

2019 m. kovo 28 d. **Audrius Indriulionis** Gamtos tyrimų centre (GTC) apgynė geologijos mokslo krypties disertaciją „Įvairiasluoksnių kvartero nuogulų šilumos perdavimo modelis ir šilumos parametrų vertinimas vertikaliais šilumos kolektoriais“. Mokslinis vadovas dr. Petras Šinkūnas.

*Audrius Indriulionis, Gamtos tyrimų centras*

*Petras Šinkūnas, Gamtos tyrimų centras, Vilniaus universitetas*

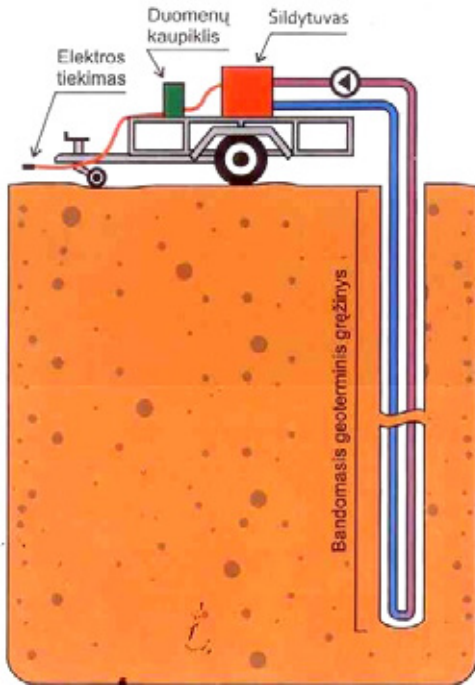
## **PRAKTIŅĖ EFEKTYVIŲ MATEMATINIŲ METODŲ NAUDA SEKLIJOJE GEOTERMIOJE TAIKANT *IN SITU* ŠILUMINIO ATSAKO BANDYMUS**

Apskaičiuoti sekliosios geoterminės energijos potencialą ypač svarbu, kai norima nustatyti vertikaliais kolektoriais, įrengtais Lietuvoje būdingoje sudėtingos sandaros kvartero nuogulų stovymėje, išgaunamos energijos kiekį. Ši sekliosios geotermijos praktinio taikymo sritis labai plati ir reikalauja keleto skirtingų mokslo disciplinų žinių bei praktinės patirties. Tai ir technologinis inžinerinis šiluminio atsako bandymas (TRT, angl. *thermal response test*), ir geoinžinerinių bei hidrogeologinių parametrų, tokių kaip ledyninių nuosėdų dalelių dydžio pasiskirstymas, nuosėdų šilumos laidumas ir talpa, kitos fizikinės savybės, stovymės hidrogeologinės sąlygos ir kt., nustatymas ir vertinimas, taip pat šilumos perdavimo vertikaliais kolektoriais matematinis modeliavimas, modelio sprendinį gaunant skaitiniais ir analitiniais metodais. Šio straipsnio autorius Audrius Indriulionis, vykdydamas tyrimus, kuriuos pristatė savo disertaciniame darbe (Indriulionis, 2019), rėmėsi įvairiomis matematinio modeliavimo ir skaičiavimo metodikomis bei programavimo patirtimi, įgalinusiai pritaikyti efektyvius vertinimo algoritmus ir atlikti šilumos modeliavimo simuliacijas.

Šioje publikacijoje pateikiami disertaciją rengiant gauti praktiniai rezultatai, įžvalgos bei patirtis geologams, hidrogeologams ir

geologams inžinieriams gali būti naudingi keliais aspektais. Pirma, kaip pirmosios lietuviškos TRT aparatūros sukūrimo ir bandymo rezultatai; antra, kaip aukštos kokybės TRT eksperimento duomenų matematinės simuliacijos, taip pat kaip daugiasluoksnių geologinės stovymės šilumos laidumo vertikaliais kolektoriais modeliavimas ir įžvalgos, ką dar reikėtų atlikti, norint plėtoti šią mokslo ir taikomosios geologijos sritį.

Rengiant disertacinį darbą panaudoti kelių šaltinių eksperimentinių tyrimų duomenys. Vienas jų – Vilniuje Mokslininkų gatvėje 2012–2014 m. įmonės UAB „BOD Group“ įrengta 117 vertikalių kolektorių ir geoterminių šilumos siurblių sistema. Geologinė ir hidrogeologinė informacija surinkta ir Lietuvos geologijos tarnybos prie Aplinkos ministerijos fonduose bei iš įvairių publikacijų, o vietovės hidrodinaminiai parametrai įvertinti UAB „Vilniaus hidrogeologija“. Taip pat buvo panaudoti ir Vokietijos įmonės „Stiebel Eltron“ pateikti TRT eksperimento duomenys, gauti iš konsultacinės įmonės UAB „Hidro Geo Consulting“, o dalį duomenų pavyko rasti pačios UAB „Hidro Geo Consulting“ ataskaitose, pateiktose Lietuvos geologijos tarnybai. Specialioje laboratorijoje gautais eksperimentiniais TRT duomenimis mielai pasidalijo ir dr. Saqib'as Javed'as iš Švedijos Chalmers technologijų universiteto bei prof. dr. Bo Nordell'is,



1 pav. *In situ* šiluminio atsako bandymo (TRT) aparatūros schema

leidęs naudotis eksperimentiniais TRT duomenimis, surinktais iš įvairių šalių.

## EKSPERIMENTINIS APARATŪROS TAIKYMAS

Sekliąja geotermija A. Indriulionis pradėjo domėtis 2013 m., kai Žygimanto Palaičio iniciatyva praktiškai atliko matematinius skaičiavimus, remdamasis įmonės UAB „Hidro Geo Consulting“ (HGC-LTU) atskaitose pateiktais duomenimis. Pirmiausia jis pastebėjo, kad Lietuvos įmonės TRT eksperimentams atlikti dažnai samdosi užsienio specialistus. Tuo metu šio eksperimentinio tyrimo ir skaičiavimų kaina buvo gana aukšta, o paskirsty-

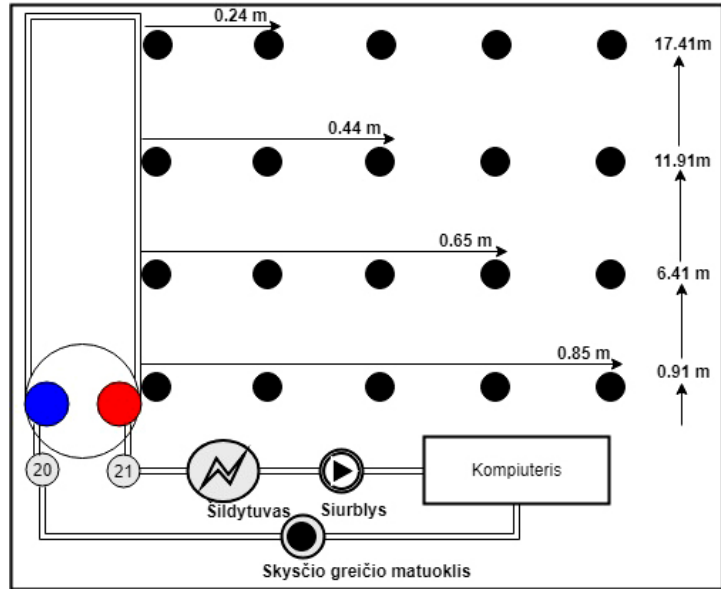
tas šiluminio atsako bandymas (angl. *distributed thermal response test*), kai šiluminį atsaką norima fiksuoti iš skirtingų geologinių sluoksnių, kainavo 3–4 kartus brangiau. Paprastai verslo įmonės, kurios užsakydavo tokius darbus, nesidalydavo šilumos atsako eksperimento duomenimis ir gautais rezultatais, taip pat nepateikdavo ir eksperimente naudotos aparatūros techninių ar matavimo prietaisų neapibrėžčių. Tai paskatino imtis aktyvių veiksmų kuriant ir bandant *in situ* eksperimentinę TRT aparatūrą (1 pav.). TRT aparatūrą sudaro elektriniai kaitinimo elementai, kuriais šildomas cirkuliuojantis skystis, o cirkuliacinis skysčio siurblys veikia abiem kryptimis. Aparatūra eksperimento metu kompiuteryje kaupia lauko oro ir skysčio temperatūros, skysčio cirkuliacijos greičio, elektrinių kaitinimo elementų (tenų) veikimo duomenis.

HGC-LTU bendradarbiaudama su Baltijos pažangių technologijų institutu (BPTI) 2014 m. liepos mėnesį Lietuvos mokslo technologijų agentūrai (MITA) pateikė paraišką dėl priemonės VP2-1.3-ŪM-05-K „Inočekiai LT“ kvietimo Nr. 03 projekto finansavimo. Vykdamas šį MITA finansuotą praktinį projektą buvo atlikta esamų TRT aparatūros sprendimų analizė. A. Indriulionis, vykdydamas MITA projektą, susipažino su geologais mokslininkais iš UCD universiteto Airijoje, tarp jų ir su dr. Mike Long'u, kurie kartu su įmonės „GeoServ



2 pav. Veikiantis HGC-LTU eksperimentinis prototipas (Palaitis, Indriulionis, 2015)

3 pav. Matavimo taškų išdėstymo schema vienoje smėlio dėžės pusėje (Indriulionis ir kt., 2019)



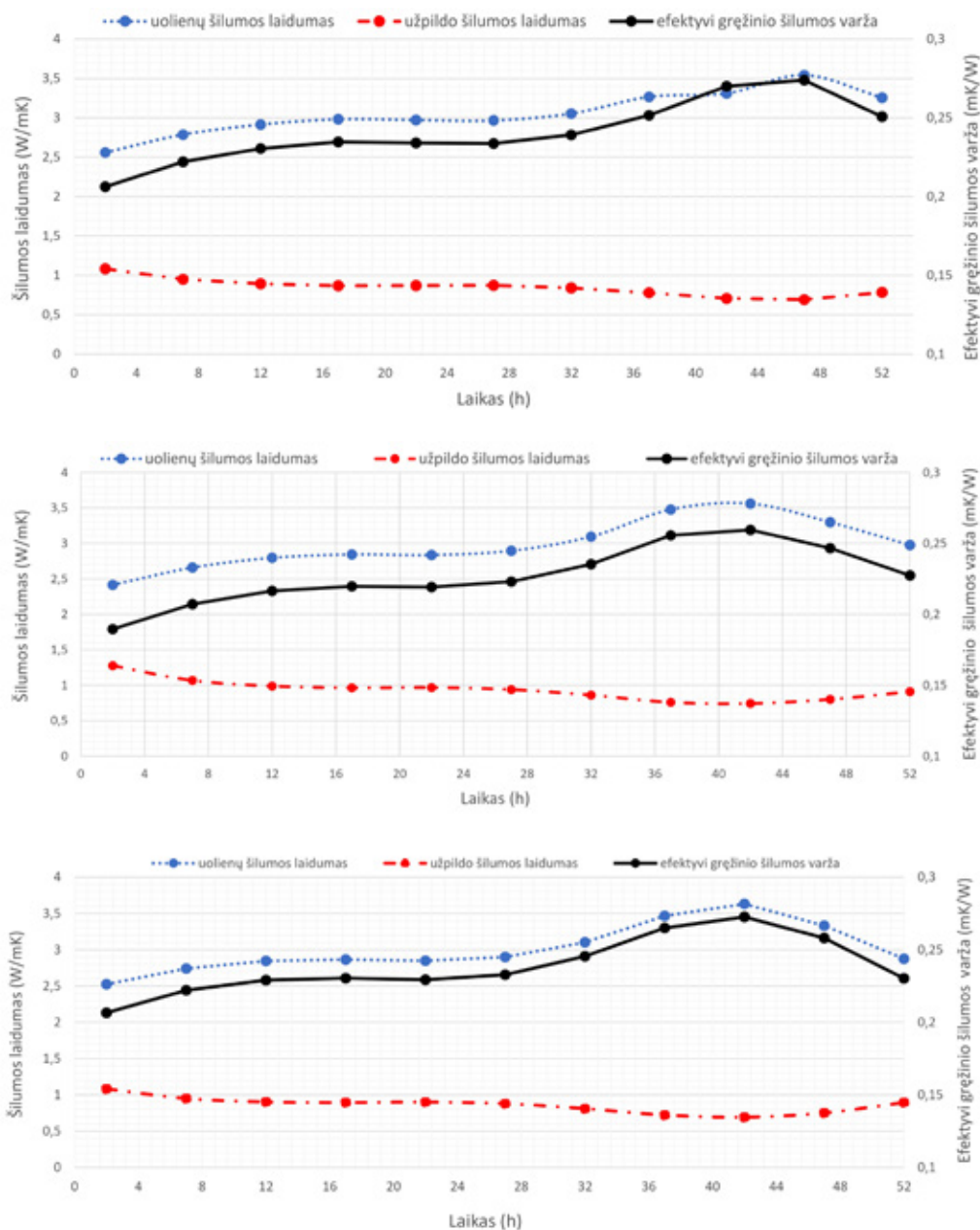
Solutions“ lyderiu Riccardo’u Pasquali’u sukonstravo sąlyginai pigią ir efektyvią TRT aparatūrą. R. Pasquali’is sutiko atvykti į Lietuvą ir atlikti kelis aukštos kokybės TRT eksperimentus, jei pavyktų gauti keletą verslo objektų užsakymų, šitaip padengiant būtinais išlaidas. Deja, šios pastangos buvo nesėkmingos, nes „GeoServ Solutions“ bendrovės verslo pasiūlymai Lietuvos įmonėms buvo komerciškai nepatrauklūs.

Šių eksperimentų pagrindinis tikslas – remiantis eksperimentiniais duomenimis įvertinti efektyvias uolienu šilumos laidumo ir gręžinio varžos parametrų reikšmes, be kurių neįmanomas šilumos perdavimo modeliavimas vertikaliais kolektoriais. Be abejo, praktikoje geologai inžinieriai remiasi „ASHRAE Handbook“ (2011) rekomendacijomis, kuriose pateikti siūlymai, kaip kokybiškai atlikti *in situ* TRT eksperimentą ir gautus duomenis panaudoti analizei. Tuo metu tokių specialistų Lietuvoje taip pat nebuvo. Projekto pabaigoje 2015 m. pirmame ketvirtyje buvo sukurtas pirmasis lietuviškas HGC-LTU TRT eksperimentinis prototipas, kuris paveikslėlyje (2 pav.) matomas veikiančias, sujungtas lanksčia jungtimi su vertikaliu

šilumos kolektoriumi. Naudojant šią aparatūrą vykdyti keli šiluminio atsako bandymai (TRT) ir gauti eksperimento duomenys, o jų pagrindu buvo atlikti keli skirtingi skaičiavimai bei pateikti jų rezultatai. Vykdamas minėtą projektą taip pat kilo idėja uolienu šilumos laidumo ir gręžinio šilumos varžos parametrams vertinti plačiau taikyti evoliucinius algoritmus, tokius kaip diferencialinės evoliucijos (DE), genetinis (GA) ir dalelių spiečiaus optimizavimo (PSO) algoritmai. Detalioje ataskaitoje pateiktos išvados ir rekomendacijos, susijusios su eksperimentinio prototipo tobulinimu, siekiant sukaupti kokybiškus ir patikimus tyrimo duomenis. Atlikus šį tyrimą gauti preliminarūs rezultatai buvo publikuoti pirmoje publikacijoje (Palaitis, Indriulionis, 2015). Atliekant tyrimus panaudoti ir prof. dr. B. Nordell’io pateikti eksperimentiniai TRT duomenys bei geriausia kitų šalių tyrimų ir analizės praktikos patirtis.

## EFEKTYVUS ŠILUMOS PARAMETRŲ VERTINIMAS

Ši praktinė patirtis parodė, kad be ypač patikimų duomenų negalima moksliskai



4 pav. Šilumos parametrų įverčiai, gauti atsiktinių dalelių spiečiaus optimizavimo (PSO) algoritmu  $G_{ILS}$ ,  $G_{1CS}$  ir  $G_{FLS}$  šilumos perdavimo metodais (Indriulionis, 2019)

pagrįsti naujų efektyvesnių matematinų metodų taikymo būdų. O kokybiški TRT eksperimentiniai duomenys gali būti gauti tik specialiai įrengtose eksperimentinėse laboratorijose, vadinamosiose smėlio dė-

žėse. Eksperimentinė laboratorija smėlio dėžė užtikrina laboratorines sąlygas, kuriose yra žinoma geologinė aplinka, stabilus TRT aparatūros veikimas ir besąlygiškai kokybiškas duomenų kaupimas viso



2 lentelė. Kvartero nuogulų hidrologiniai parametrai *in situ* šiluminio atsako bandymo (TRT) vietoje

Sluoksnio Nr.	Geologinis indeksas	Litologija ir drėgnumas	Filtracijos koeficientas (m/d)	Aktyvūs 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 žvyras	$7 \cdot 10^{-4}$	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	nelaidus priemolis	$7 \cdot 10^{-4}$	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	$7 \cdot 10^{-4}$	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	$7 \cdot 10^{-4}$	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	$7 \cdot 10^{-4}$	0,09	76–97	19	
11	f II dn-žm	drėgnas smėlis	5	0,2	97–105	8	0,016
12	g II dn	nelaidus priemolis	$7 \cdot 10^{-4}$	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	$7 \cdot 10^{-4}$	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	$7 \cdot 10^{-4}$	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	

tobulinimu ir naujų sprendinių paieška. Norint įsitikinti taikomo metodo tinkamumu praktikoje privalu naudoti tokio tipo TRT duomenis, kad tokiu būdu eksperimentuojant būtų įgyta būtina seklosios geotermijos matematinio modeliavimo patirtis. Efektyvesniam uolienu šilumos laidumo ir gręžinio šilumos varžos parametru įvertinimui pritaikytas dalelių spiečiaus optimizavimo (PSO) algoritmas, efektyviai atliekantis lygiagrečią paiešką ir galintis pasitarnauti geologams inžinieriams ir praktikams, vykdančioms šiluminio atsako bandymus.

Svarbu pažymėti kelis esminius evoliucinių algoritmu, tarp jų ir pritaikyto PSO algoritmo, privalumus. Pirmia, ieškomi parametrai nustatomi paraleliai, t. y. vienu metu. Antra, pavyko patvirtinti, kad TRT eksperimento trukmė gali būti gerokai trumpesnė, bet turi tenkinti sąlygą  $t_b \geq \frac{5r_b^2}{\alpha_g}$ , čia  $r_b$  – gręžinio spindulys,  $\alpha_g$  – gręžinio užpildo šilumos sklaida. Tokią pat sąlygą nustatė ir L. Zhang'as su bendraautoriais (Zhang ir kt., 2018), taikydami evoliucinį genetinį algoritmą. Trečia, atsitiktinių dalelių spiečiaus optimizavimo (PSO) algoritmu tikslūs ir stabilūs šilumos parametru įverčiai gauti visais šilumos perdavimo metodais (4 pav.):  $G_{ILS}$  (begalinio ilgio tiesinio šaltinio),  $G_{ICS}$

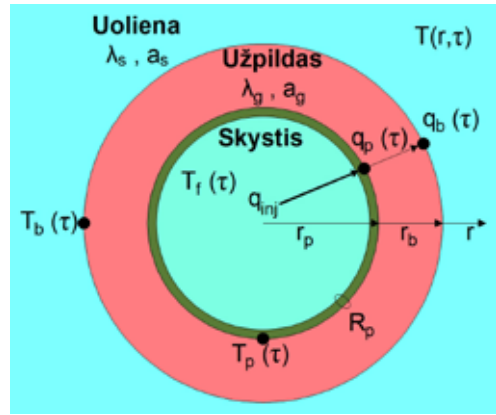
(begalinio ilgio cilindrinio šaltinio) ir  $G_{FLS}$  (baigtinio ilgio tiesinio šaltinio). Duomenų analizę būtina susieti su tyrimo ir duomenų kaupimo pradžios momentu. Praktikoje pasitaiko TRT duomenų analizės rezultatų, kai eksperimento pradžios duomenys yra atmetami daugiau nei 2–3 valandas, o tai iš esmės nėra moksliskai pagrįsta.

Mokslinėse publikacijose parametrai dažnai pateikiami be paklaidų dydžių, tai neleidžia įvertinti taikomo metodo patikimumo ir algoritmo veikimo privalumų. Šio tyrimo metu gautų terminų parametru statistika pateikta 1 lentelėje. Gauta vidutinė kvadratinė paklaida yra 0,03 °C. Ši reikšmė yra beveik lygi temperatūros matavimo prietaiso tikslumo reikšmei (Indriulionis ir kt., 2019). Papildomai vertinta ir uolienu šilumos laidumo bei gręžinio šilumos varžos įtaka parametru paklaidoms, t. y. matavimų nukrypimams (Indriulionis, 2019).

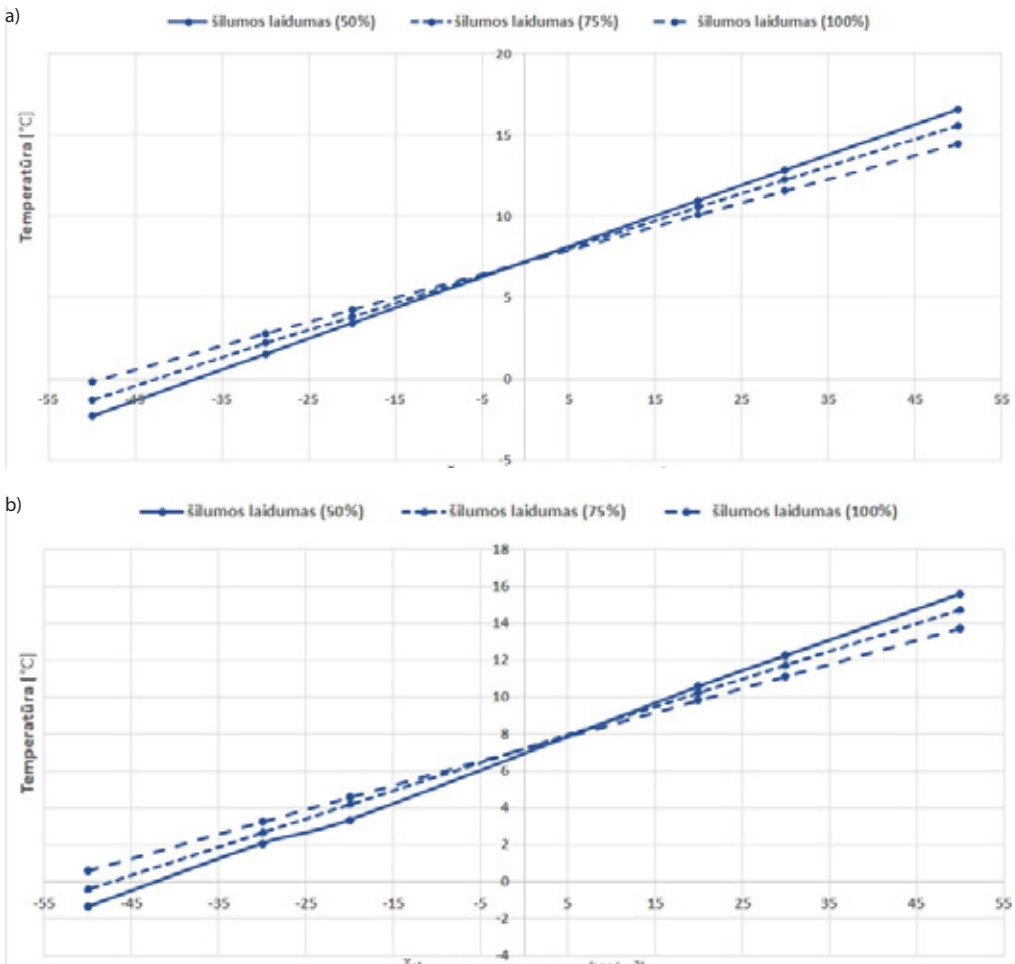
## DAUGIASLUOKSNĖS GEOLOGINĖS STORYMĖS ŠILUMOS PERDAVIMO MODELIAVIMAS

*In situ* šilumos atsako eksperimentui naudotas vertikalus kolektorius, įmontuotas daugiasluoksniame kvartero nuogulų storymėje, slūgsančioje virš kreidos (K)

sistemos aleurito sluoksnio (5 pav.). Kolektoariaus kertamoje geologinėje stovymėje buvo išskirta 20 skirtingos litologijos vandeniui laidžių ir nelaidžių sluoksnių (2 lentelė). Praktinis vertikalaus kolektoariaus skaičiavimo realizavimas susijęs su 6 pav. pateiktais dydžiais bei supaprastinta vertikalaus kolektoariaus veikimo 2D schema, kur  $u_b(r_b, \tau)$  – temperatūra gręžinio sienelėje,  $q_b(\tau)$  – išgaunamas šilumos kiekis, o skysčio vertikaliame kolektoariuje temperatūra lygi  $u_r(\tau) + u_b(r_b, \tau) = R_b \cdot q_b(\tau)$ . Praktinio tyrimo eiga toliau pateikiama pažingsniui:



6 pav. Vertikalaus šilumos modeliavimo kolektoariaus 2D schema



7 pav. Vieno mėnesio šilumos srauto normos priklausomybė nuo skysčio temperatūros: a) su požeminio vandens judėjimu, b) be požeminio vandens judėjimo

1. Reikia parinkti tinkamą U formos vamzdelio aproksimaciją į vieną vamzdelį, o tai priklauso nuo atstumo tarp U formos vamzdelio centrų. Iš praktikos žinoma, kad tai tiesiogiai sąlygoja  $R_b$  reikšmės tikslumą (Indriulionis ir kt., 2018);
2. Iš TRT eksperimentinių duomenų nustatyti efektyvias uolienu šilumos laidumo ir gręžinio šilumos varžos reikšmes;
3. Skaitinio daugiasluoksnio šilumos perdavimo modelio „Cosol Multiphysics“ programa gautos reikšmės pirmiausia turi būti palyginamos su gautomis specializuota programa „Earth Energy Designer“ tiek vieno vertikalaus kolektoriaus, tiek kolektorių masyvo atveju;
4. 3 žingsnyje minėtas modeliavimas turi būti vykdomas taikant šiluminio atsako bandymo (TRT) duomenis pagal suprojektuotus pastato šilumos ir šalčio suvartojimo kiekius vienu metų laikotarpiu;
5. Pamatuoti skysčio temperatūros nukrypimus ir paklaidas tarp faktinių eksperimento ir gautų skirtingomis šilumos modeliavimo programomis;
6. Tik kokybiškai atlikus 1–5 žingsnius galima vykdyti daugiasluoksnės geologinės stovymės simuliacijas šilumos energijai vertinti. Tam nustatytos 1 mėnesio temperatūrinės priklausomybės su požeminio vandens judėjimu ir be požeminio vandens judėjimo (7 pav.).

Šią simuliaciją galima patobulinti gavus praktinius bent 365 dienų duomenis apie išgautos faktinės šilumos energijos kiekius,

šilumos siurblių veikimą / neveikimą bei skysčio ir gręžinio sienelės temperatūros duomenis susiejant su faktiniais hidrodinaminiais ir filtracijos koeficientų matavimais skirtinguose sluoksniuose.

Siekiant toliau plėtoti sekliosios geotermijos tyrimus Lietuvoje būtina:

- sukurti praktinį TRT eksperimentų poligoną su keliais eksperimentiniais vertikaliais šilumos kolektoriais;
- šiame poligone turi būti atliekami vandens lygio, filtracijos koeficientų nustatymo skirtinguose sluoksniuose praktiniai tyrimai;
- būtų galimybė atlikti TRT eksperimentus skirtingais metų laikais, esant skirtingoms šilumos įpumpavimo ar išgavimo normoms;
- TRT eksperimentus atlikti taikant patikimą TRT aparatūrą, kurią galima išsinuomotuoti iš verslo įmonių;
- instaliuoti vertikalių šilumos kolektorių tiriomojoje vietovėje siekiant atlikti paskirstytą (angl. *distributed*) TRT eksperimentą;
- į tyrimus pritraukti daugiau geologų, hidrogeologų ir inžinierių geologų, su mokslininkų ir tyrėjų bendruomene nuolat dalytis žiniomis ir patirtimi;
- Vilniaus universiteto geologijos, hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos paskaitose studentai turi gauti daugiau žinių apie įvairių šilumos perdavimo modelių taikymą, taip pat ir apie uolienu šiluminio laidumo, šiluminės talpos bei specifinius hidrodinaminis parametrus.

## LITERATŪRA

- ASHREA Handbook 2011 – HVAC Applications – SI Edition (Ashrae Handbook: Heating Ventilation and Air Conditioning Applications Si), 2011, 1102 p.
- Beier, R. A., Smith, M. D., Spitler, J. D. Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis. *Geothermics*, 2011, 40(1), p. 79–85.
- Indriulionis, A., Palaitis, Ž., Šinkūnas, P., Mokrik, R. Numerical modelling of vertical borehole heat exchangers performance under Lithuanian Quaternary conditions. *Baltica*, 2018, 31(2), p. 146–153.
- Indriulionis, A. Ivariasluoksnų kvartero nuogulų šilumos perdavimo modelis ir šilumos parametru vertinimas vertikaliais šilumos kolektoriais. Daktaro disertacija, 2019, 85 p.
- Indriulionis, A., Palaitis, Ž., Šinkūnas, P., Mokrik, R. Estimation of the vertical borehole thermal parameters based on the evolution algorithm using temperature response functions. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2019, 68(1), p. 15–25.
- Palaitis, Ž., Indriulionis, A. Geologinių sluoksnų šiluminių charakteristikų tyrimas ir jų naudojimo galimybės Lietuvoje. *Geologijos akiračiai*, 2015, 2, p. 11–15.
- Zhang, L., Chen, J., Wang, J., Huang, G. Estimation of soil and grout thermal properties for ground-coupled heat pump systems: Development and application. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 143, p. 112–122.