutrūkstamai fiksuojant temperatūrinius, skysčio srauto ir įpumpuotos šilumos kiekio duomenis iš skirtingų termistorių vietų. Apie 52 valandas TRT testas vykdomas smėlio dėžėje jo metu sukaupti duomenys bus panaudoti uolienų šilumos parametrų nustatymui. Detaliausi eksperimento duomenys yra pateikti A priede.

## 2.2 Lietuvos šilumos atsako eksperimentinis prototipas

Šiame skyrelyje pateiksiu šilumos atsako eksperimentinio prototipo, pagaminto Lietuvoje, projekto eigą ir duomenų analizės rezultatus, neatskleisdamas konfidencialių eksperimentinio prototipo techninių detalių. Lietuvos uždara akcinė bendrovė 'Hidro Geo Consulting' (HGC-LTU) bendradarbiaudama kartu su Baltijos pažangių technologijų institutu (BPTI) 2014 metų liepos mėnesį pateikė paraišką priemonės VP2-1.3-UM-05-K 'Inočekiai LT' kvietimo Nr. 03 projekto finansavimui Lietuvos mokslo technologijų agentūrai (MITA). 2014 spalio mėnesį, praėjus trims mėnesiams po paraiškos pridavimo datos, projektui buvo patvirtintas finansavimas, kuriame buvau vienas jo dalyvių. Praktiškai vertinau eksperimentinę aparatūrą, analizavau eksperimentinius duomenis.



Išanalizavus egzistuojančias TRT aparatūras, projekto darbo grupėje buvo nuspręsta pasinaudoti Dublino universiteto (UCD) iš Airijos patirtimi, kuri 2012 metais sukonstravo mažo biudžeto TRT prietaisą, atliko testavimus su kita sertifikuota komercine TRT aparatūra, esant toms pačioms geologinėms aplinkos sąlygoms [39]. Iš esmės jų tikslas buvo sukonstruoti komerciškai patrauklesnę ir patikimą TRT aparatūrą. Šio projekto biudžetas tesiekė 4,900€, o kaina buvo beveik dešimt kartų mažesnė, tuo tarpu tokio tipo aparatus gaminančio komercinio tiekėjo pardavimo kaina yra beveik 48,400€. Taip pat šiame projekte buvo labai aktualu, kad UCD konstruodami TRT aparatūrą pateikė visus negamyklinius techninius elementus, kuriuos galima nusipirkti kaip atskirus aparatūros komponentus. Tokiu būdu įrodė, kad pirkti gamykloje sukonstruotą TRT aparatūrą ir ekspertines konsultantų paslaugas nėra būtinybės, jei turi supratimą apie matavimų neapibrėžtis ir TRT aparatūros testavimo rezultatų anomalijas. Šis sprendimas darbo grupei pasirodė labai patrauklus dėl mažo biudžeto ir paprastų techninių detalių panaudojimo TRT eksperimentinėje aparatūroje. Didžioji dalis pagamintos TRT aparatūros veikia pagal nustatytą pastovų šilumos srautą, kai įpumpuotos šilumos kiekis yra beveik konstanta, o išeinančio ir įeinančio skysčio temperatūra keičiasi, priklausomai nuo skysčio srauto greičio. Taip pat galima kita aparatūros konfigūracija, kai palaikoma pastovi cirkuliuojančio skysčio temperatūra, o elektrinis tenas išjunginėja ar išsijunginėja eksperimento metu. Taip gaunamas nepastovus įpumpuotos šilumos kiekis, kuris labiau imituoja geoterminio šilumos siurblio darbą. UCD sukonstruota TRT aparatūra yra veikianti Norfolk Didžiojoje Britanijoje kaip nurodyta 2.5 paveikslėlyje. Dabar aprašysiu sudedamąsias TRT aparatūros dalis bei



2.5 Paveikslas UCD TRT aparatūra iš publikacijos Hemingway (2012) [38].

prielaidas šiai aparatūrai kokybiškai veikti. Techniniai elementai turi būti nesunkiai pasiekiami iš visų pusių remonto ar techninio aptarnavimo metu. Aparatūra turi būti apdengta brezentiniu tentu ir šiltinimo izoliacinėmis priemonėmis, o standi jungtis yra skirta transportavimui iki TRT eksperimentinės vietos ar objekto. Visomis žemiau išvardintomis techninėmis priemonėmis buvo pasinaudota konstruojant HGC-LTU TRT eksperimentinį prototipą. U-formos vamzdyje cirkuliuojantis skystis turi būti apsaugotas nuo ištekėjimo įrengiant sklendes, o nuo užšalimo - tai izoliacinėmis medžiagomis arba užpildant propilengliukoliu. Šaltuoju metų laiku arba kai TRT aparatūra nėra eksploatuojama skysčio vamzdyje neturi būti. Skysčiui pašalinti turi būti įrengtas nutekėjimo trapas arba išsiurbimo eigos režimu dirbantis cirkuliacinis siurblys priverstinai gražinantis skystį iš U-formos vamzdelio į cirkuliacinio skysčio talpyklą. Paprastai

TRT eksperimentuose vertikalus šilumos kolektoriaus vamzdeliuose atsiranda oro burbuliukai, kai vyksta užpildymas skysčiu, kurie turi būti pastebėti ir pašalinti dar neprasidėjus TRT eksperimentui. Paprastai montuojami permatomi plastikiniai vamzdeliai abiejoms cirkuliuojančio skysčio pusėms. Praktikoje inžinieriai orui skystyje pašalinti naudoja vaakuuminius dearatorius. Iš praktinių TRT eksperimentų buvo pastebėta, kad oro burbuliukai atsiranda dėl ilgos išorinio plastikinio vamzdelio jungties ir dėl aukščių perkritimo nuo TRT aparatūros išorėje sujungus su vertikaliu šilumos kolektoriumi po žeme. Skystis gali būti tiek vanduo, tiek ir reikalingos koncentracijos antifrizo ir vandens mišinys. Eksperimentiniuose bandymuose pastebėta, kad skysčio trintis keičiasi mažinant cirkuliacinio siurblio galią, tam būtina turėti technines galimybes mažinti skysčio srauto greitį. Iš 100 litrų papildomos talpyklos yra skystis, į vertikalių šilumos kolektorių patenka atskiru vožtuvu: jei reikia užpildyti skysčiu arba padeda kontroliuoti spaudimą, keičiantis skysčio tūriui. Sumontuotas plėtimosi indas leidžia skyčiui plėstis, kai temperatūra padidėja dėl jo sušildymo. Skytis yra papildomas, jei įvyksta staigus skysčio srauto greičio perkritis. UCD keletą TRT eksperimentų atlikto tik tam, kad patikrintų skysčio siurblio darbo įtaką skysčio temperatūrai.

Gehlin (1996) [30] ir Hemmingway (2012) [38] nustatė, kad apie 1 kW skysčio siurblys turi įtakos skysčio temperatūrai. Ši įtaka turi būti eliminuota iš vidinių skysčio temperatūrinių svyravimų. Skysčio srauto slėgiui tolygiam veikimui užtikrinti reikalingas cirkuliaciniame siurblyje galingumo reguliatorius arba kartu balansuojant skysčio slėgį sumontuoto vožtuvo pagalba. Paprastai TRT aparatūroje slėgis yra apie 1,5 barų. Kai minimalus slėgis nėra pasiekiamas, tada slėgio matuoklis turi išjungti cirkuliacinį siurblių, ir atvirkščiai - įsijungia slėgio ribotuvus, jei viršijama nustatyta slėgio riba. Sumontuoti plastikiniai vamzdeliai gali būti  $\frac{3}{4}$  ir  $1\frac{1}{2}$  diametrų, kuo didesnio šilumos laidumo su mechaniškai greitai perjungiamomis jungtimis, izoliuotomis nuo išorinio temperatūros poveikio, išorinėje ir vidinėje TRT aparatūros dalyje. Kaip buvo išvardinta, plastikiniuose vamzdeliuose yra sumontuojami rankiniai vožtuvai, skysčio temperatūriniai ir srauto matuokliai, permatomos vamzdžio dalis, elektriniai tenai, hidraulinis skysčio slėgio matuoklis. Į vieną elektros skydelį sujungti elektriniai tenai, monitorius, duomenų kaupiklis, cirkuliacinis skysčio srauto siurblys, skysčio srauto greičio matuoklis, skysčio (įėjimo ir išėjimo) ir oro (vidaus ir lauko) temperatūros, hidraulinio slėgio matuokliai. Taip pat įrengta 16 Amp jungtis su išoriniu elektros šaltiniu. Elektrinis tenas yra kontroliuojamas dviejų perjungėjų, gali dirbti pilnu ir daliniu galingumu priklausomai nuo TRT eksperimento poreikių. UCD aparatūros veikimas yra stebimas monitoriuje instaliuotų daviklių pagalba. Iš grafinės ir skaitinės informacijos galima pastebėti TRT aparatūros sutrikimus. Monitorius sujungtas su personaliniu kompiuteriu pasirinktu dažnumu įrašo TRT eksperimento duomenis iš įmontuotų temperatūrinių daviklių t.y. cirkuliuojančio skysčio, atmosferos vidaus ir lauko temperatūros, skysčio srauto greičio, elektrinio teno galios ir sunaudotos energijos kiekio, jie įrašomi duomenų kaupiklyje su konkrečiu įrašo laiku ir data. Duomenys gali būti įrašyti nuo 1-120 minučių intervalo dažnumu. Skysčio slėgio monometrų matuojami duomenys taip pat įrašomi į tą patį disko kaupiklį. Sėkmingas informacijos sukaupimas ir saugojimas norimu dažnumu turi reikšmingos įtakos analizuojant TRT eksperimento duomenis. TRT eksperimentui pasibaigus, atidarius vožtuvą, skystis atbuline cirkuliacinio siurblio eiga grąžinamas į skysčio talpas. Žemiau 2.5 lentelėje pateiksime sudedamąsias technines UCD TRT aparatūros technines dalis.

Techninis elementas	Aprašymas	Pastabos
Cirkuliacinis siurblys	Grundfos Magna 2000 serija	
Vidinis elektrinis tenas	Omega FTH serija (3 ir 6 kW)	su perjungimu galingumu 3 kW, 6 kW ir 9 kW
Skysčio srauto matuoklis	Omega FV103	Ribos : 0 - 1,58 l/s, tikslumas: $\pm 2\%$
Skysčio temperatūros jutikliai	Pt100 Class A	Ribos: 200 – 350°C, tikslumas: $\pm 0.2^\circ C$
Oros temperatūros jutikliai	Pt100 Class A	Ribos: 50 – 100°C, tikslumas: $\pm 0.2^\circ C$
Duomenų apdorojimo sistema	NI cRIO-9074	
Duomenų perdavimo sistema	Dovado 3GN router	Duomenų perdavimo greitis iki 24Mbps
Vamzdelių sistema	UPVC klasė E	Maksimalus slėgis 15bar

2.5 Lentelė UCD techniniai elementai [38].

UCD [38] pateikė TRT aparatūros techninių detalių veikimo intervalus ir tikslumą (žr.2.5 lentelėje) bei projektavimo skaičiavimus ir prielaidas, kokio tikslumo minėtos techninės detalės. UCD projektuotojai sukūrė bevielę duomenų perdavimo galimybę per duomenų maršrutizatorių, kad duomenys būtų periodiškai perduodami į nutolusį serverį. Tokiu būdu eksperimento metu galima įrašinėti sukauptus duomenis iš bet kokios vietovės, o duomenų analizę galima atlikti tik prasidėjus temperatūros atsako testui. Jei nėra TRT aparatūros veikimo nesklandumų, tada duomenų analitikas gali analizuoti duomenis biure ir nevykti į eksperimento vietą. Papildomai išskirsime cirkuliacinio siurblio parinkimą ir paminėsime kelis aspektus dėl cirkuliacijos U-formos vamzdelyje vertikaliame kolektoriuje ir TRT vidinėje sistemoje. UCD projektavo taip, kad būtų galima naudoti skirtingo gylio vertikaliems kolektoriams ir skirtingų diametrų U-formos vamzdeliams. Mike Long ir Phil Hemmingway (2012) [39], [38] straipsnyje galima detaliau rasti skysčio srauto greičio priklausomybių lentelę pagal vamzdelio ilgio, diametrų pasiskirstymą, kai norime vertinti skysčio slėgio sumažėjimą. Vidiniai vandens šildytuvai UCD TRT aparatūrai buvo parinkti tokie, kurie įgalintų greitą įrengimą ir gerą šilumos perdavimą skysčiui. Pagal Amerikos šildymo, kondicionavimo ir vėdinimo ASHRAE (2009) [5] parengtas rekomendacijas TRT testai turi šilumos įpumpavimo normą nuo 50 iki 80 W/m priklausomai nuo vertikalios kolektoriaus gylio bei galimo pastato projekcinio šilumos ar šalčio poreikio. Rekomendacijas yra suformulavęs Sanner (2005) [80] tokioms pačiomis šilumos perdavimo normoms, esant skirtingoms uolienu šilumos savybėms. Aparatūroje buvo įmontuoti du nuosekliai sujungti elektriniai tenai, 3 kW ir 6 kW galingumo, kurie gali dirbti skirtingais 3 kW, 6 kW ir 9 kW galingumo režimais. Su tokiu galingumu UCD TRT aparatūra gali vykdyti šilumos kiekio įpumpavimą nuo 37,5 iki 300 m gylio vertikaliems šilumos kolektoriams. Long ir Hemmingway daugiau ir smulkesnių techninių detalių nepateikia, bet pateikia TRT duomenų analizės rezultatus apie aparatūros veikimo tikslumą, atlieka palyginimus su gamykline TRT aparatūra, tokiomis pačiomis geologinėmis sąlygomis [39]. Laikydamasis konfidencialumo, neatskleisiu lietuviško TRT eksperimentinio prototipo techninių detalių ir vidinių schemų, pateiksiu tik TRT eksperimentų modeliavimo rezultatus bei aparatūros taikymo galimybes. Sukurtas ir veikiantis eksperimen-

to vietoje HGC-LTU TRT prototipas pateiktas 2.6 paveikslėlyje. Detaliai išanalizavus Airijos



2.6 Paveikslas HGC-LTU TRT eksperimentinis prototipas iš publikacijos [70] (nuotr. Ž.Palaičio)

patirtį ir pateiktas rekomendacijas buvo apsispręsta dėl bendrų reikalavimų HGC-LTU TRT eksperimentinei aparatūrai:

- lengvai transportuojamas lengvuoju automobiliu, pasiekiamos ir keičiamos TRT aparatūros dalys, bendras svoris iki 60 kilogramų;
- patikimas TRT aparatūros karkasas apsaugotas nuo išorinių temperatūrinių pokyčių, izoliuojant aparatūros korpusą ir vamzdelius kelių centimetrų specialiomis šilumai nelaidžiomis medžiagomis;
- galimybė matuoti temperatūrą įeinančio ir išeinančio cirkuliuojančio skysčio U-formos vamzdyje bei TRT aparatūros viduje ir lauko sąlygomis, kas leistų nustatyti temperatūrų išorinį poveikį;
- temperatūriniai duomenys įrašomi ne mažesniu nei 1 minutės intervalu;
- buvo pasirinktas cirkuliuojančio skysčio apskaitos skaitiklis, kuris rodo bendrą cirkuliuojančio skysčio kiekį viso eksperimento metu;
- sumontuoti trys po 3 kW galingumo elektriniai tenai, kurie būtų sujungti lygiagrečiai su vandens šildytuvais;
- skysčio slėgio monometras ir vožtuvai, deaerorius turi padėti valdyti skysčio slėgio ir srauto pokyčius bei subalansuoti skysčio cirkuliacijos greitį;
- skysčio cirkuliacinis siurblys būtų reguliuojamos galios bei patikimai veikiantis.

Žemiau yra aptariami bendri izoliavimo, vamzdžių bei jų jungčių parinkimo, sklendžių ir vožtuvų bei sujungimo elementų su vertikaliu kolektoriumi ir termostato parinkimo aspektai. Pirmiausia buvo pagamintas aparatūrai įmontuoti metalinis korpusas, kurio išmatavimai yra 100 centimetrų ilgi, 60 centimetrų pločio ir 80 centimetrų aukščio. TRT aparatūros dalys yra

pasiekiamos iš įvairių pusių, fizinis karkasas padengtas 4 centimetrų storio akmens vata. Skystis cirkuliuoja paprastuose plastikiniuose vandentiekio vamzdžiuose, kurių išorinis diametras 4 centimetrai. Vamzdeliuose yra įmontuotas kasetinis filtras, tam atvejui jei pasitaikytų skystyje mechaninių dalelių, kurios nesudėtingai būtų pašalinamos. Skysčio temperatūros apribojimui bus naudojamas termostatas, kuris montuojamas į žalvarinį 'pirštą'. Skysčio slėgiui reguliuoti yra naudojama rutulinė sklendė, o vertikaliai U-formos vamzdeliui užpildyti naudojamas paprastas vanduo, kuris pateka per skysčio talpą, reguliuojant pripildymo ir išleidimo sklendėmis. Visi elektriniai prietaisai sujungti į 16 Amp elektros skydelį jungtimi su išoriniu elektros šaltiniu. Visi TRT aparatūros vamzdeliai izoliuoti 2 cm storio šiluminio medžiaga. Vieno TRT testo metu pastebėta, kad labai greitai pradėjo didėti cirkuliuojančio skysčio temperatūra. Išsiaiškinus pastebėta, kad skystis cirkuliuo tik vidiniu TRT aparato žiedu, t.y. skystis necirkuliuo vertikaliu šilumos kolektoriu. Toks incidentas galėjo turėti neigiamą poveikį eksperimentinei įrangai ar atskiroms jos detalėms. Atliekant hidraulinius bandymus iki 3 barų slėgio, kai įprastai sistema dirba 1,5 barų režimu buvo apsieita be nuostolių, teko keisti jungtis. Tokie eksperimentai yra būtini prieš pradėdant TRT tyrimą. *In-situ* TRT testas buvo vykdomas tokia tvarka:

- TRT eksperimentinis prototipas prijungiamas prie tiriamojo VSK;
- VSK užpildomas skysčiu ir sistemoje sukeliama 1 - 2 atmosferų slėgis;
- atliekamas U-formos vamzdelio oro pašalinimas iš skysčio;
- pradama priverstinė skysčio cirkuliacija VSK fiksuotu srauto greičiu, suderinant cirkuliacinio slėgio parametrus ir temperatūrą;
- nustatoma pastovi ir nepaveikta aplink VSK uolienu temperatūra *in-situ* aplinkos geologinėmis sąlygomis;
- įvertinama cirkuliacinio siurblio įtaka skysčio temperatūrai;
- įjungiami elektriniai kaitinimo elementai su apsauga nuo perkaitimo;
- užtikrinamas kokybiškas skysčio cirkuliacijos greičio, temperatūros, įtampos ir srovės išlygintojo sklandus veikimas ir nenutrūkstamas duomenų kaupimas *in-situ* TRT tyrimo metu;
- nustatomos vidutinės energijos sąnaudos ir cirkuliuojančio skysčio greitis, apskaičiuojama įpumpuotos šilumos srauto normos vidutinė vertė, kuri gaunama sunaudotos energijos kiekį padalinus iš VSK ilgio;
- praėjus ne mažiau 50 iki 80 valandų nuo TRT tyrimo pradžios eksperimentas yra sustabdomas, atjungiamas matavimo įranga.

Praktiniai TRT eksperimento duomenų analizės rezultatai pateikti 2.6 lentelėje. Begalinio tiesinio (ILS) ir cilindrinio (ICS) begalinio šilumos šaltinio metodų aproksimacijos buvo panaudotos vertinant efektyvius uolienu šilumos laidumo ir gręžinio šiluminės varžos parametrus. Minėtiems  $\lambda_s$  ir  $R_b$  parametrų paieškai buvo taikomas standartinis mažiausių kvadratų metodas (MKM) ir skirtingi evoliuciniai paieškos algoritmai t.y. genetinis (GE), diferencialinės evoliucijos (DE),

dalelių spiečiaus (PSO) minėtiems šilumos parametrų rasti. Vidutinės kvadratinės paklaidos reikšmės buvo suskaičiuotos skirtingoms ILS ir ICS aproksimacijoms. Algoritmai realizuoti Matlab 2012b automatiškai apdoroja TRT eksperimento duomenis, nežinomų šilumos parametrų paieškai taiko minėtus evoliucinius paieškos metodus, kai šilumos perdavimas vyksta analitiniais ILS ir ICS metodais. 2.6 ir 2.7 lentelėse pateiktos HGC-LTU TRT eksperimento charakteristikos ir skirtingais algoritmais įvertinti nežinomi šilumos parametrai. Skaitiniuose eksperimentuose buvo panaudoti TRT tyrimo duomenys tik atmetus kelias pirmąsias valandas. Galima teigti, kad

Charakteristika	Žymėjimas	Vertė
Šilumos kiekis (W )	$Q$	5316
VSK gylis(m)	$H$	120
Pradinė uolienuų temperatūra ( $^{\circ}C$ )	$T_0$	8,1
Cirkuliacinio siurblio galingumas (kW/h)	$Q_p$	0,061
Maksimali skysčio temperatūra ( $^{\circ}C$ )	$T_{max}$	19,6 - 20,5
U-formos vamzdelio diametras, storis (mm)	$D_p$	40, 2, 3
Cirkuliuojančio skystis	Skystis	Vanduo

2.6 Lentelė HGC-LTU TRT eksperimento charakteristikos

šio projekto metu buvo sėkmingai sukonstruotas ir išbandytas TRT eksperimentinis prototipas. Atlikti bandomieji šilumos atsako tyrimai, sukauptų *in-situ* TRT duomenų pagrindu nustatyti apibendrintos geologinės storumės efektyvieji šilumos parametrai, taikant šilumos perdavimo analitinius metodus. O apibendrintos geologinės aplinkos šiluminiais parametrams rasti pritaikyti evoliuciniai paieškos algoritmai kartu su standartiniu mažiausių kvadratų metodu. Projekto pabaigoje sukurtas visiškai veikiantis eksperimentinis TRT aparato prototipas pradedamas eksploatuoti Lietuvos rinkoje, teikiant TRT paslaugas. Esamas TRT eksperimentinis aparatas yra tinkamas naudoti, kai uždaro cirkuliacijos ciklo sistema yra užpildyta ne vien tik vandeniu, bet kartu ir su kitais skysčiais (įvairios koncentracijos vandens ir propilenglikolio, vandens ir spirito, ar kitais sūrymais). HGC-TRT eksperimentiniame prototipe rekomenduojama tobulinti:

Šilumos perdavimo metodas	Parametrų vertinimo būdas	$\lambda_s$	$R_b$
ILS	MKM	2,165	0,165
ILS	GA	2,194	0,156
ILS	DE	2,009	0,167
ILS	PSO	2,073	0,150
ICS	MKM	2,142	0,156
ICS	GA	2,158	0,151
ICS	DE	2,124	0,163
ICS	PSO	2,174	0,159

2.7 Lentelė Nustatyti efektyvieji šilumos laidumo  $\lambda_s$  ir vertikalaus kolektoriaus varžos  $R_b$  parametrai

- cirkuliacinis skysčio siurblys turi veikti abiem kryptimis (įpumpavimo ir išpumpavimo režimais), papildomai sumontavus dujų separatorių supaprastėtų nepageidaujamo oro pašalinimas iš tiriamojo VSK;
- TRT tyrimo pradžioje svarbu nustatyti cirkuliacinio siurblio darbo režimo įtaką skysčio

temperatūros kitimui;

- įrenginyje turi būti įrengtos apsaugos priemonės, atjungiančios įrenginį nuo elektros tinklo, esant nepageidaujamai aukštai cirkuliacinio skysčio temperatūrai ar kritiškam slėgiui;
- cirkuliacijos srauto greičio neapibrėžtumams mažinti rekomenduojama papildomai įdiegti skysčio srauto balansavimo ventilių;
- išplėsti TRT duomenų nuskaitymo galimybes, nuskaitytant per 4G tinklą duomenis, kurie gali būti analizuojami 'online' režime.

Dabar HGC-TRT eksperimentinis aparatas yra gerokai atnaujintas ir patobulintas, sėkmingai yra eksploatuojamas Lietuvoje, atliekant būtinus TRT tyrimus, kaupiant žinias ir patirtį turint tikslą plėtoti sekliosios geotermijos potencialą Lietuvoje.

## 2.3 Diskusija

Laikotarpiu nuo 2012 iki 2018 metų sudėtingiems tyrimams vykdyti Lietuvos įmonės dažnai samdosi geologijos specialistus iš užsienio. Praktiškai TRT paslauga kainuoja nuo 4000 iki 7000 eurų, o paskirstytas šilumos atsako testas kainuoja 3 - 4 kartus brangiau, kai norima fiksuoti temperatūros atsaką iš skirtingų geologinių sluoksnių. Verslo įmonės, kurios vykdo tokius užsakymus, nesidalina TRT duomenų rezultatais, eksperimento techninėmis ar matavimo neapibrėžtimis. Vykdydamas MITA projektą susipažinau su geologais mokslininkais dr. Mike Long iš UCD universiteto Airijoje. Užmezgiau kontaktus su kompanijos 'GeoServ Solution' lyderiu Riccardo Pasquali, kuris sutiko atvykti į Lietuvą ir atlikti kelis aukštos kokybės TRT eksperimentus, jei pavyktų gauti verslo objektų užsakymus. Deja, šis bendradarbiavimas nuo 2015 metų iki 2016 metų pradžios buvo nesėkmingas, nes 'GeoServ Solution' kompanijos pasiūlymai Lietuvos verslo įmonėms buvo komerciškai nepatrauklūs.

Nesant kitų patikimų, kokybiškų ir prieinamų tyrimų rezultatų buvo pasirinktas Visorių apylinkės objektas su gerai ištirtomis kvartero nuogulų sąlygos, detalio stratigrafine ir hidrogeologine charakteristikomis, ir kita prieinama informacija, kuria buvo galima naudoti mokslinių tyrimų tikslais. Dr. Saqib Javed pateikė laboratorijos sąlygomis vykdyto TRT eksperimento duomenis, kurie įgalina mokslininkams ar tyrėjams taikyti ir validuoti įvairius matematinius modeliavimo metodus vertikaliems šilumos kolektoriams. Įprastai tokie TRT duomenys susiję su kelių tipų uždavinių sprendimu: uolienu šilumos parametrų nustatymo, šilumos modelio validavimo, bei šilumos atsako testo metodikos tobulinimu, naujų sprendinių suradimu. Tyrėjai norėdami įsitikinti taikomo metodo praktiniu tinkamumu privalo naudotis tokio tipo TRT duomenimis, skaitiškai eksperimentuodami ir įgydami būtiną patirtį.

HGC-LTU TRT eksperimentinis prototipas, jo modelis ir koncepcija parengta, įvertinus mokslinėse publikacijose pateikta patirtimi ir žiniomis, ypač remiantis UCD ir Švedijos mokslininkų patirtimis. Gauti TRT eksperimentiniai duomenys buvo panaudoti šilumos parametrų skaičiavimuose, buvo pritaikyti evoliuciniai algoritmai: diferencialinės evoliucijos (DE), genetinis (GA) ir dalelių spiečiaus optimizavimo (PSO) algoritmai, o vertikaliame kolektoriuje šilumos perdavimas

modeliuojamas analitinėmis 'g-funkcijomis'. Pateiktos išvados ir rekomendacijos sukurtam TRT eksperimentiniam prototipui tobulinti, su tikslu sukaupti kokybiškus ir patikimus *in-situ* TRT tyrimo duomenis, kurie įprastai naudojami geologinės stovymės efektyviems uolienų šilumos laidumo ir gręžinio varžos parametrų reikšmėms nustatyti. 2.6 paveikslėlyje pateiktas HGC-LTU TRT eksperimentinis prototipas, kuris lanksčia jungtimi yra prijungtas prie vertikalaus šilumos kolektoriaus. Šia aparatūra buvo atlikti keli TRT testai, gauti eksperimento duomenys, o jų pagrindu buvo atlikti keli skirtingi skaičiavimai, bei pateikti rezultatai. Minėto projekto metu kilo idėja plačiau taikyti evoliucinius algoritmus uolienų šilumos laidumo parametrų vertinti.



## skyrius 3

# Praktinė TRT duomenų analizė ir šilumos parametrų vertinimas evoliuciniais algoritmais

Yra žinoma, kad skaitiniai metodai yra tikslesni nei analitiniai, kai projektuojamas ir modeliuojamas šilumos perdavimas vertikaliais šilumos kolektoriais. Taip pat svarbu pabrėžti, kad geologinė aplinka kartu su požeminio vandens filtracija turi reikšmingos įtakos vertinant vertikalių kolektorių veikimo efektyvumą. Nepaisant privalumų skaitiniai metodai yra kokybiškesni tikslumo prasme, o analitiniai metodai vis dar išlieka populiarūs *in-situ* TRT duomenų analizėje. Dažnai skaitinio ir analitinio šilumos perdavimo sprendinio kombinacija yra realizuojama programinėse įrangose, skirtose projektuoti ir optimizuoti vertikalių šilumos kolektorių sistemas. Minėtos programinės [14] įrangos yra itin mėgstamos geologų inžinierių EED [27], GLHEPRO [84], TRNSYS [35], [53], EnergyPlus [20] ir temperatūros atsako funkcijos ('g-funkcijos') buvo aptartos 1 skyriuje. Verta paminėti, kad vėliau buvo išskirti laiko periodai skirstant į trumpus autorių Yavuzturk, Zeng, Lamarche [88], [90], [55], [56], vidutinės ir ilgos trukmės [45], [21], [27]. Praktikoje TRT eksperimento laiko žingsnis skirstomas taip: trumpi laiko momentai, kur  $t < t_b$ ; vidutiniai laiko momentai intervale  $t_b \leq t \leq t_s$ ; ilgiems laiko momentams  $t > t_s$ , kur  $t_b = \frac{5r_b^2}{\alpha}$  ir  $t_s = \frac{H^2}{9\alpha_s}$ . Baigtinio ilgio tiesinio šaltinio modeliai (FLS) [57],[58], [90], [47] yra dažniau taikytini ir efektyvūs modeliuojant šilumos perdavimą geologinėje aplinkoje. Analitinius, pakankamai aukšto tikslumo ir skaičiavimo greičio prasme šilumos perdavimo modelius sukūrė Li [58], Claesson ir Javed [47], kur modeliavimas gali būti vykdomas nuo keleto minučių iki keliolikos metų. Bandos [6] publikacijoje 2 lentelėje apibrėžė ir nustatė 'g-funkcijų' išraiškas, vertikalaus kolektoriaus vidutinę vertę, kai  $z = \frac{H}{2}$  ir vidutinės reikšmės palei  $z$  ašį, vidutinio ir ilgo laiko trukmės intervalams. Praktinė prasme TRT duomenų panaudojimas bei susiejimas su evoliuciniais algoritmais nėra plačiai taikomas. Buvo rastos tik kelios publikacijos [73], [72], [92], [91], susijusios su evoliucinių algoritmų taikymu šilumos laidumo parametrų vertinti paraleliai.

### 3.1 Šilumos parametrų vertinimo metodika evoliuciniais algoritmais *in-situ* TRT duomenų pagrindu

Šilumos perdavimo modelis pasiūlytas Li (2014) [58], naudojant ilgo laikotarpio intervalą, esant pastoviam šilumos srautui

$$T_f(t) - T_0 = q \cdot G_{ILS} + q \cdot R_b, \quad 0 \leq t \leq (10 \sim 20)t_b, \quad (3.1)$$

kur Hellström (1991) [36]

$$R_p = \frac{1}{4\pi\lambda_p} \left( \ln \frac{r_{out}}{r_{in}} + \frac{\lambda_p}{h_f r_{in}} \right), \quad (3.2)$$

$$R_b = \frac{1}{4\pi\lambda_g} \left[ \ln \frac{r_{bin}}{r_{in}} + \ln \frac{r_{bin}}{L_s} + \sigma \ln \frac{s}{s-1} \right] + R_p, \quad (3.3)$$

čia  $s = \left(\frac{2r_{bin}}{L_s}\right)^4$ ,  $\lambda_p$  yra U-formos plastikinio vamzdelio šilumos laidumas;  $h_f$  yra skysčio vamzdelyje konvekcijos šilumos perdavimo koeficientas;  $q$  vidutinė šilumos norma VSK ilgio vienetui;  $r_{out}$  ir  $r_{in}$  U-formos plastikinio vamzdelio išorinis ir vidinis spindulys;  $r_{bin}$  vidinis gręžinio spindulys;  $L_s$  yra atstumo pusė tarp U-formos vamzdelių centrų; bedimensinius kintamuosius žymėsime  $\sigma = \frac{\lambda_g - \lambda_s}{\lambda_g + \lambda_s}$ . Šio praktinio tyrimo tikslas pritaikyti 3.1 formulės išraišką modeliuojant šilumos perdavimą vertikaliame kolektoriuje bei tuo pačiu metu vertinant uolienu šilumos parametrus, turint patikimus TRT duomenis. G-funkcijų išraiškos apibrėžiamos žemiau skyreliuose 3.1.1, 3.1.2 ir 3.1.3.

#### 3.1.1 Begalinio ilgio tiesinis šaltinio modelis (ILS)

Carslaw ir Jager [14] 1947 metais pateikė analitinį begalinio ilgio tiesinio šilumos šaltinio (angl. infinite line source) modelį vidutinės temperatūros vertinimui vertikalaus kolektoriaus gręžinio sienelei. Ypatingai plačiai taikoma lygtis 3.4 uolienu šilumos parametrų vertinimui *in-situ* TRT metu. Temperatūrinio atsako funkcija  $G_{ILS}(t)$ , esant pastoviai šilumos normai buvo gauta, kai  $r = r_b$ :

$$G_{ILS}(t) = \frac{1}{4\pi\lambda_s} \int_{\frac{r_b^2}{4\alpha_s t}}^{\infty} \frac{\exp^{-u}}{u} du, \quad (3.4)$$

kur  $\alpha_s$  uolienu šilumos difuzijos koeficientas,  $\lambda_s$  uolienu šilumos laidumo koeficientas,  $t$  laikas,  $u$  integravimo kintamasis.  $G_{ILS}(t)$  lygtyje 3.4 nėra įtrauktas šilumos perdavimo modeliavime, temperatūrinių pokyčių įtaka žemės paviršiuje, esant ilgam laikotarpiui.

#### 3.1.2 Baigtinio ilgio tiesinio šaltinio modelis (FLS)

Claesson ir Javed [47] pateikė vidutinės temperatūros  $r$  atstumu sekančią FLS (angl. finite line source) modelio formuluotę, išplečiant nuo  $z = D$  iki  $z = D + H$ .  $D$  atstumas naudojamas praktikoje dėl viršutinio uolienu sluoksnio sąveikos su žemės paviršiaus temperatūra. Jei žemės paviršiaus  $z = 0$  temperatūra yra lygi  $T = 0$ . Tada g-funkcija atstumu  $r = r_b$  t.y. 'ant'

vertikalaus gręžinio sienelės laiko momentu  $t$  turi tokią išraišką

$$G_{FLS}(t) = \frac{1}{4\pi\lambda_s} \int_{\sqrt{4\alpha_s t}}^{\infty} \frac{e^{-(r_b s)^2} I(h, d)}{H s^2} ds, \quad (3.5)$$

$$I(h, d) = 2 \cdot ierf(h) + 2 \cdot ierf(h + 2d) - ierf(2h + 2d) - ierf(2d),$$

$$ierf(X) = X \cdot erf(X) - \frac{1}{\sqrt{\pi}}(1 - e^{-(X)^2}), \quad h = H \cdot s, \quad d = D \cdot s,$$

kur  $erf(X)$  žymėsime eksponentinio integralo funkciją ir  $G_{FLS}(t)$  yra uolienu temperatūros vidurkis atstumu  $r = r_b$  nuo vertikalaus gręžinio centro. Tranzityvus šilumos perdavimo procesas tarp uolienu ir vertikalaus gręžinio užpildo nėra įtrauktas 3.5 ir 3.4 formulėse t.y. šilumos perdavimo modeliavimo procese.

### 3.1.3 Begalinio ilgio cilindrinio šaltinio modelis (ICS)

Begalinio ilgio cilindrinio šilumos modelis (angl. infinite cylinder source) kai su pastovia šilumos srauto norma aproksimuojant U-formos plastikinį vamzdelį į 'ekvivalentaus dydžio' cilindro formos vamzdelį. O minėtas baigtinio ilgio tiesinio šilumos šaltinio modelis yra supaprastinta ICS modelio versija. Ingersoll (1954) [45] pateikė šias uolienu temperatūros atsako funkcijų išraiškas:

$$G_{ICS}(z, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} f(\beta) d\beta, \quad f(\beta) = (e^{-\beta^2 z} - 1) \cdot \frac{[J_0(p\beta) Y_1(\beta) - Y_0(p\beta) J_1(\beta)]}{\beta^2 [J_1^2(\beta) - Y_1^2(\beta)]}, \quad (3.6)$$

kur  $J_0, Y_0, J_1, Y_1$  yra pirmos ir antros eilės Bazelio funkcijos ir  $z = \frac{\alpha_s t}{r_b^2}$ ,  $p = \frac{r}{r_b}$  yra 'g-funkcijos' parametrai. Daugiau kitokių temperatūrinio atsako funkcijų 'g-funkcijų' pateikta [15], [49], kurios taikomos projektuojant vertikalių kolektorių sistemas. Cirkuliuojančio skysčio temperatūra yra skaičiuojama pagal žemiau pateiktą formulę:

$$T_f(t) = T_0 + q \cdot G(t) + q \cdot R_b, \quad (3.7)$$

kur  $G(t)$  gali būti bent viena iš aukščiau paminėtų 'g-funkcijų' formulių  $G_{ILS}$  (3.4),  $G_{FLS}$  (3.5),  $G_{ICS}$  3.6.

## 3.2 Dalelių spiečiaus optimizavimo evoliucinis algoritmas

Stochastinės paieškos metodas dalelių spiečiaus optimizavimo (PSO, angl. Particle Swarm Optimization) algoritmas pasiūlytas 1995 metais Eberhart ir Kennedy darbuose [52]. PSO priklauso spiečiaus sumanumo algoritmų grupei ir yra skirtas vieno kriterijaus funkcijų globaliajam optimizavimui. Algoritmas yra pagrįstas socialiniu individų elgesiu: spiečius (aibė) dalelių (galiųjų sprendinių) keičia savo pozicijas uždavinio leistinojoje srityje, atsižvelgiant į geriausią žinomą atskiros dalelės asmeninę poziciją ir geriausią rastą viso dalelių spiečiaus poziciją. Tarkime, kad turime  $N$  dalelių pradinį spiečių

$$S^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}). \quad (3.8)$$

Spiečiaus dalelių pozicijos gali būti parenkamos atsitiktinai leistinojoje srityje arba sistemingai, remiantis ankstesnių uždavinio sprendimų rezultatais ar kita informacija. Kiekvienai spiečiaus dalelei

$$x_i^{(0)} = (x_{i1}^{(0)}, x_{i2}^{(0)}, \dots, x_{id}^{(0)}) \quad (3.9)$$

yra žinomas jos judėjimo greitis

$$v_i^{(0)} = (v_{i1}^{(0)}, v_{i2}^{(0)}, \dots, v_{id}^{(0)}) \quad (3.10)$$

geriausia dalelės asmeninė pozicija  $X_{Pbest_i}^k$  ir geriausia visų dalelių spiečiaus pozicija  $X_{Gbest_i}^k$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ).  $k$ -toji spiečiaus būseną  $S(k)$  sudaroma keičiant dalelių pozicijas  $k - 1$ -joje spiečiaus būsenoje  $S(k - 1)$

$$v_i^{(k)} = \omega v_i^{(k-1)} + \phi_P cr_1 (X_{Pbest_i}^k - x_i^{(k-1)}) + \phi_G cr_2 (X_{Gbest_i}^k - x_i^{(k-1)}); \quad (3.11)$$

$$x_i^{(k)} = x_i^{(k-1)} + v_i^{(k)}, \text{ kai } \forall i = 1, \dots, N, \quad (3.12)$$

čia  $\omega = \omega_{max} - \frac{iter * (\omega_{max} - \omega_{min})}{max(iter)}$  – inercijos momentas,  $\omega_{max}$  and  $\omega_{min}$  inercijos maksimali ir minimali reikšmės, atitinkamai.  $cr_1$  ir  $cr_2$  – atsitiktiniai skaičiai iš intervalo  $[0; 1]$ . Bansal [7] pristatė PSO inercijos momento pasirinkimo technikas, kur viena iš efektyviausių bus naudojama šioje disertacijoje. Konstantos  $\phi_P$  ir  $\phi_G$  yra atitinkamai dalelės (angl. Self-Confidence) ir spiečiaus (angl. Swarm-Confidence) koeficientai. Didesnė  $cr_1$  reikšmė reiškia geresnę asmeninę poziciją, o didesnė  $cr_2$  reikšmė – didesnę pasiklovimą pagal nustatytą visų dalelių spiečiaus geriausią poziciją. Literatūroje siūloma naudoti  $cr_1 = cr_2 = 2$ , kad sandaugų  $cr_1$  ir  $cr_2$  vidurkiai būtų lygūs 1. Kai nauja dalelių spiečiaus būseną  $S(k)$  sudaryta, apskaičiuojamos visų dalelių tikslo funkcijos reikšmės ir atnaujinama informacija apie geriausias asmenines pozicijas ir geriausią visų dalelių spiečiaus poziciją. Analogiškai keičiant dalelių spiečiaus pozicijas  $S(k)$  sudaroma kita dalelių spiečiaus būseną  $S(k + 1)$ . Taip gaunamas iteracinis procesas, kuris tęsiamas kol bus patenkintas pabaigos kriterijus. Svarbu pabrėžti kelis galimus skirtingus iteracijų stabdymo kriterijus:

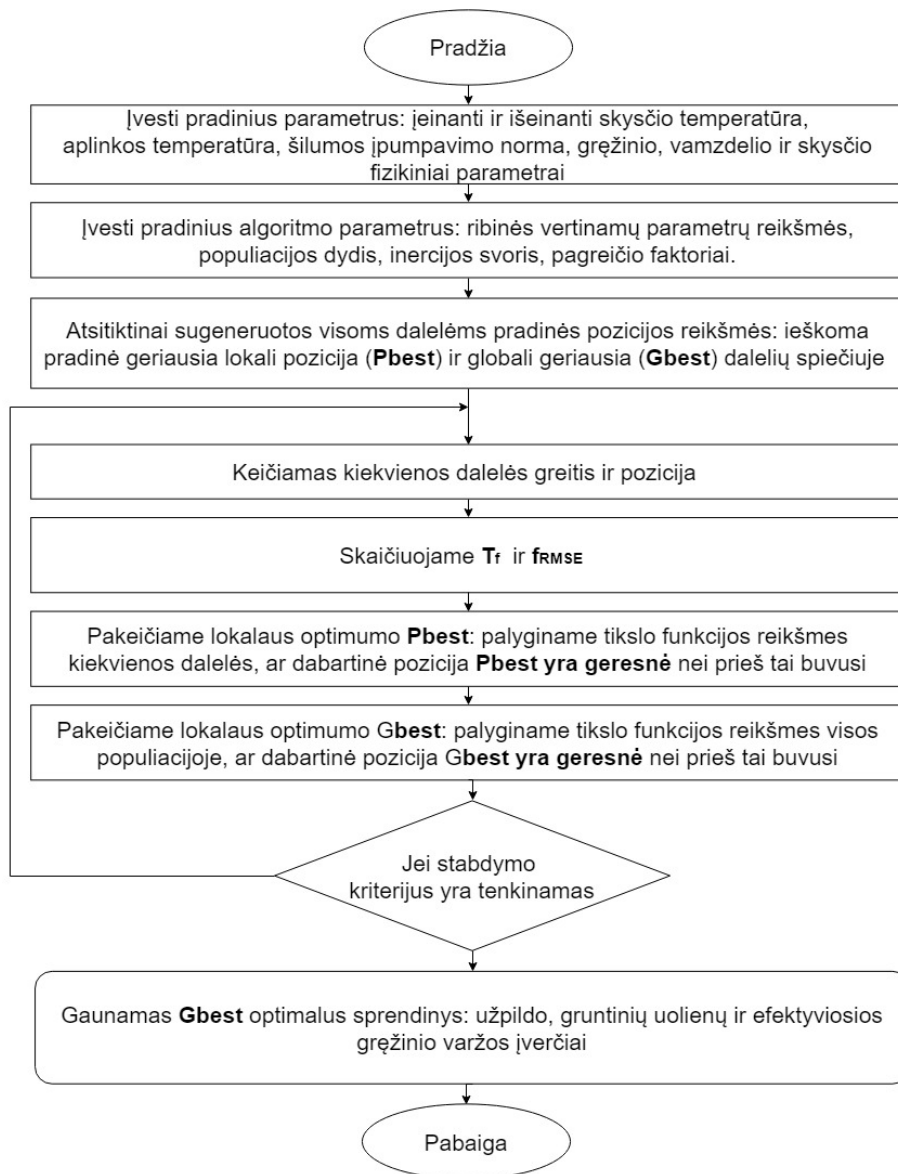
- įvykdytas numatytas tikslo funkcijų skaičiavimų arba iteracijų skaičius;
- pasiektas numatytas skaičiavimams skirtas laikas;
- pakankamai maži tikslo funkcijos ar kintamųjų reikšmių pokyčiai;
- ir pan.

Dalelių spiečiaus judėjimo greičių vektorių reikšmės yra ribojamos apatiniais ir viršutiniais rėžiais: atitinkamai  $v^{LB} = (v_1^{LB}, v_2^{LB}, \dots, v_d^{LB})$  ir  $v^{UB} = (v_1^{UB}, v_2^{UB}, \dots, v_d^{UB})$ . Paprastai viršutiniai dalelių judėjimo greičio rėžiai parenkami  $v^{max} = \mu(x^{UB} - x^{LB})$ , čia  $x^{LB}$  ir  $x^{UB}$  – kintamųjų reikšmių apatiniai ir viršutiniai rėžiai,  $\mu \in (0, 1]$ . Dažnai naudojama  $\mu = 0,5$ . Prieš tai buvusi geriausia dalelės pozicija apibrėžiama  $X_{Pbest,i}$  turinti geriausią tikslo funkcijos reikšmę, o globali geriausia pozicija apibrėžiama  $X_{Gbest} = (x_{gbest,1}, x_{gbest,2}, \dots, x_{gbest,N})$  visoms dalelėms spiečiuje, čia apibrėšime  $Gbest = \min f(X_{Pbest,i})$ , o tikslo funkciją  $f$  apibrėšime vidutine kvadratine

paklaida (RMSE) žemiau 3.13formule

$$f_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (T_{f,k}^{actual} - T_{f,k}^{estimated})^2}, \quad (3.13)$$

čia  $T_{f,k}^{actual}$  yra vidutinė cirkuliuojančio skysčio temperatūra iš TRT eksperimentinių duomenų,  $T_{f,k}^{predicted}$  yra įvertinta skysčio temperatūra naudojant skirtingas g-funkcijas šilumos perdavimo procese, o  $N$  - TRT duomenų stebėjimų skaičius. Yra žinoma, kad PSO algoritmas balansuoja tarp globalaus ir lokalaus minimumo, tinkamai parinkdamas inercijos svorius. Clerc's [19] pasiūlė, kaip naudojantis PSO algoritmu nustatyti šilumos perdavimo koeficientus. Trumpa PSO algoritmo pritaikymo schema yra pateikta 3.1 paveikslėlyje.



3.1 Paveikslas PSO algoritmo praktinis taikymas vertinant šilumos parametrus Indriulionis (2019)[44].

Šis praktinis šilumos laidumo parametrų vertinimo eksperimentas yra aprašytas 2 skyriuje ir publikacijoje [44], kur naudojami smėlio dėžės laboratorijos duomenys. Visi techniniai ir šilumos

parametrai yra pateikti bei detaliai pakomentuoti 2 skyriuje.

### 3.3 Rezultatai

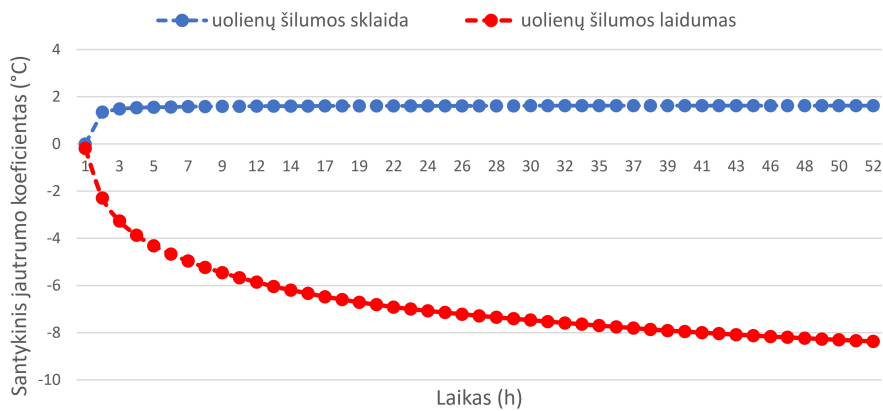
TRT eksperimentinių duomenų pagrindu pritaikytas standartinis PSO algoritmas, o vidutinė kvadratinė paklaida yra tikslo funkcija, kuri aprašyta 3.13 lygtyje bei turi būti uždavinio sprendime minimizuojama. Nežinomų uolienu ir užpildo šilumos laidumo parametrų paieška atliekama dvidimensinėje erdvėje. Skirtingos temperatūrinės atsako funkcijos  $G_{ILS}(t)$ ,  $G_{ICS}(t)$ ,  $G_{FLS}(t)$  buvo naudojamos šilumos perdavimui modeliuoti. Kartu su tikslo funkcija RMSE visos funkcijos buvo realizuotos Matlab 2016a programinėmis priemonėmis. Skaitinėje PSO algoritmo simuliacijoje buvo naudojami šie parametrai: dalelių skaičius  $N = 100$ , inercijos svoris  $\omega \in (0, 2; 1, 2)$ ,  $\phi_P$ ,  $\phi_G = 2$  yra individualios dalelės ir dalelių spiečiaus geriausi svoriai. Maksimalus kartų skaičius ir simuliacijų skaičius buvo prilygintas 20. Šilumos perdavimo simuliacijoje buvo pasirinktos konstantos - tai vidutinė aplinkos temperatūra ir šilumos srauto norma ilgio vienetui. Uolienu ir užpildo šilumos laidumo parametrų reikšmės dvidimensinėje paieškos erdvėje kinta  $[0; 5]$ .

Iš anksto prieš pradedant simuliacijai, PSO algoritmo parametrus buvo atlikti nepriklausomi eksperimentai, kurie leido nusakyti minėtų parametrų kitimo režius. Pirmiausia, buvo pritaikyta Bansal (2011) [7] inercijos svorio formulė, kuri turi efektyvų tiesinį nepriklausomumą. Antra, praktinių bandymų ir klaidų metodu buvo parinkti dalelės ir spiečiaus svoriai, kurie sąlygojo patikimus rezultatus [44]. Taip pat buvo įvykdyta šilumos parametrų tiesinio nepriklausomumo analizė, U-formos atstumo tarp vamzdelių centrų pusės vertės įtaka efektyviai gręžinio šilumos varžai, suskaičiuotos santykinės paklaidos ieškomiems parametrus, esant skirtingoms TRT trukmėms ir pradžios laiko momentams. Prieš pradedant parametrų paiešką bei vertinimą turi būti įvykdyta ir išanalizuota ieškomų šilumos parametrų tiesinė nepriklausomumo analizė. Pirmoji skysčio temperatūros išvestinė ieškomo šiluminio parametro atžvilgiu buvo apibrėžta, turint tikslą gauti santykinus jautrumo parametrus (RSC), kurie yra pateikti formulėje 3.14

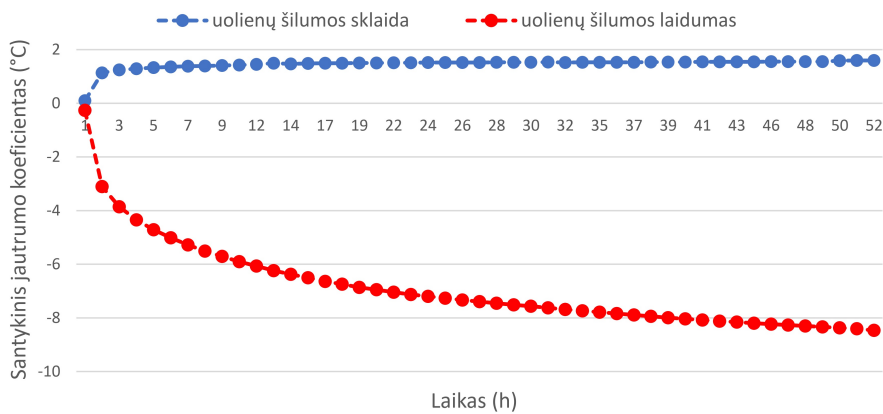
$$RSC_i = \frac{\partial T_f(p)}{\partial p} p, \quad p = [\alpha_s, \lambda_s, \lambda_g] \quad (3.14)$$

Matlab 2016a simbolinis paketas buvo panaudotas santykiniam jautrumo koeficientams skaičiuoti. Tiesinio nepriklausomumo analizės prielaidos yra patenkinamos. Pirma, vienu šilumos parametrų santykinų jautrumo dydžių (RSC) negalima išreikšti per kitas šilumos parametrų tiesines kombinacijas. Antra, jei RSC reikšmės yra santykinai mažos, tai gali sąlygoti, kad  $\det|RSC^T RSC| \approx 0$  ir šiluminiai parametrai negali būti paraleliai įvertinti (Zhang [91]). Santykinai didelė RSC determinanto vertė gali patvirtinti tiesinį nepriklausomumą vertinant šiluminis parametrus (Ozisk (2018), [67]). RSC reikšmės skirtingoms 'g-funkcijoms'  $G_{ILS}$ ,  $G_{ICS}$  and  $G_{FLS}$  buvo suskaičiuotos ir pateiktos 3.2, 3.3, 3.4 paveikslėliuose ir publikacijoje [44].

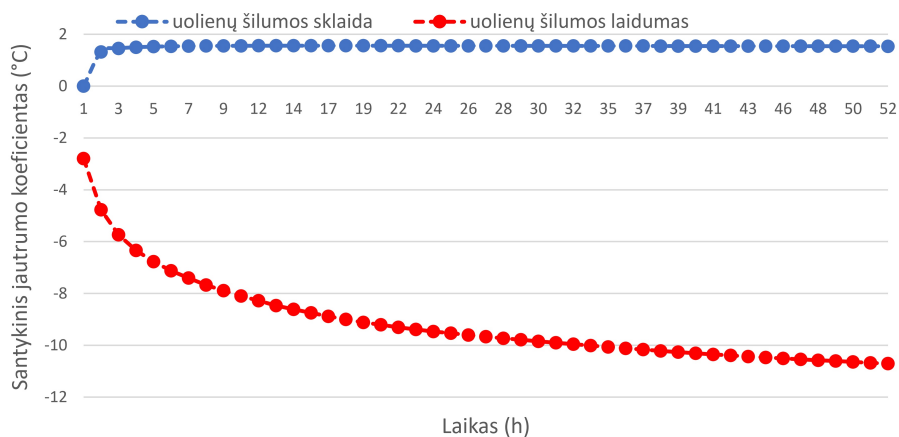
Didelės  $\det|RSC^T RSC|$  reikšmės (žr. 3.5 paveikslėlyje) patvirtina, kad numatomi ieškoti šilumos parametrai yra tiesiškai nepriklausomi ir PSO algoritmas gali būti pritaikomas, minėtus šilumos laidumo parametrus galima parinkti vienu metu. RSC reikšmės užpildo šilumos laidumo



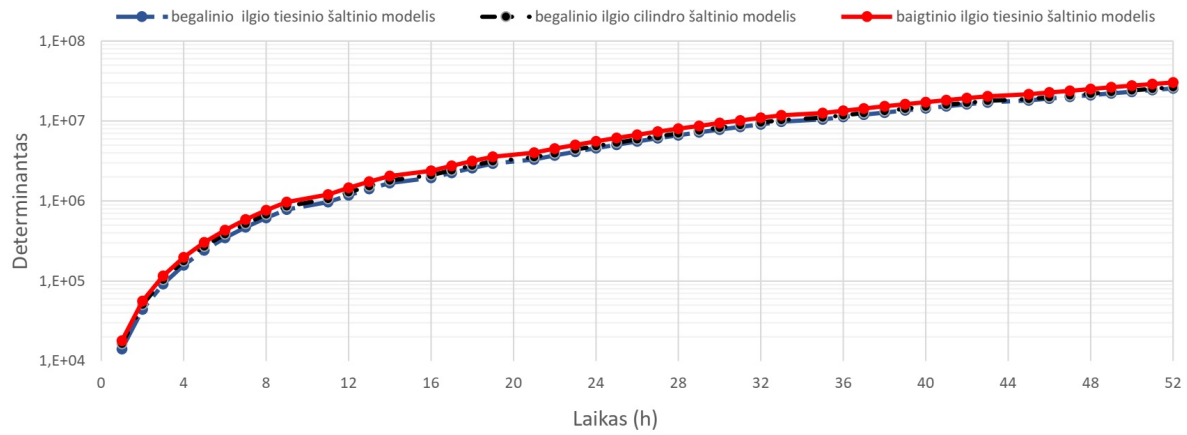
3.2 Paveikslas Santykiniai jautrumo koeficientai šiluminiams parametrams  $G_{ILS}$  funkcijos taikymo atveju Indriulionis (2019)[44].



3.3 Paveikslas Santykiniai jautrumo koeficientai šiluminiams parametrams  $G_{ICS}$  funkcijos taikymo atveju Indriulionis (2019)[44].

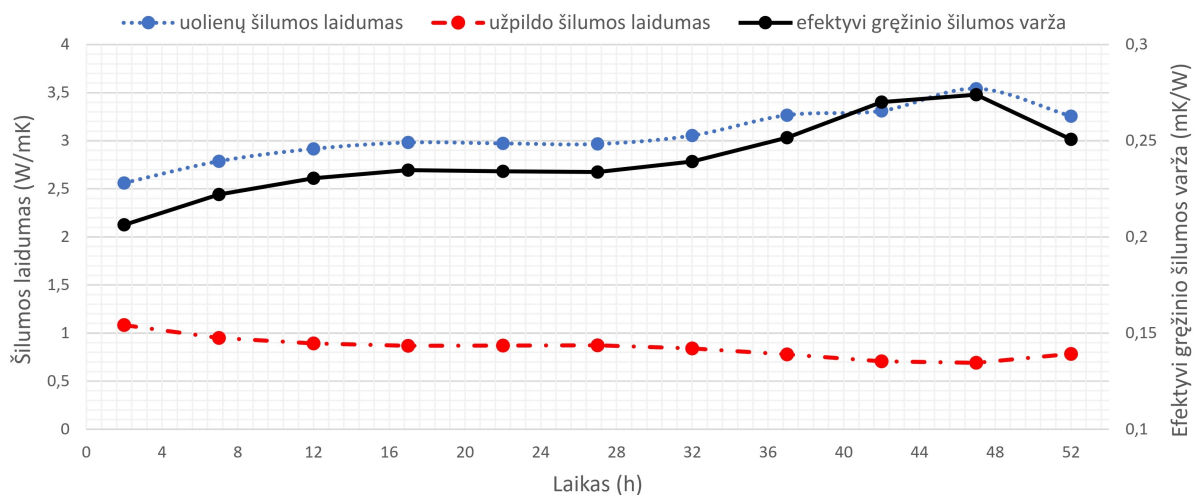


3.4 Paveikslas Santykiniai jautrumo koeficientai šiluminiams parametrams  $G_{FLS}$  funkcijos taikymo atveju Indriulionis (2019)[44].



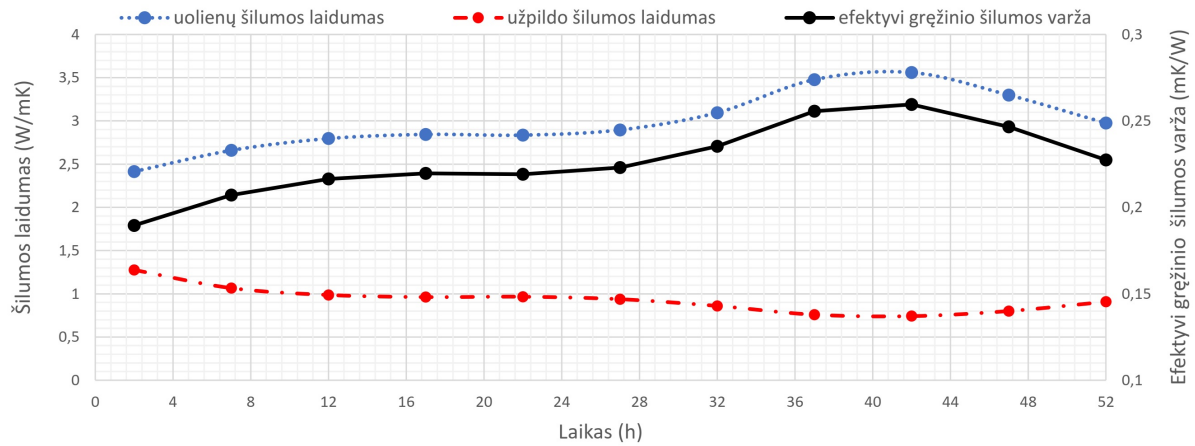
3.5 Paveikslas Santykinis jautrumo koeficientų determinantas skirtingiems šilumos perdavimo metodams Indriulionis (2019)[44].

ir atstumo tarp U-formos vamzdelių yra lygūs  $-7,261$  and  $-7,735$  atitinkamai, kurie yra visiškai nepriklausomi nuo laiko. Tai yra akivaizdu, nes 'g-funkcijose' ir efektyvioje gręžinio šilumos varžos formulėse nėra laiko  $t$  daugiklio. TRT duomenys buvo sudalinti, siekiant parinkti tiek TRT testo trukmę, tiek ir TRT pradžios momentą suskirstant laiko momentais 1h, 2h, 7h, ir t.t. eliminuojant pirmąsias 2 – 3 valandas iš duomenų analizės. Gehlin [31] atliko daugybę praktinių tyrimų susijusių su TRT testo trukme. Praktikoje ILS modelis yra labiausiai taikomas, bet TRT trukmė neturi būti mažesnė nei 50 valandų dėl 'užtriukšmintų' duomenų kokybės įprastai pirmąsias eksperimento valandas priverstinai šalinant iš TRT duomenų analizės. TRT eksperimento trukmė yra lygi  $t \geq \frac{5r_b^2}{\alpha_g}$ , kurią nustatė Zhang [91]. Ši analizė parodo ne tik trukmę, bet ir TRT duomenų pradžios momento įtaka įvertintiems parametrams ir jų stabilumui. Santykinės paklaidos yra mažesnės nei 3% vidutinei šiluminio laidumo reikšmei, jei TRT trukmė ne mažesnė nei 28 valandos. 3.6, 3.7, 3.8 paveikslėliuose yra pateikti šilumos laidumo parametrų įverčiai, naudojant skirtingomis 'g-funkcijomis' pagrįstus šilumos perdavimo modelius, esant skirtingiems TRT pradžios momentams ir trukmėms.

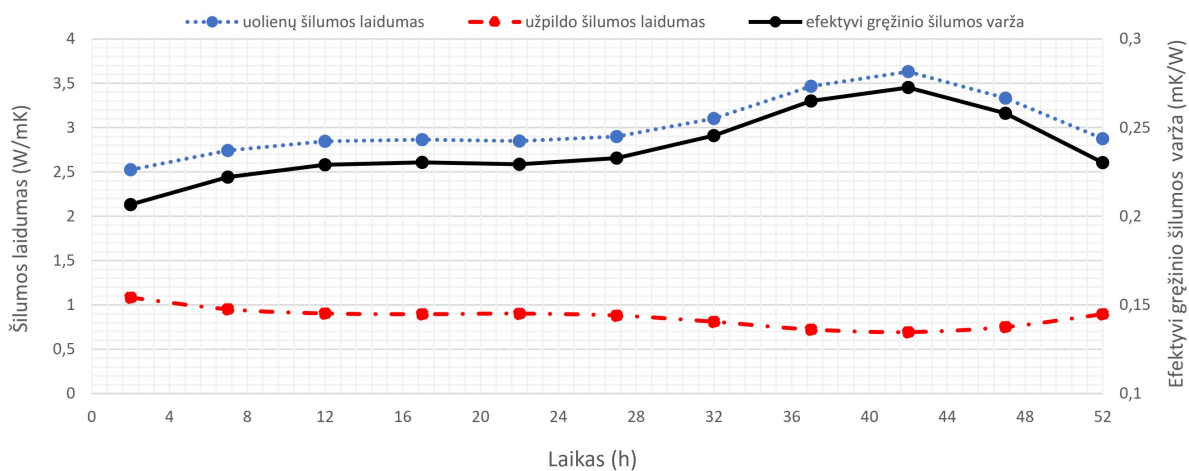


3.6 Paveikslas Šilumos parametrų įverčiai, naudojant skirtingas TRT duomenų trukmes  $G_{ILS}$  funkcijos taikymo atveju Indriulionis (2019)[44].





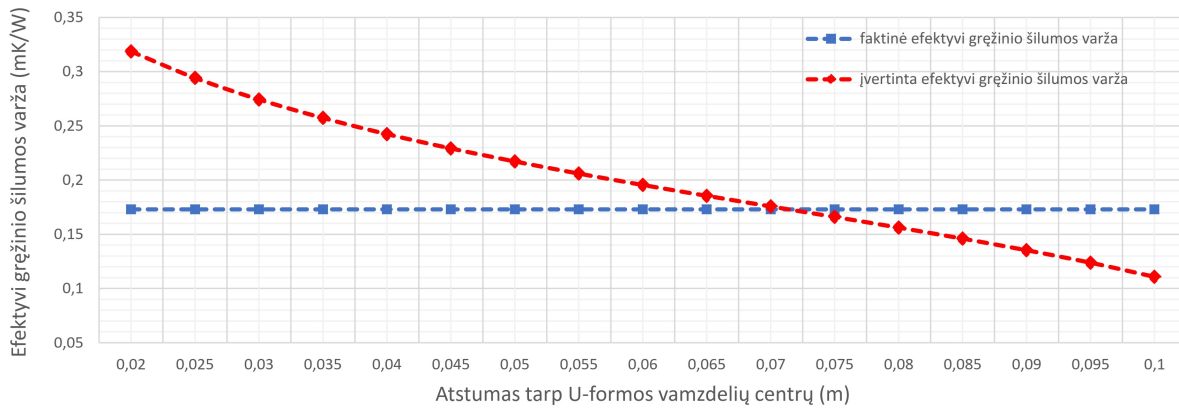
3.7 Paveikslas Šilumos parametrų įverčiai, naudojant skirtingas TRT duomenų trukmes  $G_{ICS}$  funkcijos taikymo atveju Indriulionis (2019)[44].



3.8 Paveikslas Šilumos parametrų įverčiai, naudojant skirtingas TRT duomenų trukmes  $G_{FLS}$  funkcijos taikymo atveju Indriulionis (2019)[44].

Papildoma neapibrėžtumų analizė buvo atlikta, norint gauti patikimus šilumos laidumo parametrų įverčius, kurie priklauso nuo patikimų praktinių parametrų verčių. Šie rezultatai parodo efektyvios gręžinio šilumos varžos reikšmės kitimo priklausomybę dėl įmontuoto atstumo  $L_s$  tarp U-formos vamzdelių verčių pokyčių. U-formos atstumas tarp vamzdelių  $L_s$  buvo parinktas remiantis Hellström [35] efektyvios gręžinio varžos formule. TRT eksperimente fiziškai nustatytas atstumas tarp U-formos vamzdelių centrų yra žymimas  $L_s$ , o reikšmė buvo pakeista iš 0,053 į 0,0688 reikšmę. Įvertintos ir suskaičiuotos efektyvios  $R_b$  ir palygintos tikraja  $R_b$  reikšme, kur analizės rezultatas pateiktas 3.9 paveikslėlyje. Iš 3.9 paveikslėlio grafiko matosi, kad parinkta  $L_s$  reikšmė yra tinkama vykdyti šilumos modeliavimą bei eliminuoja vertinamos skysčio temperatūros neapibrėžtumus ir paklaidas. ASHRAE [5] rekomendacijose įprastai nurodoma vertė mediana, kad tinkamiausia atstumo tarp U-formos vamzdelių centrų vertė. Šilumos laidumo parametrų statistikos yra pateiktos 3.1 lentelėje ir publikacijoje [44], esant tik stabilioms įvertintų šilumos parametrų reikšmėms, kur TRT trukmė yra daugiau nei 28 valandos.

Nustatytų šilumos parametrų įverčių paklaidos yra palygintos su mokslininkų Beier [8] ir



3.9 Paveikslas Atstumo tarp U-formos vamzdelių  $L_s$  vertės įtaka efektyviai gręžinio šilumos varžai Indriulionis (2019)[44].

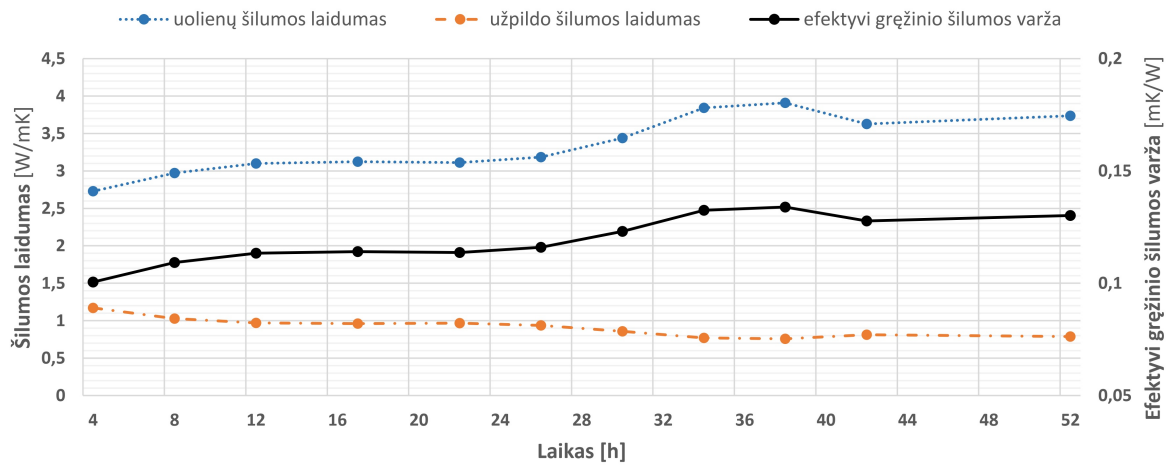
Parametrai	Vidutinė reikšmė			Santykinės paklaidos (%)			Zhang (%)	Beier (%)
	$G_{ILS}$	$G_{ICS}$	$G_{FLS}$	$G_{ILS}$	$G_{ICS}$	$G_{FLS}$		
$\lambda_s$	2.92	2.81	2.84	3.7	0.5	0.7	14.4	0.7
$\lambda_g$	0.76	0.81	0.77	4.2	11.4	4.9	6.6	–
$R_b$	0.194	0.185	0.193	12	6.9	11.5	10	8.1
<b>RMSE</b>	0.036	0.033	0.033					

3.1 Lentelė Įvertintų šilumos parametrų statistikos Indriulionis (2019)[44].

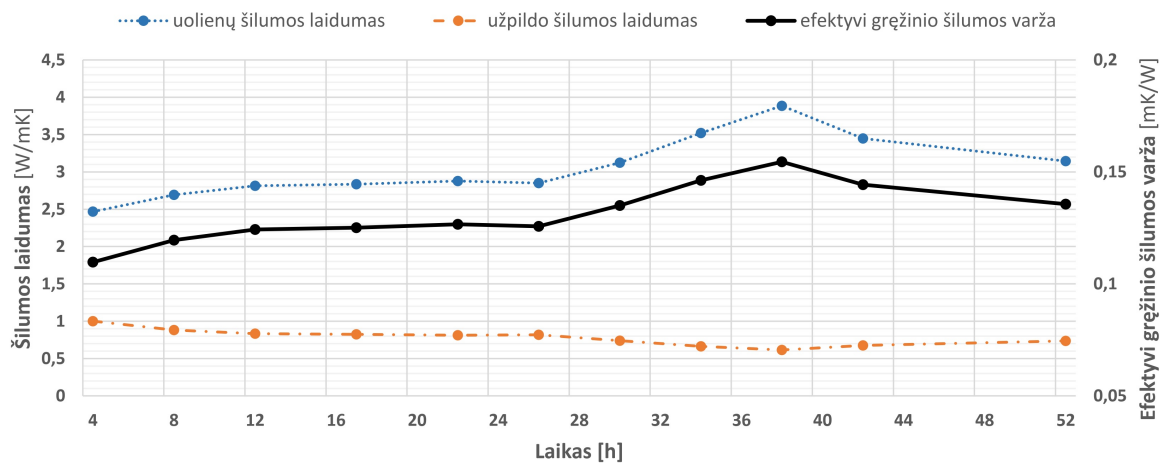
Zhang [91] rezultatais. Vidutinės RMSE reikšmės yra artimos temperatūros matavimų paklaidoms 0,03, šis rezultatas laikomas kokybišku ir pakankamu. Šilumos parametrai buvo ieškomi evoliucinių algoritmų pagalba lygiagrečiai, o šilumos perdavimas vertikaliame kolektoriuje buvo realizuotas kelių skirtingų analitinių g-funkcijų pagalba. Iš kitų tyrimų, kuriuos atliko Beier [8], gauti šilumos parametrų įverčiai yra pateikiami kaip patikimi, kai jų vertė neviršija 5% nuo realiomis laboratorijos sąlygomis pamatuotų bei šių parametrų reikšmės nėra gaunamos vienu metu. Zhang [91] pateikė genetinio algoritmo pritaikomumo privalumus, jo pagalba nustatė šilumos laidumo parametrus ir pagrindė praktine analize, gautų rezultatų pritaikomumą, nepaisant didesnių santykinų paklaidų lyginant su pateiktomis šioje disertacijoje.

### 3.4 Neapibrėžtumų analizė

Šis skyrelis yra skirtas neapibrėžtumų (angl. uncertainty) analizei turint tikslą pateikti praktinius skaičiavimus pritaikius PSO algoritmą, o šilumos perdavimo procesas realizuotas 3.5 formule. Gauti analizės rezultatai, akivaizdžiai parodo TRT eksperimento neapibrėžtumų įtaką nežinomų šilumos parametrų įverčiams. Taip pat reikia pabrėžti, kad skaičiavimuose bus naudojami skirtingi procentiniai nuokrypiai nuo žinomos parametro reikšmės, t.y.  $-5\%$  ir  $+5\%$ . Žemiau 3.12 pateiktos gautos reikšmės šilumos normai  $q$ , pradinei temperatūrai  $T_0$  ir gręžinio sienelės spinduliui  $r_b$ . Dažnai praktikoje spėliojama, kiek matavimo netikslumas gali įtakoti galutinį ieškomą sprendinį. Pateiktu atveju vidutinė tikslo funkcijos reikšmė RMSE yra apie 0,1 t.y. išaugo apie tris kartus palyginus su gautais rezultatais 3.1 lentelėje, kur RMSE reikšmė siekia 0,03.



(a) Šilumos perdavimo norma  $q_{(+5\%)}$



(b) Šilumos perdavimo norma  $q_{(-5\%)}$

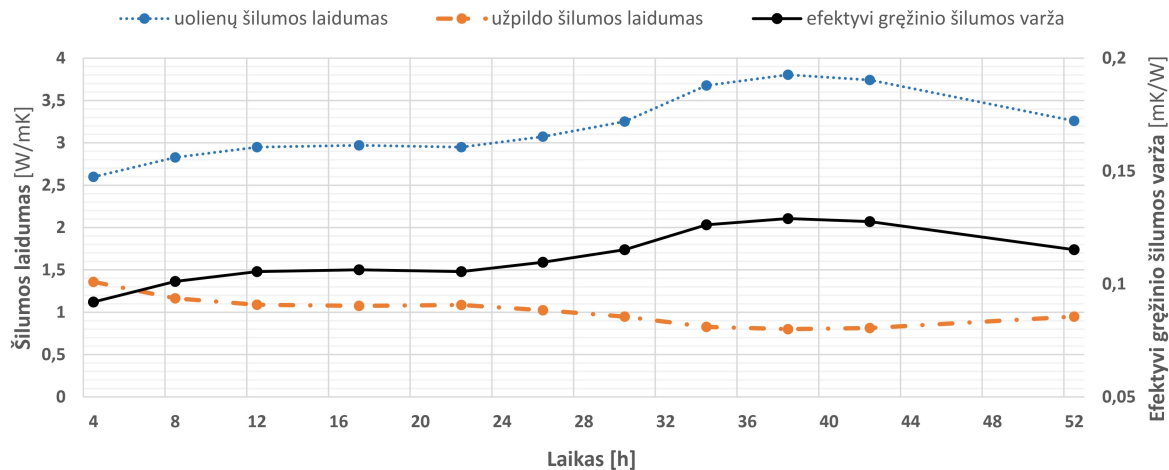
3.10 Paveikslas Šilumos parametrų įverčiai šilumos perdavimo normos  $q$  neapibrėžtims, taikant  $G_{FLS}$  funkciją

Parametras	$r_{b(+5\%)}$	$r_{b(-5\%)}$	$T_0(+5\%)$	$T_0(-5\%)$	$q_{(+5\%)}$	$q_{(-5\%)}$
$\lambda_s$	2,94	2,96	2,95	2,96	3,10	2,81
$\lambda_g$	0,89	0,76	0,98	0,71	0,88	0,76
$R_b$	0,123	0,135	0,117	0,144	0,125	0,131

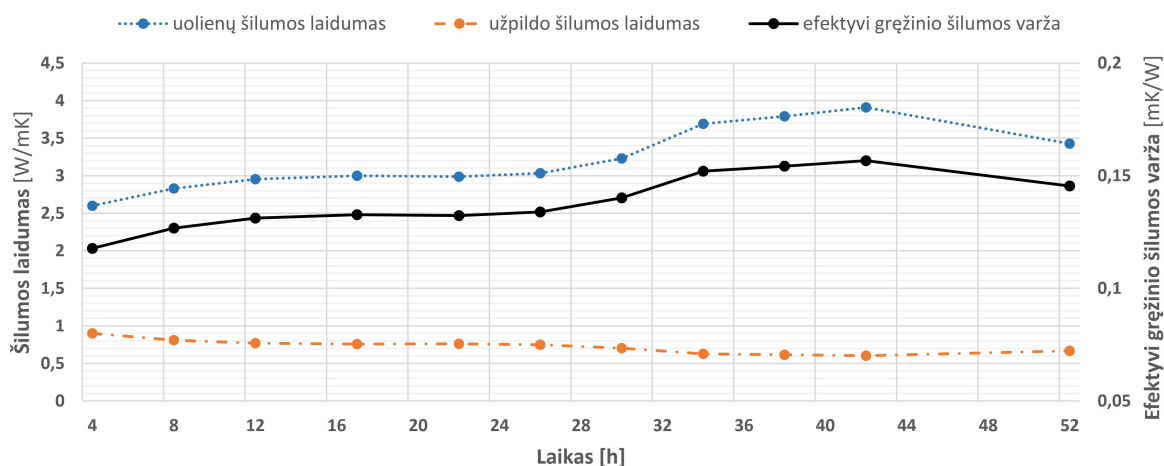
3.2 Lentelė Šilumos parametrų įverčiai su žinomomis neapibrėžtėmis  $G_{FLS}$  funkcijos atveju

Parametras	$r_{b(+5\%)}$	$r_{b(-5\%)}$	$T_0(+5\%)$	$T_0(-5\%)$	$q_{(+5\%)}$	$q_{(-5\%)}$
$\lambda_s$	4,4%	4,9%	4,8%	5,0%	9,9%	0,2%
$\lambda_g$	22,0%	3,7%	33,8%	3,3%	21,1%	4,0%
$R_b$	28,2%	25,1%	34,0%	18,8%	29,8%	22,7%

3.3 Lentelė Šilumos parametrų įverčių paklaidos su žinomomis neapibrėžtėmis  $G_{FLS}$  funkcijos atveju



(a) Pradinė temperatūra  $T_{0(+5\%)}$



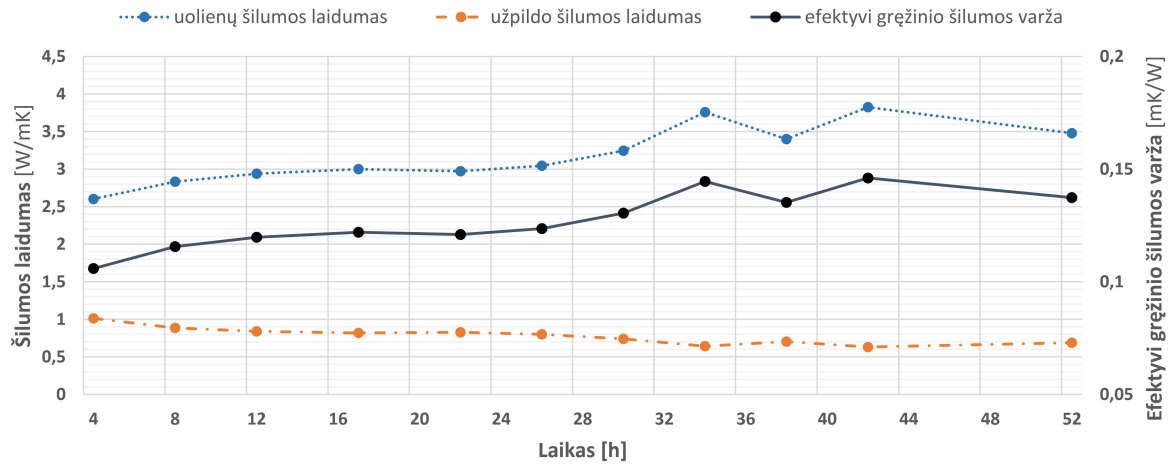
(b) Pradinė temperatūra  $T_{0(-5\%)}$

3.11 Paveikslas Šilumos parametrų įverčiai pradinės temperatūros  $T_0$  neapibrėžtims, taikant  $G_{FLS}$  funkciją

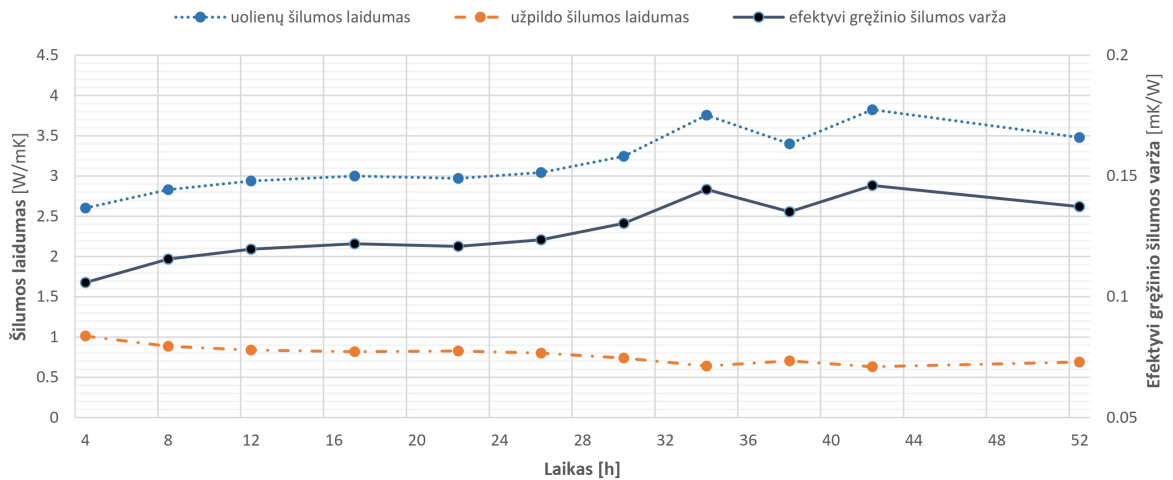
Įdomu pastebėti, kad 3.3 lentelėje pateiktos paklaidos nežymiai pasikeitė, kai buvo sumažinta (-5%) faktinė TRT eksperimento reikšmė. Visiškai priešingai įvyko, jei buvo pervertinta (+5%) faktinė TRT eksperimento reikšmė, t.y. gręžinio užpildo šilumos laidumo ir gręžinio šilumos varžos įverčio paklaida daugiau nei padvigubėjo. Iš gautų rezultatų akivaizdžiai matyti, kad neapibrėžtumai TRT eksperimento matavimuose turi asimetrinį efektą jų įverčiams ir paklaidoms.

### 3.5 Diskusija

Uolienu ir užpildo šilumos parametrai buvo įvertinti PSO algoritmo pagalba, naudojant aukštos kokybės TRT testo eksperimentinius duomenis. Praktinėje TRT analizėje pritaikytas dalelių speičiaus optimizavimo paieškos metodas nežinomiems šilumos laidumo parametrms nustatyti. Šilumos perdavimo modeliai vertikaliame kolektoriuje buvo realizuoti trimis analitinėmis g-funkcijomis  $G_{ILS}(t)$ ,  $G_{ICS}(t)$ ,  $G_{FLS}(t)$  atitinkamai. Šis algoritmas buvo išbandytas įvairioms



(a) Gręžinio spindulys  $r_{b(+5\%)}$



(b) Gręžinio spindulys  $r_{b(-5\%)}$

### 3.12 Paveikslas Šilumos parametrų įverčiai, gręžinio spindulio $r_b$ neapibrėžtims, taikant $G_{FLS}$ funkciją

*in-situ* eksperimento trukmėms, susiejant minėtas trukmes su skirtingais pradiniais skaičiavimo momentais eksperimentiniuose duomenyse. Pritaikytas PSO šilumos laidumo parametrų vertinimo metodas leidžia nustatyti uolienų, užpildo šilumos laidumo ir efektyviosios gręžinio šiluminės varžos parametrus vienu metu, nevertinant parametrų atskirai, kaip yra įprasta praktikoje. Gautas stabilios TRT trukmės rezultatas yra artimos su Zhang [91] rezultatu. Parametrų įverčių reikšmės tampa stipriau 'išsibarsčiusios', tada TRT trukmė yra mažesnė kaip 28 valandos. Šios analizės rezultatai parodė, kad ypatingai svarbu turėti aukštos kokybės eksperimento duomenis, jei norime gauti patikimas šilumos parametrų įverčių reikšmes, t.y. artimas vidutinėms TRT aparatūros matavimo neapibrėžtims. Mūsų tyrimo atveju buvo gauta artima  $0,03^\circ C$  vidutinės kvadratinės paklaidos reikšmei. Ši reikšmė yra artima temperatūros matavimo prietaiso tikslumui. PSO algoritmas nepateko į lokalųjį minimumą, o nustatytos nežinomų parametrų įverčių reikšmės yra patikimos paklaidų dydžių prasme. Skirtingos eksperimento trukmės duomenys, kur TRT trukmė daugiau nei 28 valandos, yra būtina ir pakankama sąlyga nustatyti kokybiškai nežinomus šilumos parametrus. Svarbu pastebėti, kad santykinė efektyviosios gręžinio šilumos

varžos paklaida yra šiek tiek didesnė nei 3%, kurią tiesiogiai įtakota gręžinio fizinių parametrų bei atstumo tarp U-formos vamzdelių bei užpildo šilumos laidumo įverčio reikšmės. Plėtojant šių praktinių skaičiavimų pritaikomumą yra būtina turėti praktinius geoterminių siurblių sistemos veikimo duomenis su VSK masyvu, tai įgalintų išplėsti PSO algoritmo veikimo taikymus. Geras tokio pritaikymo pavyzdys buvo realizuotas Zhang (2018) [91] publikacijoje. Papildomai atlikti analizės skaičiavimai atskleidė asimetrinį efektą ieškomų parametrų reikšmėms ir jų paklaidoms, kai TRT eksperimento parametrai turi vienodas neapibrėžtis į priešingas puses vienodomis proporcijomis.

## skyrius 4

# Įvairiasluoksnis kvartero nuogulų šilumos perdavimo modelis

Pastaruoju metu ypatingai daug praktinių ir skaitinių modeliavimo tyrimų yra atlikta, siekiant įvertinti vertikalių kolektorių veikimą, esant skirtingai litologinei storymei ir požeminio vandens filtracijai. Rezultatų kokybė yra būtina sukaupti reikalingas žinias ir patirtį prieš projektuojant VSK sistemas. Blum (2011) [11] savo publikacijoje pabrėžia, kad praktinių žinių stoka tiesiogiai įtakoja VSK sistemos įrengimo kainą, t.y suprojektuoto VSK gylį, atstumus tarp jų ir geometrinį išdėstymą. VSK veikimo efektyvumą galima analizuoti tiek analitiniais, tiek ir skaitiniais metodais. Iš praktikos yra žinoma, kad nuosėdinės uolienos skiriasi dėl jų geologinės sandaros, keičiantis gyliui litologiniai sluoksniai yra skirtingai prisotinti ar neprisotinti gruntinio vandens. Praktiniuose TRT eksperimentuose dažnai aprašomas kiekvienas geologinis sluoksnis atskirai, išskiriant hidrodinamines, fizikines ir šilumos laidumo savybes. Jei už vertikalaus gręžinio yra mažo šilumos laidumo uolienu (pvz: sauso smėlio, žvyro), o norima analizuoti ilgo laikotarpio VSK veikimą, tada atšąla aplink VSK esančios uolienos ir greičiau išnaudojami prognozuoti sekliosios geotermijos šilumos energijos kiekiai. Maždaug nuo 2012 metų prasidėjo nauja 'banga' tikslesnių analitinių ir skaitinių metodų, apimančių daugiasluoksnę geologinę struktūrą ir uolienu hidrodinamines ir šilumos savybes. Li (2017) [60] išvystė ir pateikė skaitinį daugiasluoksnį modelį, kurio rezultatus palyginio su eksperimento temperatūrinėmis kreivėmis  $Z$  ašies atžvilgiu ir su FLS modeliu. Rezultatai buvo pateikti skirtingiems geologiniams sluoksniams. Vertikalaus šilumos kolektoriaus ir jį supančios aplinkos  $B2G$  dinaminis modelis buvo sukurtas ir ištestuotas Cazorla-Marín (2017) [16], čia VSK supančios nuosėdinės uolienos buvo heterogeniškos. Luo (2018) [62] atliko įdomų skaitinį ir praktinį šilumos modeliavimo eksperimentą ir naudojo skirtingus gruntinio vandens lygius. Išvadose pateikė gruntinio vandens lygio vertinimo reikšmę prieš projektuojant VSK masyvus. Specialiomis laboratorinėmis sąlygomis buvo sukurta eksperimentinė stratifikuota geologinė aplinka, kuri skirta atlikti tranzityvaus šilumos perdavimo eksperimentą vienam VSK (Li (2018) [59]). Rezultatai parodė akivaizdžius skirtumus tarp homogeniškos ir nehomogeniškos geologinės aplinkos  $Z$  ašies atžvilgiu. Keletas tyrimų, vystant analitinius įvairiasluoksnius šilumos perdavimo modelius, kartu su gruntinio vandens judėjimu buvo atlikti mokslininkų Abdelaziz (2014) [1], Hu (2017)[41], Erol ir François (2018) [24]. Daugelis minėtų tyrėjų teigia, kad heterogeniška geologinė ir hidrogeologinė aplinka turi įtakos VSK

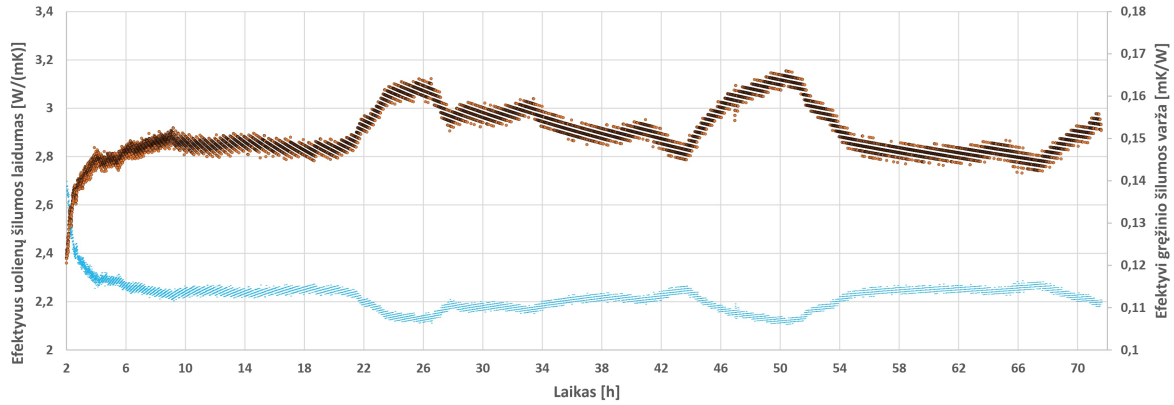
efektyviam veikimui, net jei požeminio vandens greitis siekia 0,1 metro per dieną. Li (2018) [59] vykdė praktinius ir skaitinius tyrimus eksperimentinėje smėlio dėžėje heterogeniškoje geologinėje aplinkoje, o Sakata (2018) [79] pateikė TRT tyrimo vykdymo koncepciją įvairiasluoksnėms nuosėdinėms uolienoms. Išplėstinius *in-situ* TRT tyrimus su savaiminiu šilumos iš uolienų atsišildymu (angl. thermal heat recovering), kai nevyksta šilumos išgavimas ar įpumpavimas vykdė Li (2017) [60]. Skaitiniame tyrime naudosis profesionaliai atlikto *in-situ* TRT tyrimo duomenis įvairiasluoksnėje kvartero nuogulų stovymėje Vilniuje Visorių mikrorajone. Dalis praktinio tyrimo rezultatų yra išspausdinta žurnale 'Geologija' kartu su geologu Žygmantu Palaičiu [69]. Pateiksiu šilumos perdavimo modelio veikimo analizę įvairiasluoksnėje Lietuvos kvartero nuogulose, nustatysiu hidrodinaminių parametrų veikimo temperatūros efektus. Eksperimentinėje *in-situ* TRT vietovėje buvo nustatyti fizikiniai ir hidrodinaminiai parametrai Palaičio (2012) [68] ir Bendoraičio [9, 10] techninėse ataskaitose. Skirtingos uolienos buvo įtrauktos į skaitinį modelį: žvyras, smėlis, molis ir dulkingas molis. Visa litologinė stovymė buvo suskirstyta į 20 skirtingų sluoksnių (kai kurie iš jų yra pasikartojantys) prisotintų požeminio vandens, bei vandeniui nelaidžių moreninių uolienų. Pirmiausia bus atliktas praktinis eksperimentas vienam vertikaliai šilumos kolektoriui, su tikslu pateikti temperatūros įverčius *in-situ* TRT testo duomenų pagrindu, esant apibendrintai ir įvairiasluoksnėms kvartero nuoguloms kartu su vandens filtracija. Antra, vienerių metų šilumos poreikio simuliacija buvo vykdoma, simuliuojant šilumos perdavimą VSK pagal nustatytus pastato šilumos ir šalčio suvartojimo kiekius. Trečia, visos VSK sistemos modeliavimas buvo vykdomas uolienų šilumos laidumo ir hidrodinaminių parametrų įtaka pagal suprojektuotus pastato šilumos ir šalčio suvartojimo kiekius vienerių metų laikotarpiui. Apibendrintos geologinės stovymės skaitiniai rezultatai buvo gauti Earth Energy Designer programa 'g-funkcijų' realizacijomis, kuri paprastai naudojama geologų inžinierių projektuojant vertikalių šilumos kolektorių sistemas. Temperatūriniai skirtumai buvo analizuojami, esant skirtingoms hidrogeologinėms ir VSK veikimo sąlygoms. Taip pat buvo siekiama iširti požeminio vandens filtracijos ir poringumo parametrų reikšmių įtaką, analizuojant uolienų temperatūros vertes.

## 4.1 Uolienų šilumos parametrų analizė ir vertinimas

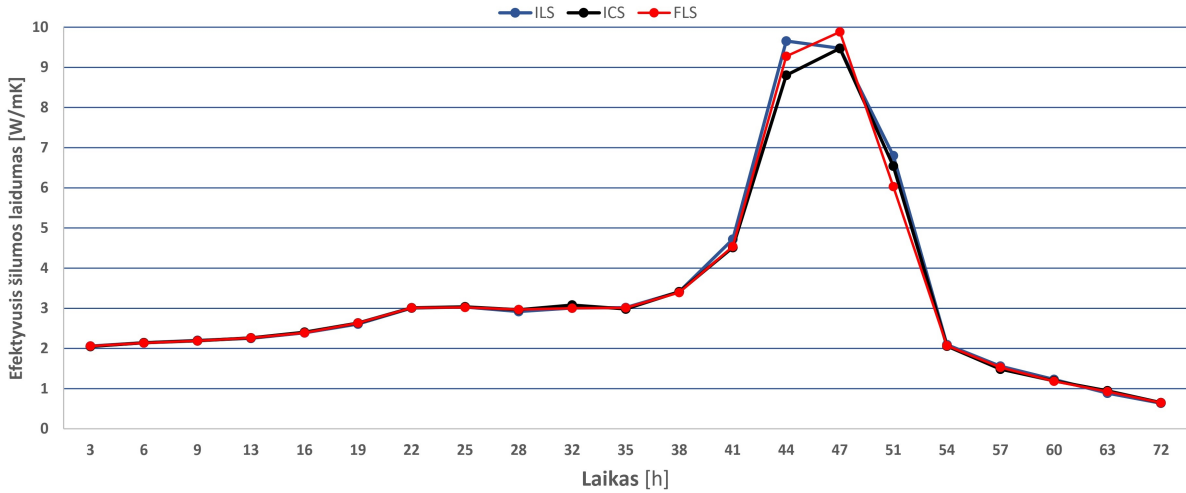
1 skyriuje buvo pateikta 1.5 formulė, kurioje detalizuota nustatymo metodika, t.y. pradžioje įvertinamas efektyvusis šilumos laidumas  $\lambda_s$  ir poto nustatoma efektyvioji gręžinio šilumos varža  $R_b$ . Šios efektyvios šilumos laidumo ir gręžinio šilumos varžos vertės apibendrintai įvairiasluoksnei kvartero nuogulų stovymei nustatinėjamos neįtraukiant pradinių 2 - 3 valandų TRT duomenų. 4.1a paveikslėlyje pavaizduotas dinaminis įvertintų šilumos parametrų reikšmių kitimas, o efektyvioji  $R_b$  reikšmė. Kaip jau žinoma iš anksčiau atliktos analizės, kad šis parametras yra jautrus  $L_s$  atstumui tarp U-formos vamzdelių centrų, vertikalaus gręžinio užpildo reikšmei  $\lambda_g$ .

4.1 lentelėje pateikti uolienų šilumos laidumo  $\lambda_s$  parametrų įverčiai abibendrintai įvairiasluoksnei kvartero nuogulų stovymei. Skaičiavimo ir formulių taikymas aprašytas 3 skyrelyje naudojant ILS, ICS ir FLS metodus, o šilumos parametrų reikšmės paieška vyksta mažiausiųjų kvadratų metodu ir PSO algoritmo pagalba. Reikia pastebėti, kad  $\lambda_g$  gręžinio užpildo šilumos laidumas





(a) Įvairiasluoksnės kvartero nuogulų storymės šilumos parametru  $\lambda_s$  ir  $R_b$  dinamika pagal 1.5 formulę.



(b) Uolienu šilumos laidumo parametru vertės gautos  $G_{ILS}$ ,  $G_{ICS}$ , ir  $G_{FLS}$  metodais PSO algoritmu.

#### 4.1 Paveikslas Šilumos parametru įvertiai nustatyti mažiausių kvadratų ir PSO algoritmo pagalba.

nebuvo nustatytas iš TRT eksperimentinių duomenų. Iš TRT eksperimento duomenų yra žinoma, kad gręžinio užpildas buvo paruoštas iš vandens-bentonito-gręžinio skiedinio. Dėl šios priežasties nebuvo vertinama  $R_b$  reikšmė PSO algoritmu. Visais šilumos modeliavimo atvejais efektyvioji gręžinio šilumos varža buvo nustatyta pastovi vidutinė reikšmė 0,153. Žemiau 4.1 lentelėje tik pateikiamos vidutinės įvertintos šilumos parametru reikšmės, kurios tenkina sąlygą  $t_b \geq \frac{20r_b^2}{\alpha_s}$ , o stabilus šilumos parametru vertinimo laikas turi būti ne mažesnis nei 56 valandos. Tai visiškai sutampa su Gehlin (2003) [31]. 4.1 lentelėje pateiktus rezultatus būtų nekorektiška lyginti tarpusavyje, nes nėra žinomos tikrosios uolienu šilumos laidumo reikšmės.

Parametras	ILS (MKM)	ILS (PSO)	ICS (PSO)	FLS (PSO)
$\lambda_s$	2,21	2,27	2,28	2,28

4.1 Lentelė Šilumos parametru įvertiai su žinomomis neapibrėžtimis

## 4.2 Įvairiasluoksnis šilumos perdavimo modelis

Šilumos perdavimas vertikaliu šilumos kolektoriumi yra tiesiogiai įtakojamas įvairiasluoksninių nuosėdinių uolienu šilumos savybių ir požeminio vandens filtracijos. Skaitinis 3D modelis įvairiasluoksnis šilumos perdavimo modelis sudarytas iš 20 skirtingų hidrogeologinių sluoksnių. Detalus litologijos aprašymas yra pateiktas A priede ir publikacijoje [43]. Bendra šilumos perdavimo lygtis geologinei storymei kai norime nustatyti temperatūrą nuosėdinėse uolienose pateikiama žemiau ,

$$C_s(z)\rho_s(z)\frac{\partial T(x, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_s(z) \frac{\partial T(x, z, \tau)}{\partial z} \right) + \frac{\partial T}{\partial x} \left( \lambda_s(z) \frac{\partial T(x, z, \tau)}{\partial x} \right) \quad (4.1)$$

o  $T(x, z, \tau)$  yra temperatūros pasiskirstymas, o  $\lambda_s(z)$   $C_s(z)$  - uolienu šilumos laidumas ir savitoji tūrio šilumos talpa konkrečiame gręžinio gylyje. Požeminio vandens prisotintame sluoksnyje kartu su požeminio vandens filtracija yra taikoma ši šilumos perdavimo lygtis:

$$C_{sg}(z)\frac{\partial T(x, z, \tau)}{\partial \tau} + C_w(z)u_w(x)\frac{\partial T(x, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{sg}(z) \frac{\partial T(x, z, \tau)}{\partial z} \right) + \frac{\partial T}{\partial x} \left( \lambda_{sg}(z) \frac{\partial T(x, z, \tau)}{\partial x} \right), \quad (4.2)$$

kur prisotintų vandeniu uolienu šilumos parametrai išreikšti formule

$$C_{sg}(z) = (1 - \theta) C_s(z) + \theta C_w(z),$$

čia  $\theta$ ,  $\lambda_{sg}(z)$ ,  $C_{sg}(z)$ ,  $\lambda_w(z)$  yra geologinio sluoksnio poringumas, šilumos laidumas, savitoji tūrio šilumos talpa poringoje uolienoje kartu su požeminio vandens filtracija. Požeminio vandens prisotintoje uolienoje, sausos uolienu ir vandens savybes žymėsime indeksais  $sg$ ,  $s$  ir  $w$ . Poringose nuosėdinėse uolienose požeminio vandens filtracija apibūrinama pagal Darsio dėsnį

$$u_w = k \cdot i, \quad (4.3)$$

kur  $k$  yra filtracijos koeficientas, o hidraulinis gradientas  $i$  apibūrinamas  $i = \frac{dh}{dx}$  apibūrinamas kaip hidraulinio spūdzio pokytis  $x$  ašies kryptimi. Būtina apibūrinti pradines žemės paviršiaus temperatūros sąlygas, geoterminio gradiento bei uolienu temperatūros kitimą  $z$  ašies atžvilgiu apibūriname formule

$$T_{top}(z, \tau) = T_0 - T_{grad}(z, \tau), \quad (4.4)$$

čia  $z$  ašis lygiagrečiai vertikaliai šilumos kolektoriui,  $\tau$  yra laikas, o  $T_0$  yra stabili po žeme esanti temperatūra,  $T_{grad}(z, \tau)$  yra geoterminis gradientas palei  $z$  ašį. Šilumos perdavimo simuliacijos pradžioje, laiko momentu  $\tau = 0$ , visoje geologinėje aplinkoje temperatūra yra lygi  $T_0 = T_s(z, \tau)$ , taip pat ir vertikalaus gręžinio viduje, bei skysčio esančio U-formos vamzdelyje. Šilumos perdavimas nuo gręžinio sienelės, kuriame sumontuotas vertikalus šilumos kolektorius, kai  $r = r_b$  apibūrinamas pasinaudojus Neumano kraštine sąlyga:

$$q(z, r_b, \tau) = \frac{T_b(z, \tau) - T_f(z, \tau)}{R_b}, \quad (4.5)$$

kur  $R_b$  yra efektyvioji gręžinio šilumos varža,  $T_b$  yra temperatūra ant gręžinio sienelės atstumu nuo gręžinio centro  $r = r_b$ . Vertikalaus gręžinio efektyvioji šilumos varža Hellström [36] pateikta

žemiau formule 4.7

$$R_p = \frac{1}{4\pi\lambda_p} \left( \ln \frac{r_{out}}{r_{in}} + \frac{\lambda_p}{h_f r_{in}} \right), \quad (4.6)$$

$$R_b = \frac{1}{4\pi\lambda_g} \left[ \ln \frac{r_b}{r_{in}} + \ln \frac{r_b}{L_s} + \sigma \ln \frac{s}{s-1} \right] + R_p, \quad (4.7)$$

čia  $s = (2r_b/L_s)^4$ ,  $\lambda_p$  yra U-formos plastikinio vamzdelio šilumos laidumas,  $h_f$  yra skysčio konvekcijos perdavimo koeficientas,  $r_{out}$  ir  $r_{in}$  U-formos plastikinio vamzdelio išorinis ir vidinis spindulys,  $r_b$  vertikalaus gręžinio spindulys,  $L_s$  yra atstumo pusė tarp U-formos vamzdelių centrų, bedimensinius kintamuosius žymėsime  $\sigma = \frac{\lambda_g - \lambda_s}{\lambda_g + \lambda_s}$ .  $T_f$  yra vidutinė įeinančio ir grįžtančio skysčio temperatūra U-formos vamzdelyje, kai  $z = 0$ . Viršutinis sluoksnis yra veikiamas lauko oro temperatūros

$$\frac{\partial T}{\partial z} = h_{air}(T_{top} - T_{air}), \quad (4.8)$$

kur  $T_{air}$  yra oro lauko temperatūra,  $h_{air}$  - tai konvekcinis oro temperatūros perdavimo koeficientas. Viršutinis ir apatinis gruntinių uolienų sluoksniai yra susiję tokia lygtimi

$$\lambda_{sg(j)} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_j-0} = \lambda_{sg(j+1)} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_j+0}. \quad (4.9)$$

Įpumpuotos ar išgautos šilumos kiekis yra skaičiuojamas, tam kad būtų tenkinama šilumos balanso sąlyga

$$\frac{\Delta Q(\tau)}{C_f v_f} = T_{fin}(\tau) - T_{fout}(\tau) \quad (4.10)$$

kur  $C_f$ ,  $v_f$  yra cirkuliuojančio skysčio tūrinė šilumos talpa ir skysčio srauto greitis U-formos vamzdelyje.

### 4.3 Įvairiasluoksnio šilumos perdavimo modelio validavimo rezultatai

4.2 skyrelyje teoriškai suformuluotas šilumos perdavimo modelis turi būti praktiškais patikrin-tas su eksperimentiniais TRT duomenimis ir palygintas su sertifikuota EED programa, kurioje realizuotas analitinių 'g-funkcijų' sprendimas. Skaitinei šilumos perdavimo simuliacija atlikta Comsol Multiphysics programa. Skaičiavimuose buvo vertinamos cirkuliuojančio skysčio ir ver-tiklaus gręžinio sienelės temperatūros. Pirmuoju atveju buvo nustatyta  $q$  šilumos perdavimo norma pastovi  $42 \frac{W}{m}$ . Skaitinės simuliacijos trukmė lygi TRT eksperimento trukmei 71,5 va-landos. Antru atveju yra imituojamas šilumos perdavimas  $9 \times 13$  vertikalių šilumos kolektorių masyvui. Žemiau pateikti šilumos ir vėsos pastato mėnesio poreikiais, perskaičiuoti vidutinei šilumos ar vėsos perdavimo normai gręžinio ilgio vienetui, kai per mėnesį eksploatuojama iki  $\frac{2}{3}$  laiko. Visais minėtais atvejais gauti rezultatai yra palyginti su EED programos vidutine skysčio temperatūros rezultatais. Taip pat svarbu pabrėžti, kad U-formos vamzdelio geometrija buvo aproksimuota kaip vienas ištisas cilindro formos vamzdelis pagal Gu and O'Neal (1998) [33] re-komendacijas. Taip išvengiama didelių kompiuterinių resursų modeliuojant skysčio judėjimą ir šilumos perdavimą U-formos vamzdelyje. Lietuvoje nebuvo atlikta skaitinė šilumos perdavimo

simuliacija vertikaliais šilumos kolektoriais Lietuvos kvartero nuogulų sąlygomis. Šilumos perdavimas kartu su požeminio vandens filtracija Lietuvos kvartero nuogulų sąlygomis yra pateiktas 71,5 valandos trukmės vienam VSK ir 9 x13 VSK sistemai visiems kalendoriniams metams. Periodiniai šilumos ir vėsos pastato poreikiai yra pateikti techninėje Palaičio ataskaitoje (2012) [68]. Abiems simuliacijoms, tiek 71,5 valandų, tiek vienerių metų simuliacijai buvo naudotas Eskilson (1987) šilumos atsako ilgo laikotarpio g-funkcijų metodas pritaikytas tik apibendrintai geologinei storymei.

Skaitinio modeliavimo rezultatai yra vertinami keliais aspektais publikacijoje [43]. Pirmia, kai g-funkcijomis gautas rezultatas palyginamas su skaitiniu apibendrintos geologinės storymės ir daugiasluoksniu skaitinių modelių rezultatais. Antra, skaitinis daugiasluoksnis šilumos perdavimo modelis yra didesnio tikslumo šilumos perdavimą imituojantis VSK nei apibendrintos geologinės storymės šilumos perdavimo modelis. Trečia, svarbu papildomai nustatyti U-formos vamzdelio aproksimacijos įtaką skaičiavimo tikslumui lyginant su g-funkcijų metodu. Modeliavimo rezultatai pateikti publikacijoje [43].

Metodas	Simuliacijos laikas 72 h	Simuliacijos laikas 8760 h
g-funkcija vs. homogeniška	0,1	0,07
g-funkcija vs. įvairiasluoksnė	0,05	0,08

4.2 Lentelė Maksimali santykinė paklaidos palygintos su 'g-funkcijų' metodo rezultatu [43].

tbl:MLEstThParams lentelėje pateiktos maksimalios paklaidos yra reikalingos įsitikinti šilumos modelio taikymo tinkamumą.

Uolienu šilumos laidumas paprastai priklauso nuo poringumo, sausos uolienos tankio, vandens prisotrinimo laipsnio ir kitų fizikinių parametrų. Šiame *in-situ* eksperimente nebuvo nustatomas nei vienas iš minėtų parametrų laboratorijoje kiekvienam litologiniam sluoksniui. Ateityje galima išplėsti tyrimus ir pasinaudoti mokslininko Ould-Lahoucine (2002) [66] naudotomis ir taikytomis formulėmis:

$$\lambda = \lambda_{dry}(1 + 9.75n - 0.706)S_w^{0.285n+0.731}, \quad (4.11)$$

kur  $\lambda_{dry}$  yra sausos uolienos šilumos laidumas,  $n$  yra aktyvusis poringumas, o  $S_w$  vandens drėgnumo laipsnis. Vėliau mokslininkas Chen[17] 4.11 formulę patobulino

$$\lambda = \lambda_n^w \lambda_s^{1-n} ((1-b)S_w + b)^{cn}. \quad (4.12)$$

Šių formulių efektyvumu galima įsitikinti, turint laboratorijoje ištirtus uolienu mėginius, jų fizikinius ir šilumos laidumo parametrus. Esamo tyrimo atveju, turime tik efektyvius (apibendrintus) šilumos parametrus kvartero nuogulų storymei, todėl šilumos laidumas nebus priskirtas kiekvienam litologiniam sluoksniui.

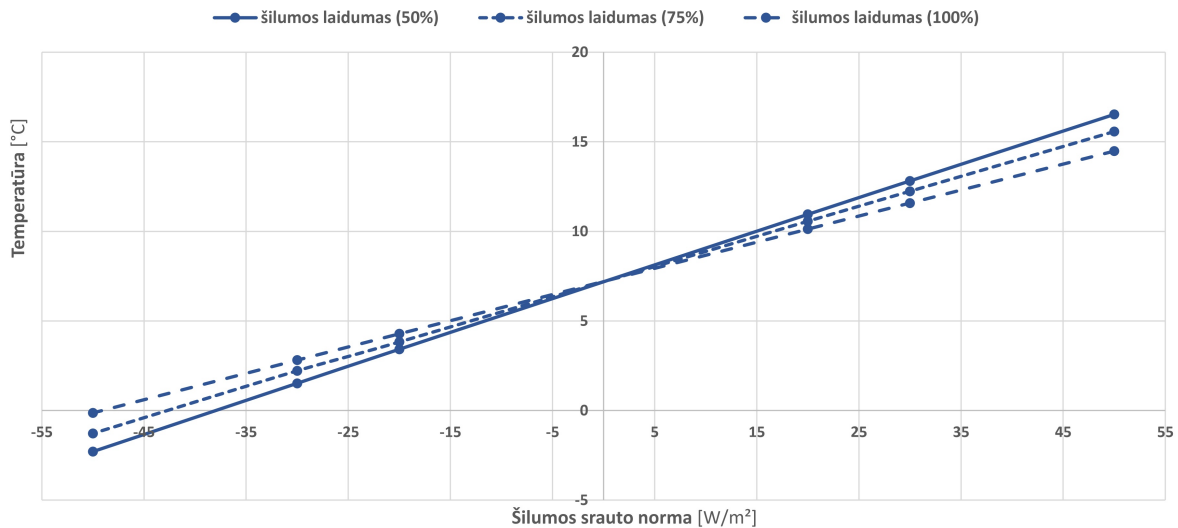
## 4.4 Hidrogeologinių ir šilumos laidumo parametrų jautrumo analizė

Šie vertinimai reikalingi nustatyti temperatūrinį atsaką iš įvairiasluoksnės kvartero nuogulų storumės su požeminio vandens filtracijai ir be jos, keičiant įvertinto efektyvaus šilumos laidumo reikšmes apibendrintai storumei. Iš in-situ TRT duomenų dažnai šilumos laidumo parametras yra pervertinamas [32]. Dėl šios priežasties buvo pasirinkti trys scenarijai: kai nustatytas efektyvus šilumos laidumas toks pats, sumažintas iki 75% jo nustatytos vertės kinta iki 50% nustatytos efektyvios šilumos laidumo vertės. Praktikoje pasitaiko atvejų, kai sausų uolienuų, drėgnų ir prisotintų uolienuų vandeniui šilumos laidumo vertės skiriasi daugiau nuo 30% iki 50% [23]. Žemiau 4.2 paveikslėlyje pateikta temperatūrinės priklausomybės tarp šilumos laidumo ir požeminio vandens filtracijos ir be požeminio vandens filtracijos. Šiam praktiniam eksperimentui parinktos iš praktinės šilumos išgavimo ar įpumpavimo sąlygos, naudojant ekstremalias šilumos ir vėsos reikšmes, bei atliekant simuliacinį eksperimentą šilumos išgavimui/įpumpavimui 500 h. Ši trukmė beveik sutampa su  $\frac{2}{3}$  mėnesio, kai veikia getermininis šilumos siurblys ir išgaunama šiluma iš uolienuų. Visorių vietovės tyrimų pagrindu, geologai inžinieriai projektuojantys vertikalius šilumos kolektorius iš grafiko duomenų 4.2 nustatyti, kokios vidutinės skysčio temperatūros gali tikėtis po 'ekstremalaus' sekliosios geotermijos energijos išnaudojimo, bei suskaičiuoti pagal geoterminio šilumos siurblio temperatūrinės kreives papildomas sąnaudas dėl pasikeitusio energijos poreikio. Temperatūros atsakas 'ant' vertikalaus kolektoriaus kinta tiesiškai tiek su požeminio vandens filtracija, tiek ir be požeminio vandens filtracijos. Temperatūros atsako procentiniai santykiai kinta proporcingai ir 'beveik' vienodai pasirinktai šilumos srauto normai. Tendencijas matome pateiktoje 4.3 lentelėje.

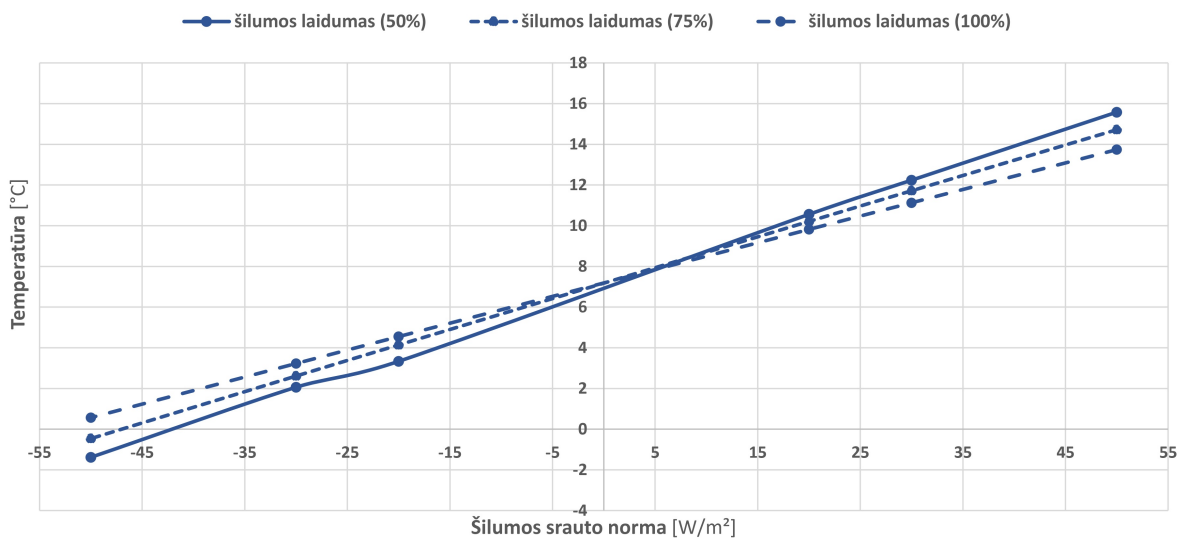
Šilumos srauto norma ( $W/m^2$ )	Be vandens filtracijos			Su vandens filtracija		
	(50% vs 100%)	(75% vs 100%)	Pokytis (%)	(50% vs 100%)	(75% vs 100%)	Pokytis (%)
50	14.1%	7.5%	87.6%	13.4%	7.1%	88.0%
30	10.7%	5.7%	87.5%	10.0%	5.3%	88.3%
20	8.1%	4.3%	87.7%	7.5%	4.0%	88.6%
-20	-20.1%	-10.6%	89.1%	-26.7%	-9.0%	<b>196.2%</b>
-30	-46.0%	-21.2%	<b>117.4%</b>	-36.1%	-19.1%	89.2%
-50	1585.2%	840.6%	88.6%	-344.0%	-181.7%	89.3%

4.3 Lentelė Temperatūros atsako tendencijos pagal uolienuų šilumos laidumo santykinį kitimą

Praktinės šilumos perdavimo simuliacijos buvo atliktos keičiant poringumo reikšmes. Buvo gautas temperatūros atsakas, tačiau labai nedideli pokyčiai Visorių vietovei, esant nustatytai požeminio vandens filtracijai. Taip pat pateiktos, tik apibendrintos reikšmės litologinei storumei, nes šilumos laidumo reikšmės nebuvo nustatytos. Dėl šios priežasties nėra pateikiami temperatūriniai pasiskirstymai įvairiasluoksnėms kvartero nuogulų storumei. Šiais skaičiavimais gali naudotis inžinieriai, kurie projektuoja šilumos siurblių sistemas. Temperatūros atsako priklausomybė nuo įvertintos efektyviosios uolienuų šilumos laidumo ir skirtingų įpumpuotos/išgautos šilumos srauto normos reikšmių, padėtų suskaičiuoti šilumos siurblio veikimo efektyvumą ekstremaliomis šilumos įpumpavimo/ išgavimo atvejais. Stipriai keičiantis klimato sąlygomis, tai tampa ypač aktualu. Į tai neatkreipiant dėmesio, tai gali brangiai kainuoti vartotojui eksploatuojančiam šilumos siurblių sistemas ir 'ženkliai' pakeisti sekliosios geotermijos energijos balansą ilguoju laikotarpiu. Tada būtina priverstinė žemės gelmių regeneracija.



(a) Be požeminio vandens filtracijos



(b) Su požeminio vandens filtracija

4.2 Paveikslas Temperatūros atsakas šilumos laidumo kitimui po 500 valandų simuliacijos

## 4.5 Diskusija

Skaitinis įvairiasluoksnių kvartero nuogulų šilumos modelis buvo pateiktas ir ištestuotas vertikalios gręžinio vidutinėms temperatūroms. Skirtingos simuliacijos buvo įvykdytos, su tikslu pateikti papildomų žinių geologams inžinieriams naudojantiems g-funkcijų metodą, projektuojant vertikalių šilumos kolektorių sistemas. Šių tyrimų pagrindu, gali Lietuvos geologijos tarnybos specialistai gali audituoti Lietuvos kvartero nuogulų šiluminį potencialą, bei pateikti efektyvias šilumos išgavimo normas, priklausomai nuo Lietuvos vietovės sukauptų TRT duomenų pagrindu. Nesudėtingai galima plėtoti šį įvairiasluoksnį šilumos perdavimo modelį su tikslu sukurti Lietuvos sekliosios geotermijos žemėlapi. Šis skaitinis šilumos perdavimo modelis įvairiasluoksniuose kvartero nuogulose gali būti taikomas esant skirtingiems šilumos išgavimo kiekiams kartu su žemės gelmių regeneracija bei tikslesniais gruntinio vandens lygio ir filtracijos koeficientų

eksperimentiniais matavimais. Nustačius uolienu temperatūrą ne tik 'ant' vertikalaus gręžinio sienelės, bet ir tam tikru atstumu nuo jo. Ši analizė padėtų nustatyti, kokio optimalaus ilgio turėtų būti vertikalus šilumos kolektorius ilgis, koku atstumu optimaliai išdėstyti vertikalius šilumos kolektorius, kad geoterminių siurblių sistemos veiktų efektyviai. Siekiant plėtoti sekliosios geotermijos žinias Lietuvoje, tam reikalingos būtinos ir pakankamos sąlygos:

- sukurti praktinį TRT eksperimentų poligoną su keletu eksperimentinių vertikalių šilumos kolektorių;
- šiame poligone turi būti atliekami vandens lygio, filtracijos koeficientų nustatymo skirtinguose sluoksniuose praktiniai tyrimai;
- būtų galimybė atlikti skirtingais metų laikais TRT eksperimentus, esant skirtingoms įpumpavimo ar išgavimo šilumos normoms;
- TRT eksperimentus atlikti su patikima TRT aparatūra, kurią galima išsinuomoti iš verslo įmonių;
- instaliuoti vertikalus šilumos kolektorius tiriamojame vietovėje, turint tikslą atlikti paskirstytą (angl. distributed) TRT eksperimentą;
- įsitraukti geologams, hidrogeologams, inžinieriams kartu su Vilniaus universiteto ir Lietuvos geologijos tarnybos mokslininkų ir tyrėjų bendruomene pastoviai dalinantis žiniomis ir patirtimi;
- Vilniaus universiteto geologijos, hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos paskaitose studentai turi gauti praktinių žinių taikydami skirtingus matematinius šilumos perdavimo modelius, turėtų galimybes tirti kvartero nusėdinių uolienu ne tik gralunometrinės sudėties, drėgnumo, bet ir šilumos laidumo, specifinės šilumos talpos parametrus.

## skyrius 5

# Išvados

1. Visiems  $G_{ILS}$ ,  $G_{ICS}$  ir  $G_{FLS}$  šilumos perdavimo metodams gauti šilumos parametrų įverčiai yra tikslūs ir stabilūs, jei TRT eksperimento trukmė tenkina sąlygą  $t_b \geq \frac{5n_b^2}{\alpha_g}$ , atsitiktinių dalelių spiečiaus optimizavimo algoritmu.
2. Dalelių spiečiaus optimizavimo algoritmas yra patikimas šilumos laidumo parametrų paieškos algoritmas santykinų paklaidų prasme nei genetiniu algoritmu (Zhang, 2018) bei standartiniu skaitiniu metodu (Beier, 2011) taikant šilumos perdavimo uždaviniui vertikaliais šilumos kolektoriais.
3. Šilumos laidumo pokyčių kitimas yra tiesiškai proporcingas beveik visoms šilumos srauto normos reikšmėms, t.y. 50% šilumos laidumo vertės sumažėjimas sąlygoja apie 89% temperatūros atsako kitimą;
4. Temperatūros atsako pokyčių vidutinės reikšmės, keičiant šilumos laidumo parametro vertes, beveik vienodos tiek su požeminio vandens filtracija, tiek be požeminio vandens filtracijos, t.y. 93,9% ir 93% atitinkamai;



## skyrius 6

# Praktinės rekomendacijos tobulinimui

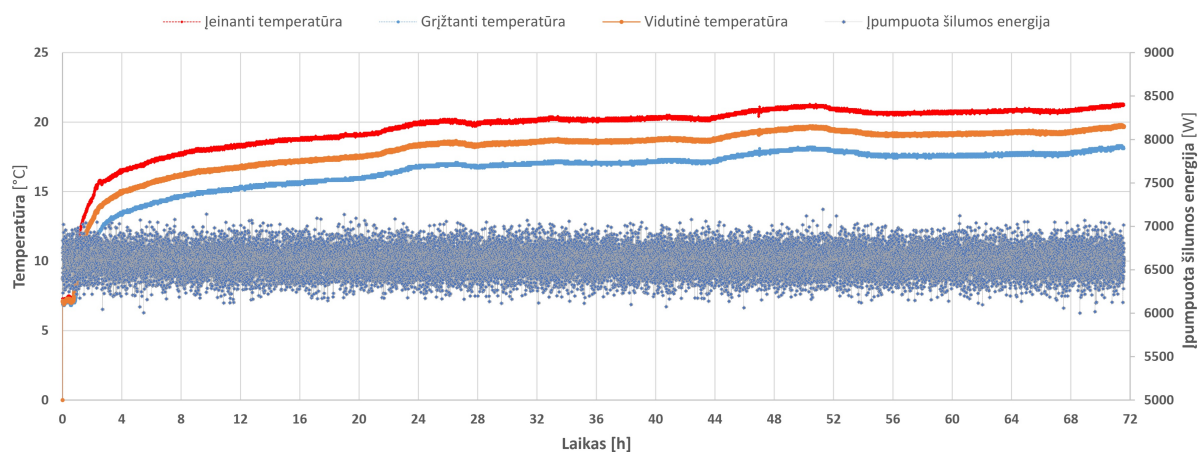
Šioje disertacijoje gauti rezultatai gali būti vystomi keliomis kryptimis bei tobulinami, gerinant praktinį pritaikomumą ir rezultatų patikimumą:

- praktiškai patikrinti dalelių spiečiaus optimizavimo algoritmo pritaikomumą, turint šilumos siurblių veikimo bei TRT duomenis. Zhang(2018) [91] tokius eksperimentus atliko ir pateiktė subalansuotą šilumos parametrų įvertinimą preдинį;
- atlikti pilną dalelių spiečiaus optimizavimo algoritmo veikimo jautrumo analizę, kai naudojami TRT eksperimento duomenys turi žinomas neapibrėžtis nuo laboratorijos sąlygomis įvertintos reikšmės;
- atlikti su užsienio šalių specialistų pagalba išplėstinį (angl. undisturbed) šilumos atsako testą kvartero nuogulų sąlygomis, laboratorinėmis sąlygomis nustatyti uolienų šiluminio laidumo, aktyviojo poringumo, uolienos drėgnumo ir įsisotinimo parametrus;
- paruošti metodines priemones ir atlikti praktinius laboratorinius eksperimentus, įgalinančius nustatyti kvartero nuogulų storymės šilumos laidumo parametrus, naudojant uolienos drėgnumą, aktyvųjį poringumą ir uolienos įsisotinimą vandeniui;
- nustatyti šilumos perdavimo normos ribines sąlygas, žinomų hidrogeologinių parametrų vandeniui laidžiuose ir nelaidžiuose sluoksniuose Lietuvos kvartero nuogulų sąlygomis.

## Priedas A

# Šilumos atsako testų eksperimentiniai duomenys

### A.1 TRT įvairiasluoksnėje kvartero nuogulų storumėje



A.1 Paveikslas Skysčio temperatūros ir įpumpuotos šilumos kiekio dinamika.

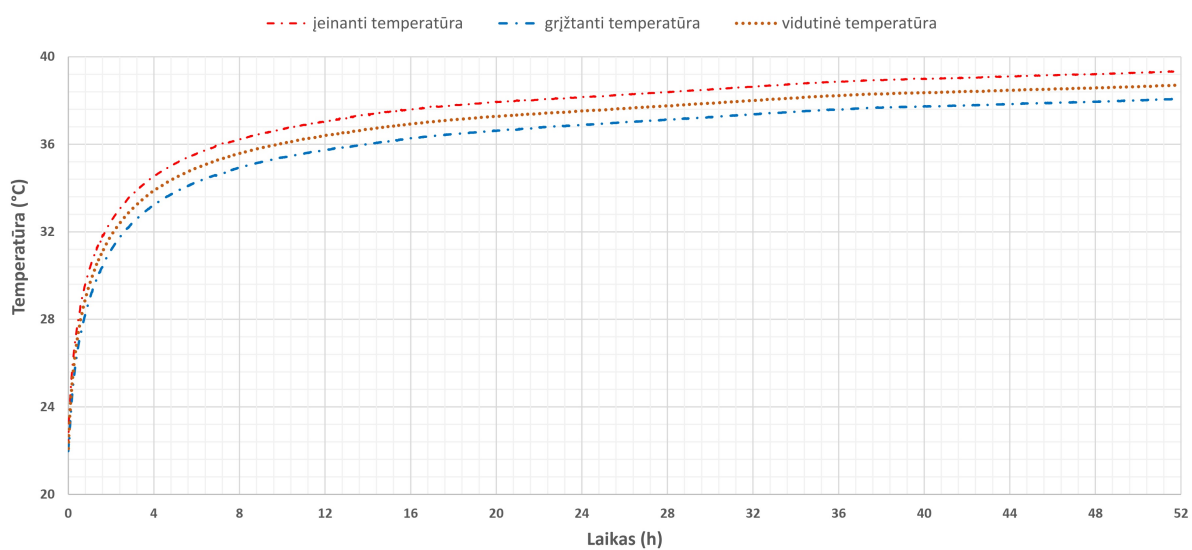
A.1 paveikslėlyje pateikta įeinančio, grįžtančio, vidutinės skysčio temperatūros ir įpumpuotos šilumos energijos dinamika viso TRT eksperimento metu.

## A.2 Uždarų patalpų smėlio dėžės temperatūros atsako testo eksperimentiniai duomenys

Matuojami parametrai	Neapibrėžčių reikšmės
Elektros energija	$\pm 1\%$
Skysčio greitis	$\pm 0,05\%$
Įpumpuotas šilumos kiekis	$\pm 0,05\%$
Uolienuų ir skysčio temperatūra	$\pm 0,03^{\circ}C$
Uolienuų šilumos parametrai	$\pm 5\%^{\circ}C$

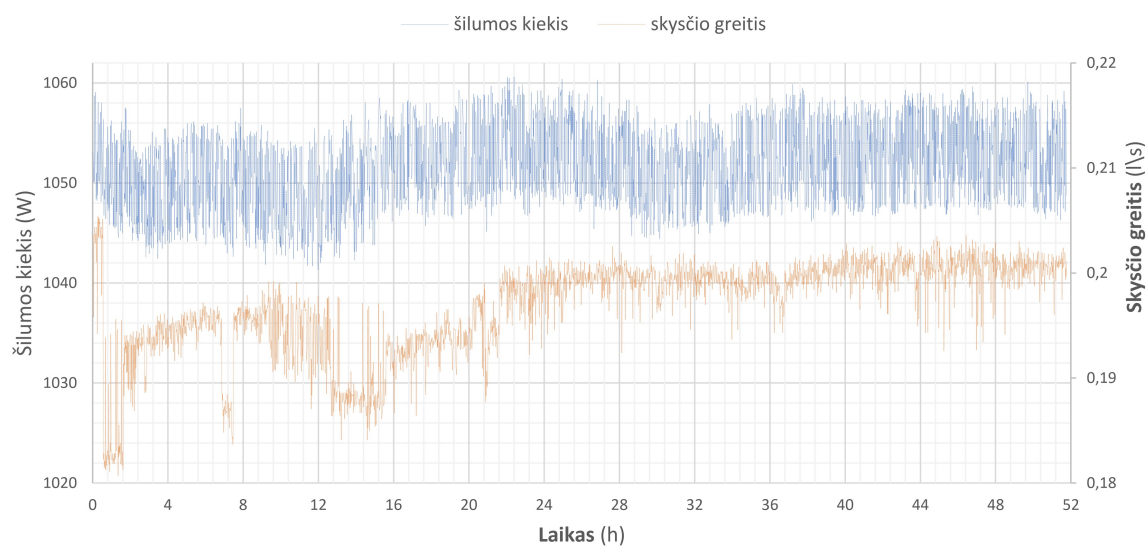
A.1 Lentelė Smėlio dėžės praktinio eksperimento neapibrėžtys.

Įeinančio ir grįžtančio skysčio eksperimento temperatūros duomenys sukaupiti temperatūrinių matuoklių yra pateikti A.2 paveikslėlyje. A.3 paveikslėlyje pateikta skysčio srauto greičio ir



A.2 Paveikslas Įeinančio, grįžtančio ir vidutinės skysčio temperatūros dinamika.

įpumpuotas šilumos energijos kiekio dinamika perduota skysčiui viso TRT eksperimento metu.



A.3 Paveikslas Skysčio greičio ir įpumpuotos šilumos energijos kiekio dinamika.

Sluoksniu Nr.	Hidrogeologinis indeksas	Litologija ir drėgnumas	Filtracijos koeficientas (m/d)	Aktyvusis poringumas	Gylio intervalas (m)	Storis (m)	Hidraulinis gradientas(m/m)
1	f III gr	drėgnas smėlis	30	0.35	0-8	8	0.011
2	g III gr	sausas smėlis ir švyras	$7 \cdot 10^{-4}$	0.01	8-15	7	0.011
3	f III md-gr	drėgnas smėlis	7	0.22	15-20	5	0.011
4	g II md	impervious sandy loam	$8 \cdot 10^{-4}$	0.01	20-43	23	0.011
5	f II žm-md	drėgnas smėlis	3	0.15	43-49	6	0.013
6	g II žm	nelaidus priemolis	$2 \cdot 10^{-4}$	0.009	49-51	3	
7	f II žm	drėgnas smėlis	5	0.2	51-65	14	0.013
8	g II žm	nelaidus priemolis	$2 \cdot 10^{-4}$	0.009	65-68	3	
9	f II dn-žm	drėgnas smėlis	5	0.2	68-76	8	0.016
10	g II žm	nelaidus priemolis	$2 \cdot 10^{-4}$	0.009	76-97	19	
11	f II dn-žm	drėgnas smėlis	5	0.2	97-105	8	0.016
12	g II dn	nelaidus priemolis	$5 \cdot 10^{-4}$	0.01	105-112	7	
13	f II dn	drėgnas smėlis	5	0.2	112-115	3	0.016
14	g II dn	nelaidus priemolis	$5 \cdot 10^{-4}$	0.01	115-120	7	
15	f II dz-dn	drėgnas smėlis	5	0.2	120-123	3	0.018
16	g II dz	nelaidus priemolis	$5 \cdot 10^{-4}$	0.01	123-129	6	
17	f II dz	drėgnas smėlis	5	0.2	129-135	6	0.018
18	g II dz	nelaidus priemolis	$5 \cdot 10^{-4}$	0.01	135-141	6	
19	f II dz	drėgnas smėlis	5	0.2	141-148	7	0.018
20	K	aleuritas	0.0001	0.009	148-150	2	

A.2 Lentelė Hidrodinaminiai parametrai kvartero nuogulų storumėje.

## Priedas B

# Santykiniai jautrumo koeficientai: Matlab programinis kodas

```
%Analysis of linearity dependency and relative sensitivity coefficients
% Programmer: Audrius Indriulionis
% Created date: Oct 28, 2017
% Update date: Sep 10, 2018
tic
clearvars all

load RefSet_TRT52.mat;

start = 1;
ends = 2830;
time = RefDataSet(start(k):ends(k),1)*60; time(1,1)=1;% avoid 0 value
Tf_ref = RefDataSet(start(k):ends(k),2);
T0 = 22;% mean((RefSet(start(k):ends(k),4))) ;
q = 57.7;%mean(RefSet(start(k):ends(k),5));
%%
%syms Tf Rb G_2
syms as ks kb t z x D real
% one hour = 3600 seconds
hr = 3600;
% Euler's number
eu = 0.5772;
% thermal conductivity k, diffusivity a, and initial temperature of the ground
%ground = struct('k',{2.82},'a',{1.47e-6},'T0',{22.0});
ground = struct('ks',{2.82},'as',{1.47e-6},'T0',{22.0});
% radius of borehole rb, depth H
borehole = struct('rb',{6.3e-2},'H',{18.32});
% thermal conductivity k, diffusivity a of the backfilling material
```

```

grout = struct('kb',{0.73},'ab',{1.901e-7});          % kb, ab
% thermal conductivity k, diffusivity a, inner radius ri and outer radius ro of the U-pipe
Utube = struct('k',{0.39},...
               'ri',{1.3655e-2},'ro',{1.67e-2});
% definition of the fluid
fluid = struct('hf',{750});
% definition of the borehole ground heat exchanger
boreGHE = struct('bore',{borehole},'grout',{grout},...
                'Upipe',{Utube},'D',{6.88e-2});

Rp = 1/(4*pi*Utube.k)*(log(Utube.ro/Utube.ri)+ Utube.k/(fluid.hf*Utube.ri));
s = (boreGHE.bore.rb./(D/2)).^4;sigma = (kb - ks)./(kb + ks);
Rb(kb,ks,D) = 1/(4*pi*kb)*(log(boreGHE.bore.rb/(boreGHE.Upipe.ro))
                        + log(boreGHE.bore.rb/(D)) + sigma*log(s/(s-1))) + Rp;
gamma = 0.577216;

G_1(as,ks,t,z) = G_syms(boreGHE,1);
Tf = T0 + q*G_1(as,ks,t,z) + q*Rb(kb,ks,D);
assume(Tf,'real')

SenCoefMatrix = [diff(Tf,as),diff(Tf,ks), diff(Tf,kb) diff(Tf,D)];
\color{mgrey}as = ground.as;ks = ground.ks; kb = boreGHE.grout.kb; D = boreGHE.Ls;
JMatrix = subs(SenCoefMatrix);% substitute the values of thermal parameters

JMatrix_t = subs(JMatrix,t,time); %substitute the values of time
Params = [ ground.as ground.ks boreGHE.grout.kb boreGHE.Ls]';
RSC = [JMatrix_t(:,1)*Params(1) JMatrix_t(:,2)*Params(2)
       JMatrix_t(:,3)*Params(3) JMatrix_t(:,4)*Params(4)];
\color{mgrey}
RSC_params = [];
detJ_params = [];
%%%%%%%%%%

for i= start:1:ends/60; %by hours
    detJ_params = [ detJ_params;
(abs(JMatrix_tt(i:60*i,:)*Params)'*abs(JMatrix_tt(i:60*i,:)*Params))];
end
%accumulated sum of detJ_params should be calculated

```

## Priedas C

# Dalelių spiečiaus algoritmas šilumos parametrų paieškai: Matlab programinis kodas

```
%Analysis of linearity dependency and relative sensitivity coefficients
% Programmer: Mahamad Nabab Alam
% Codes in MATLAB for Particle Swarm Optimization
% Programmer: Audrius Indriulionis
% Created date: Oct 28, 2017
% Update date: Sep 10, 2018
tic
clc
clearvars all
close all
rng default
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
global Tf T0 q t boreGHE ground Rp;
%Load TRT data from sandbox reference set%
load RefSet_TRT52.mat;
%%
% one hour = 3600 seconds
hr = 3600;
% Euler's number
eu = 0.5772;
% thermal conductivity k, diffusivity a, and initial temperature of the ground
ground = struct('k',{2.82},'a',{1.47e-6},'c',{1918000});
% radius of borehole rb, depth H
borehole = struct('rb',{6.3e-2},'H',{18.32});
% thermal conductivity k, diffusivity a of the backfilling material
grout = struct('k',{0.73},'a',{1.92e-7},'c',{3840000});           % kb, ab
```



```

% thermal conductivity k, diffusivity a, inner radius ri and outer radius ro of the U-pipe
Utube = struct('k',{0.39},...
              'ri',{1.3655e-2},'ro',{1.67e-2});
% definition of the fluid
fluid = struct('hf',{750});
% definition of the borehole ground heat exchanger
boreGHE = struct('bore',{borehole},'grout',{grout},...
                'Upipe',{Utube},'D',{6.88e-2});
%%
Rp = 1/(4*pi*Utube.k)*(log(Utube.ro/Utube.ri)+ Utube.k/(fluid.hf*Utube.ri));
s = (boreGHE.bore.rb./(boreGHE.D/2)).^4;
sigma = (boreGHE.grout.k - ground.k)/(boreGHE.grout.k + ground.k);
Rb = 1/(4*pi*boreGHE.grout.k)*(log(boreGHE.bore.rb/(boreGHE.Upipe.ro))
+ log(boreGHE.bore.rb/(boreGHE.D)) + sigma*log(s./(s-1))) + Rp;
%
LB = [0 0]; %lower bounds of variables
UB = [5 5]; %upper bounds of variables
% pso parameters values
m = 2; % number of variables
n = 50; % population size
wmax = 1.2; % inertia weight
wmin = 0.2; % inertia weight
c1 = 2; % acceleration factor
c2 = 2; % acceleration factor
% pso main program-----start
maxite = 50; % set maximum number of iteration
maxrun = 20; % set maximum number of runs need to be
start = 1; ends = 2830;step = 60;
best_variables = []; statistics = []; rgbest = [];
for k = start:step:ends

    t = RefDataSet(k:ends,1)*60;
    Tf = RefDataSet(k:ends,2);
    T0 = 22; % undisturbed temperature of the soil
    q = 57.7;% average of heat inhection  rate;
    for run = 1:maxrun
        % pso initialization-----start
        for i = 1:n
            for j = 1:m
                x0(i,j) = round(LB(j)+rand()*(UB(j)-LB(j)));
            end
        end
    end
    x = x0; % initial population

```

```

v = 0.01*x0; % initial velocity
for i = 1:n
    f0(i,1) = fun(x0(i,:));
end
[fmin0,index0] = min(f0);
pbest = x0; % initial pbest
gbest = x0(index0,:); % initial gbest
% pso initialization-----end

% pso algorithm-----start
ite = 1;
tolerance = 1;
while ite <= maxite && tolerance > 10-4
w = wmax-(wmax-wmin)*ite/maxite; % update inertial weight
% pso velocity updates
for i = 1:n
    for j = 1:m
        v(i,j) = w*v(i,j) + c1*rand()*(pbest(i,j)-x(i,j))...
            + c2*rand()*(gbest(1,j) - x(i,j));
    end
end
% pso position update
for i = 1:n
    for j = 1:m
        x(i,j) = x(i,j)+v(i,j);
    end
end
% handling boundary violations
for i = 1:n
    for j = 1:m
        if x(i,j) < LB(j)
            x(i,j) = LB(j);
        elseif x(i,j) > UB(j)
            x(i,j) = UB(j);
        end
    end
end
% evaluating fitness
for i = 1:n
    f(i,1) = fun(x(i,:));
end
% updating pbest and fitness
for i = 1:n

```

```

    if f(i,1) < f0(i,1)
        pbest(i,:) = x(i,:);
        f0(i,1) = f(i,1);
    end
end
[fmin,index] = min(f0); % finding out the best particle
ffmin(ite,run) = fmin; % storing best fitness
ffite(run) = ite; % storing iteration count
% updating gbest and best fitness
if fmin < fmin0
    gbest = pbest(index,:);
    fmin0 = fmin;
end
% calculating tolerance
if ite > 100;
    tolerance = abs(ffmin(ite-100,run)-fmin0);
end
% displaying iterative results
if ite == 1
    disp(sprintf('Iteration Best Particle Objective Fun'));
end
%disp(sprintf('%8g %8g %8.4f',ite,index,fmin0));
ite = ite + 1;
end
% pso algorithm-----end
ground.k = gbest(1); % thermal conductivity of the ground
boreGHE.grout.k = gbest(2); % thermal conductivity of the grout
%boreGHE.grout.a = gbest(4)*1e-7; % thermal diffusivity of grout
%ground.a = gbest(3)*1e-6; % thermal diffusivity of the ground
s = (boreGHE.bore.rb/(boreGHE.D/2)).^4;
sigma = (boreGHE.grout.k - ground.k)/(boreGHE.grout.k + ground.k);
Rb = 1/(4*pi*boreGHE.grout.k)*(log(boreGHE.bore.rb/(boreGHE.Upipe.ro))
+ log(boreGHE.bore.rb/(boreGHE.D)) + sigma*log(s/(s-1))) + Rp;%% --- G function ---
%% --- infinite composite-medium line-source model ---
%G_1 = GfunU1(t,boreGHE,ground);
%% --- infinite line-source model ---
% G_2 = G(t,boreGHE,ground,1);
%% --- finite line-source model ---
G_5 = G(t,boreGHE,ground,5);
%% --- infinite cylinder-source model ---
% G_4 = G(t,boreGHE,ground,4);
%% --- composite full-scale G function ---
%G_c = G_1 + G_5' - G_2;

```

```

% Gc = G(t,boreGHE,ground,5);

fvalue = sqrt(mean((Tf - T0 - q.*G_5 - q.*Rb).^2)); %RMSE as the objective function value
fff(run) = fvalue;
rgbest(run,:) = gbest;
%disp(sprintf('-----'));
end
%%
% pso main program-----end
disp(sprintf('\n'));
disp(sprintf('*****'));
disp(sprintf('Final Results-----'));
[bestofun,bestrun] = min(fff);
best_variables = [ best_variables; [rgbest(bestrun,:) bestofun round(t(1)/3600)]];
disp(sprintf('*****'));
avg = mean(rgbest);
stDev = std(rgbest);
MinVal = min(rgbest);
MaxVal = max(rgbest);
statistics = [statistics ;[avg stDev MinVal MaxVal]];

toc
end

```

# Literatūra

- [1] Abdelaziz, S. L., Ozudogru, T. Y., Olgun, C. G., and Martin, J. R. (2014). Multilayer finite line source model for vertical heat exchangers. *Geothermics*, 51:406–416.
- [2] Agency, E. E. (2017). Air quality in europe. Technical report, European Environmental Agency.
- [3] Al-Khoury, R., Bonnier, P. G., and Brinkgreve, R. B. J. (2005). Efficient finite elements formulation for geothermal heating systems.Part i:Steady-state. *International journal for numerical methods in engineering*, 63(7):988–1013.
- [4] ASHRAE (2011). HVAC applications handbook. *SI Edition*.
- [5] Atlanta, G. (2009). American society of heating. *Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*.
- [6] Bandos, T. V., Montero, Á., Fernández, E., Santander, J. L. G., Isidro, J. M., Pérez, J., de Córdoba, P. J. F., and Urchueguía, J. F. (2009). Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations. *Geothermics*, 38(2):263–270.
- [7] Bansal, J., Singh, P., Saraswat, M., Verma, A., Jadon, S., and Abraham, A. (2011). Inertia weight strategies in particle swarm optimization. In *Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), 2011 Third World Congress on*, pages 633–640. IEEE.
- [8] Beier, R. A., Smith, M. D., and Spitler, J. D. (2011). Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis. *Geothermics*, 40(1):79–85.
- [9] Bendoraitis, A., Gregorauskas, M., Klimas, A., and Mališauskas, A. (2007). Vilniaus miesto Sereikiškių, Tupatiškių, Pūčkonių, Pavilnio, Naujosios Vilnios, Mickūnų, Trinapolio, Verkių, Turniškių, Smėlynės, Pečiukų, Virių, Karveliškių ir Nemenčinės vandenviečių sanitarinių apsaugos zonų nustatymo projektas. Technical report, UAB „Vilniaus hidrogeologija“.
- [10] Bendoraitis, A., Gregorauskas, M., Klimas, A., and Plankis, M. (2003). Simulation of sanitary protection zones of Vilnius wellfields. *Scientific Proceedings of Riga Technical University in Series „Computer Science“ (Boundary Field Problems and Computer Simulation)*, (2):11–15.
- [11] Blum, P., Campillo, G., and Kolbel, T. (2011). Techno-economic and spatial analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany. *Energy*, (36):3002—3011.
- [12] Box, G., J.S.Hunter, and Hunter, W. (2005). *Statistics for experimenters: design, innovation and discovery*. Hoboken:John Wiley& Sons, 2 edition.
- [13] Bozzoli, F., Pagliarini, G., Rainieri, S., and Schiavi, L. (2011). Estimation of soil and grout thermal properties through a TSPEP applied to TRT data. *Energy*, 36(2):843–846.
- [14] Carslaw, H. and Jager, J. C. (1947). *Heat conduction in solids*. Oxford: Clarendon Press, 1st ed.

- [15] Carslaw, H. and Jager, J. C. (1959). *Heat conduction in solids*. Oxford: Clarendon Press, 2nd ed.
- [16] Cazorla-Marín, A., Montagud, C., Montero, A., Martos, J., and Corberán, J. M. (2017). Influence of Different Ground Thermal Properties in a Borehole Heat Exchangers Performance Using the B2G Dynamic Model. *Energy*, (36):3002—3011.
- [17] Chen, S. X. (2008). Thermal conductivity of sands. *Heat and mass transfer*, 44(10):1241.
- [18] Chiasson, A. D., Rees, S. J., and Spitler, J. D. (2000). A preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground source heat pump systems. Technical report, Oklahoma State Univ., Stillwater, OK (US).
- [19] Clerc, M. (1999). The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization. In *Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on*, volume 3, pages 1951–1957. IEEE.
- [20] Crawley, D., Lawrie, L., Winkelmann, F., Buhl, W., Y. Joe, et al. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and buildings*, 33(4):319–331.
- [21] Cui, P., Yang, H., and Fang, Z. (2006). Heat transfer analysis of ground heat exchangers with inclined boreholes. *Applied Thermal Engineering*, 26(11):1169 – 1175.
- [22] Cui, P. S., Diao, N., and Zhaohong, F. (2015). Simulation modeling and design optimization of vertical ground heat exchanger - GEOSTAR program. *Procedia Engineering*, 121:906–914.
- [23] Diao, N., Li, Q., and Fang, Z. (2004). Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(12):1203–1211.
- [24] Erol, S. and François, B. (2018). Multilayer analytical model for vertical ground heat exchanger with groundwater flow. *Geothermics*, 71:294–305.
- [25] Erol, S. and François, B. (2014). Efficiency of various grouting materials for borehole heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 70(788-799).
- [26] Esen, H. and Inalli, M. (2009). In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazig, Turkey. *Energy Buildings*, (41):395–401.
- [27] Eskilson, P. (1987). *Thermal analysis of heat extraction boreholes*. PhD thesis, Ph.D. thesis, University of Lund, Sweden.
- [28] Florides, G. and Kalogirou, S. (2008). First in situ determination of the thermal performance of a u-pipe borehole heat exchanger, in Cyprus. *Applied Thermal Engineering*, (28):157–163.
- [29] Fujii, H., Okubo, H., Nishi, K., Itoi, R., Ohyama, K., and Shibata, K. (2009). An improved thermal response test for U-borehole ground heat exchanger based on optical fiber thermometers. *Geothermics*, (38):399–409.
- [30] Gehlin, S. and Eklöf, K. (1996). TED the mobile equipment for thermal response test: testing and evaluation. Master’s thesis, Luleå University of Technology.
- [31] Gehlin, S. and Hellström, G. (2003). Influence on thermal response test by groundwater flow in vertical fractures in hard rock. *Renewable energy*, 28(14):2221–2238.
- [32] Gehlin, S. and Nordell, B. (1998). Thermal response tests of boreholes: results from in situ measurements.
- [33] Gu, Y., O’Neal, and L., D. (1998). Development of an equivalent diameter expression for vertical u-tubes used in ground-coupled heat pumps. *ASHRAE transactions*, 104:347.
- [34] He, M. (2012). *Numerical Modelling of Geothermal Borehole Heat Exchange Systems*. Doc-

toral thesis, DeMontford University.

- [35] Hellström, G. (1989). Duct ground heat storage model. *Manual for Computer Code*.
- [36] Hellström, G. (1991). *Thermal analysis of duct storage system*. PhD thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund.
- [37] Hellström, G. and S. Burkhard (2000). Earth energy designer: User's Manual, version 2. Technical report.
- [38] Hemmingway, P. and Long, M. (2012a). Design and development of a low-cost thermal response rig. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 165(3):137–148.
- [39] Hemmingway, P. and Long, M. (2012b). Thermal response testing of compromised borehole heat exchangers. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(3):180–187.
- [40] Hooper, F., Lepper, F., et al. (1950). *Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities*. National Emergency Training Center.
- [41] Hu, J. (2017). An improved analytical model for vertical borehole ground heat exchanger with multiple-layer substrates and groundwater flow. *Applied Energy*, (202):537–549.
- [42] Hwang, S., Ooka, R., and Nam, Y. (2010). Evaluation of estimation method of ground properties for the ground source heat pump system. *Renewable Energy*, (35):2123–2130.
- [43] Indriulionis, A., Palaitis, Ž., Šinkūnas, P., and Mokrik, R. (2018). Numerical modelling of vertical borehole heat exchangers performance under lithuanian quaternary conditions. *BALTICA*, 31(2):146—153.
- [44] Indriulionis, A., Palaitis, Ž., Šinkūnas, P., and Mokrik, R. (2019). Estimation of the vertical borehole thermal parameters based on the evolution algorithm using temperature response functions. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 68(1):15–25.
- [45] Ingersoll, L. R., Zobel, A. C., and Ingersoll, A. C. (1954). *Heat conduction with engineering, geological and other applications*. New York: McGraw-Hill.
- [46] Javed, S. (2012). *Thermal modelling and evaluation of borehole heat transfer*. Doctoral thesis, Lund University, Sweden.
- [47] Javed, S. and Claesson, J. (2011). New analytical and numerical solutions for the short-term analysis of vertical ground heat exchangers. *ASHRAE Transactions*, 117(1):3.
- [48] Jusienė, A. (2007). Kvartero pjūvių stratigrafinė ir genetinė revizija. Technical report, Lietuvos geologijos tarnyba.
- [49] Kavanaugh, S. and Rafferty, K. (1997). Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*
- [50] Kavanaugh, S. P. (1985). *Simulation and experimental verification of vertical ground-coupled heat pump systems*. PhD thesis, Oklahoma State University, Stillwater, USA.
- [51] Kelvin, W. T. B. (1890). *Mathematical and physical papers*, volume 3. University Press.
- [52] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV, pages*, volume 1000.
- [53] Klein, S. A. and Beckman, W. A. (2007). Trnsys 16: A transient system simulation program: mathematical reference. 5:389–396.
- [54] Kusuda, T. and Achenbach, P. R. (1965). Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States. Technical report, National Bureau of Standards Gaithersburg MD.

- [55] Lamarche, L. and Beauchamp, B. (2007a). A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. *Energy and Buildings*, 39(2):188–198.
- [56] Lamarche, L. and Beauchamp, B. (2007b). New solutions for the short-time analysis of geothermal vertical boreholes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(7):1408 – 1419.
- [57] Li, M. and Lai, A. (2012). Parameter estimation of in-situ thermal response tests for borehole ground heat exchangers. *Journal of Heat Mass Transfer*, (55):2615–2624.
- [58] Li, M., Li, P., Chan, V., and Lai, C. (2014). Full-scale temperature response function (g-function) for heat transfer by borehole ground heat exchangers (ghes) from sub-hour to decades. *Applied Energy*, 136:197 – 205.
- [59] Li, W., Li, X., Peng, Y., Wang, Y., and Tu, J. (2018). Experimental and numerical investigations on heat transfer in stratified subsurface materials. *Applied Thermal Engineering*, (135):228–237.
- [60] Li, Y., Geng, S., Han, X., Zhang, H., and Peng, F. (2017). Performance evaluation of borehole heat exchanger in multilayered subsurface. *Sustainability*, (9(3)):356.
- [61] Liu, X. and Hellström, G. (2006). Enhancements of an integrated simulation tool for ground-source heat pump system design and energy analysis. In *Proceedings of Ecstock 2006*. The Richard Stockton College of New Jersey.
- [62] Luo, J., Tuo, J., Huang, W., Zhu, Y., Jiao, Y., Xiang, W., and Rohn, J. (2018). Influence of groundwater levels on effective thermal conductivity of the ground and heat transfer rate of borehole heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, (128):508–516.
- [63] Man, Y., Yang, H., and Wang, J. (2010). Study on hybrid ground-coupled heat pump system for air-conditioning in hot-weather areas like hong kong. *Applied Energy*, 87(9):2826–2833.
- [64] Molina-Giraldo, N., Blum, P., Zhu, K., Bayer, P., and Fang, Z. (2011). A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(12):2506–2513.
- [65] Naili, N., Attar, I., Hazami, M., and Farhat, A. (2013). First in situ operational performance test of ground source heat pump in Tunisia. *Energy Conversion Management*, (75):292–301.
- [66] Ould-Lahoucine, C., Sakashita, H., and Kumada, T. (2002). Measurement of thermal conductivity of buffer materials and evaluation of existing correlations predicting it. *Nuclear Engineering and Design*, 216(1-3):1–11.
- [67] Ozisik, M. N. (2018). *Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications*. Routledge.
- [68] Palaitis, Ž. (2012). Ground research in high technology park at mokslininkų str. 6, Vilnius. Technical report, Lithuanian Geological Survey.
- [69] Palaitis, Ž. and Indriulionis, A. (2012). Evaluation of ground thermal properties and specification of the geological structure using thermal response test, natural gamma, and resistivity data. *Geologija*, 80(4).
- [70] Palaitis, Ž. and Indriulionis, A. (2015). Geologinių sluoksnių šilumos charakteristikų tyrimas ir jų naudojimo galimybės Lietuvoje. *Geologijos akiračiai*, 16(45):16–26.
- [71] Park, H., Lee, S., Yoon, S., Shin, H., and Lee, D. (2012). Case study of heat transfer behaviour of helical ground heat exchanger. *Energy Buildings*, (53):137–144.
- [72] Popov, R., Georgiev, A., and Dzhonova, D. (2015). Stochastic search methods used for parameter estimation of thermal properties.



- [73] Popov, R., Georgiev, A., and Dzhonova-Atanasova, D. (2016). Parameter estimation of borehole thermal properties using artificial intelligence methods. *BULGARIAN CHEMICAL COMMUNICATIONS*, 48:88–95.
- [74] Rainieri, S., Bozzoli, F., and Pagliarini, G. (2011). Modeling approaches applied to the thermal response test: a critical review of the literature. *HVAC&R Resolution*, 17(6):966–990.
- [75] Raymond, J. and Lamarche, L. (2014). Development and numerical validation of a novel thermal response test with low power source. *Geothermics*, (51):434–444.
- [76] Raymond, J., Therrien, R., L.Gosselin, and Lefebvre, R. (2011). A review of thermal response test analysis using pumping test concepts. *Ground Water*, 49(6):932–945.
- [77] Reuss, M., Beck, M., and Müller, J. (1997). Design of a seasonal thermal energy storage in the ground. *Solar Energy*, 59(4):247–257.
- [78] Roth, P., Georgiev, A., and Barraze, E. (2004). First in situ determination of ground and borehole thermal properties in Latin America. *Renewable Energy*.
- [79] Sakata, Y., Katsura, T., and Nagano, K. (2018). Multilayer-concept thermal response test: Measurement and analysis methodologies with a case study. *Geothermics*, (71):178–186.
- [80] Sanner, B., Hellström, G., Spitler, J., and Gehlin, S. (2005). Thermal response test—current status and world-wide application. In *Proceedings world geothermal congress*, pages 24–29. International Geothermal Association.
- [81] Sharqawy, M. H., Said, S. A., Mokheimer, E. M., Habib, M. A., Badr, H. M., and Al-Shayea, N. A. (2009). First in situ determination of ground thermal conductivity for borehole heat exchanger applications in Saudi Arabia. *Renewable Energy*, (34):2218–2223.
- [82] Shirazi, A. and Bernier, M. (2014). A small-scale experimental apparatus to study heat transfer in the vicinity of geothermal boreholes. *HVAC&R*, 20(7):819–827.
- [83] Shonder, J. and Beck, J. (2000). Field test of a new method for determining soil formation thermal conductivity and borehole resistance. *ASHRAE Transactions*, 106(1):643–850.
- [84] Spitler, J. D. (2000). GLHEPRO - a design tool for commercial building ground loop heat exchangers. In *Proceedings of the fourth international heat pumps in cold climates conference*, pages 17–18.
- [85] Stankevičiūtė, S. and Guobytė, R. (2012). Vilniaus miesto inžinerinių geologinių duomenų bazės sukūrimas. Technical report, Lietuvos geologijos tarnyba.
- [86] Thornton, J., McDowell, P., et al. (1997). Residential vertical geothermal heat pump system models: calibration to data. *ASHRAE Transactions*, 103:660–674.
- [87] Yavuzturk, C. (1999). *Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems*. Phd thesis, Oklahoma State University.
- [88] Yavuzturk, C. and Spitler, J. D. (1999). A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers. *ASHRAE Trans.*, 105(2):475–485.
- [89] Yu, Y., Ma, Z., and Li, X. (2008). A new integrated system with cooling storage in soil and ground-coupled heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 28(11):1450–1462.
- [90] Zeng, H. Y., Diao, N. R., and Fang, Z. H. (2002). A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers. *Heat Transfer—Asian Research*, 31(7):558–567.
- [91] Zhang, L., Zhang, L., Chen, J., Wang, J., and Huang, G. (2018). Estimation of soil and grout thermal properties for ground-coupled heat pump systems: Development and application.

*Applied Thermal Engineering*, 143:112–122.

- [92] Zhang, Q., Man, X., and Zhang, L. (2017). Parameter Estimation of Soil and Grout Thermal Properties Based on Genetic Algorithm. *Hunan Daxue Xuebao Journal of Hunan University Natural Sciences*, 44:151—156.

# Publikacijų sąrašas

## Straipsniai

1. Palaitis Ž., Indriulionis A., 2015. Geologinių sluoksnių šilumos charakteristikų tyrimas ir jų naudojimo galimybės Lietuvoje. Geologijos akiračiai. Nr.2, 11-15.ISSN 1392-0006.
2. Indriulionis, A., Palaitis, Ž., Šinkūnas, P., Mokrik, R., 2018. Numerical modelling of vertical borehole heat transfer performance under Lithuanian Quaternary conditions. *BALTICA*, Vol. 31, No. 2, 146–153, <https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.14>.
3. Indriulionis A., Šinkūnas P., Mokrik R., 2019. Estimation of the vertical borehole thermal parameters based on the evolution algorithm using temperature response functions. *Estonian Journal of Earth Sciences*, Vol. 68, No. 1, <https://doi.org/10.3176/earth.2019.02>.

# Tarptautinių ir Lietuvos konferencijų pranešimai ir tezės

1. Palaitis Ž., Indriulionis A., Satkūnas J., Šinkūnas P. Ground thermal properties evaluation of quaternary section: by example of High-Tech research center, the 9<sup>th</sup> Baltic Stratigraphic Conference Vilnius 2014, Lithuania.
2. Palaitis Ž., Indriulionis A., Satkūnas J., 2015. The influence of geological conditions for geothermal parameters using TRT data from Alytus city (Lithuania). 6th European Geothermal PhD Day 2015 Delft, The Netherlands.
3. Indriulionis A., Bielskus J. and Vaitkus P. 2016. New radial basis function method modelling borehole heat transfer: a theoretical survey. XXI international master and PhD students conference 'Information Society and University Studies', ISSN 2029-4824.
4. Indriulionis A., Vaitkus P., 2015. Uolienu šiluminių parametru vertinimas 'įdarbinant' evoliucinius algoritmus. Lietuvos matematikų draugijos 56-oji konferencija.
5. Indriulionis A., Vaitkus P., 2016 New radial basis function method modelling borehole heat transfer: a practical application, Lietuvos matematikų draugijos 57-oji konferencija. Proc. of the Lithuanian Mathematical Society, Ser. A Vol. 57, psl. 6, ISSN 0132-2818 , DOI: 10.15388/LMR.A.2016.04.

# Curriculum Vitae

## Asmeninė informacija

**Vardas, Pavardė:** Audrius Indriulionis

**Telefono nr.:** +370 687 73127

**Gyvenamoji vieta:** Kvakšių km., Alionių seniūnija, LT-19154 Širvintų rajonas

**E-mail:** audrius.indriulionis@gmail.com

**Skype:** audrius.indriulionis

## Išsilavinimas

Juozo - Tumo Vaižganto vidurinė mokykla (1984 - 1995), Rokiškis.

Taikomosios matematikos bakalauras (1995 - 1999), Vilniaus Universitetas.

Taikomosios matematikos magistro diplomą (1999 - 2002), Vilniaus Universitetas.

## Mokslinė patirtis

2014 birželis - 2017 rugsėjis: laborantas, Pastato energetinių ir mikroklimato laboratorija, Pastatų energetikos katedra, Aplinkos inžinerijos fakultetas, Vilniaus Gediminas Technikos Universitetas, Lietuva.

2015 rugsėjis - 2017 rugsėjis: programuotojas, hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos katedra, Gamtos mokslų fakultetas, Vilniaus Universitetas, Lietuva.

2016 balandis - 2018 gruodis: jaunesnysis tyrėjas, Baltijos pažangių technologijų institutas.

## Moksliniai tiriamieji projektai

- Mokslinis tyrimas Nr. 01.2.2-LMT-K-718-01-0060 'Papildančios tikrovės kompleksiniai tyrimai socialiai neįgaliesiems (akliesiems ir silpnaregiams)' finansuojamas Europos regioninės plėtros fondo lėšomis pagal priemonės Nr. 01.2.2-LMT-K-718 veiklą 'Aukšto lygio tyrėjų grupių vykdomi moksliniai tyrimai', pozicija: mokslo tyrėjas nuo 2018 metų kovo mėnesio Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas.
- Technologinės plėtros projektų finansavimo priemonė finansuojama MITA '12V baterija', nuo 2017 spalio iki 2018 metų gruodžio, Baltijos pažangių technologijų institutas kartu Energus Power Solutions, tyrėjas.
- 'Lygiagrečiosios kinematikos pozicionavimo sistemų kūrimas', Baltijos pažangių technologijų institutas kartu UAB 'STANDA'; tyrėjas; nuo 2017 metų balandžio mėnesio iki 2018 spalio mėnesio.
- Analizės, modeliavimo ir rizikos valdymo kompetencijų centro (i.MAMC) įkūrimas 10.1.1-ESFA-V-912-01-0001, Vilniaus Universitetas, nuo 2016 spalio iki 2018 spalio, tyrėjas.

# Užrašams



Vilniaus universiteto leidykla  
Universiteto g.1, LT-01513 Vilnius  
El. p. [info@leidykla.vu.lt](mailto:info@leidykla.vu.lt),  
[www.leidykla.vu.lt](http://www.leidykla.vu.lt)  
Tiražas 12 egz.