

OBNOVITELNÁ ENERGIA ZO ZAKLADANIA STAVIEB

RENEWABLE ENERGY BY FOUNDATION OF BUILDINGS

Juraj Slavkov^{*,1}

*juraj.slavkov@stuba.sk

¹Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra geotechniky, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

Abstrakt

Priemysel čelí novým výzvam v oblasti udržateľnosti s cieľom dosiahnuť uhlíkovú neutralitu kvôli potrebe znížiť masívne znečistenie životného prostredia, ktoré sa v posledných desaťročiach vystupňovalo. Stavebný priemysel na tieto výzvy reaguje vývojom nových ekologických technológií. Odpoveďou na udržateľnosť v stavebníctve sú jednoznačne obnoviteľné zdroje energie. Ich správnu implementáciou je možné dosiahnuť pomerne veľké zníženie spotreby fosílnych palív. Medzi takéto technológie patria aj energetické pilóty. V ich vývoji sa dosiahol v posledných rokoch veľký pokrok, ale na ich efektívnejšie uplatnenie v stavebníctve sú stále potrebné výrazné vylepšenia technológie. Tento článok opisuje základné teoretické poznatky v oblasti energetických pilót a dôležité aspekty pri ich navrhovaní.

Klíčovú slova

Obnoviteľný zdroj energie, energetické pilóty, hĺbkové zakladanie, termické charakteristiky podlažia

Abstract

Industry is facing new sustainability challenges to achieve carbon neutrality due to the need to reduce the massive environmental pollution that has escalated in recent decades. The construction industry is responding to these challenges by developing new ecological technologies. The answer to sustainability in construction is renewable energy sources. By their correct implementation, it is possible to achieve a relatively significant reduction in the consumption of fossil fuels. Such technologies include energy piles. Recent research has made great strides in the development of energy piles, but significant improvements in technology are still needed. This article describes the basic theoretical knowledge in the field of energy piles and essential aspects of geotechnical design.

Key words

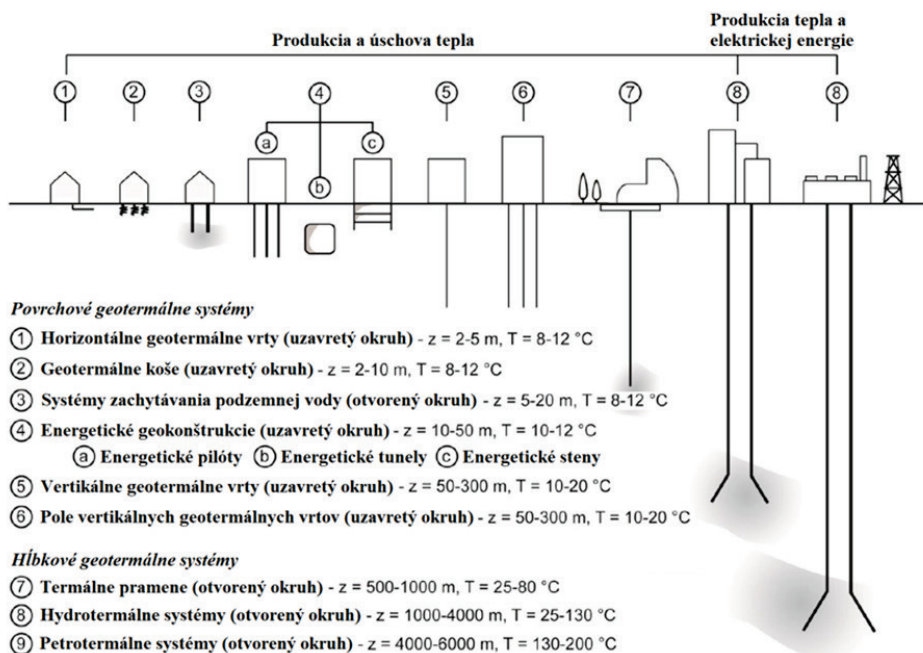
Renewable energy source, energy piles, deep foundation, thermal subsoil characteristics

1 ÚVOD

Geotermálna energia je prírodná termálna energia nachádzajúca sa pod povrchom Zeme. Predstavuje druhý najpočetnejší zdroj primárnej energie po slnečnej energii. Zaraďujeme ju do obnoviteľných zdrojov energie a možno ju považovať za riešenie pri vývoji bez uhlíkových stavieb. Geotermálnu energiu možno využiť kdekoľvek na planéte bez ohľadu na miesto a čas z dôvodu, že je jej produkcia konštantná a nachádza sa vo všetkých podpovrchových oblastiach Zeme.

Geotermálne systémy sú systémy, ktoré využívajú geotermálnu energiu. Skladajú sa z troch hlavných prvkov: zdroj tepla, chladič a výmenník tepla. Zdrojom tepla je Zem a chladičom horná stavba, v niektorých prípadoch môže dôjsť k obmene. Výmenník tepla je jeden alebo viacero prvkov obsahujúcich kvapalinu vymieňajúcu teplo medzi zdrojom a chladičom. Najviac používaná klasifikácia týchto systémov je na základe hĺbky. Ak sa jedná o konštrukcie s hĺbkou väčšou ako 400 m hovoríme o hĺbkových geotermálnych systémoch, v opačnom prípade o plytkých geotermálnych systémoch. Plytké geotermálne systémy sú na rozdiel od hĺbkových charakterizované nepriamym získavaním geotermálnej energie, ktoré používa zariadenia na reguláciu vstupu energie prenášanú medzi zemou a hornou stavbou [1].

Medzi plytké geotermálne systémy radíme geotermálne vrty, geotermálne koše, systémy zachytávajúce podzemnú vodu, vertikálne geotermálne vrty a energetické geokonštrukcie. Medzi hĺbkové geotermálne systémy radíme geotermálne pramene, hydrotermálne systémy a petrotermálne systémy, vid' Obr.1.



Obr. 1 Povrchové a hĺbkové geotermálne systémy [2].

Energetické pilóty sú nosné konštrukcie, ktorých primárnym účelom je prenos zaťaženia z hornej stavby do podlažia. Sekundárny účel týchto pilót je využitie potenciálu geotermálnej energie a teda fungujú ako geotermálne výmenníky tepla [3]. Patria medzi najrozšírenejšie energetické geokonštrukcie a to z dôvodu častejších realizácií klasických pilót. Sú vhodné na vykurovanie a chladenie hornej stavby, ohrev vody, rozmrazovanie, ale aj ako podzemné úložisko termálnej energie. Štandardne tieto energetické geokonštrukcie pozostávajú z výstužného koša, výplňového materiálu (betónu), rozvodných potrubí a ich príslušných armatúr.

Rovnako ako ostatné technológie na získanie obnoviteľnej energie sú energetické pilóty ekologickou technológiou, ktorá výrazne znižuje potrebu fosílnych zdrojov energie a tým aj znižuje emisie skleníkových plynov. Viac ako vhodné a efektívne je zapojenie energetických geokonštrukcií do spoločných systémov s inými obnoviteľnými technológiami. Na rozdiel od iných technológií má tento geotermálny systém malé priestorové nároky a je zabudovaný priamo v nosnej konštrukcii spodnej stavby. To zabezpečuje aj dodatočnú ochranu potrubí proti vonkajším vplyvom prostredia. Ďalšou výhodou je použitie betónu ako výplňového materiálu, pretože jeho tepelné vlastnosti sú priaznivejšie oproti bentonitu, ktorý sa používa pri iných systémoch. Polomer ohýbania potrubí je väčší v porovnaní s inými technológiami, čo zapríčiňuje menší odpor počas prietoku kvapaliny a tým aj menší čerpací výkon a teda aj nižšie náklady na prevádzku. Využívanie energetických pilót ako úložiska tepelnej energie do podlažia umožňuje získanie energie, ktorá by sa za iných okolností stratila.

Energetické pilóty sú štandardne zhotovované zo železobetónu. Z čisto technologického pohľadu je rozdiel medzi štandardnými a energetickými pilótami predovšetkým v tom, že do energetických pilót umiestňujeme potrubia. Tieto potrubia sú uchytené pozdĺž výstužného koša pilóty. Takéto riešenie je vhodné, aby nedošlo k potenciálnym problémom počas údržby pilóty alebo prostredia v bezprostrednom okolí. Potrubia sú vyhotovené z polyetylénu s vysokou hustotou. Priemer potrubí je štandardne v rozmedzí 10–40 mm a hrúbka stien potrubí je v rozmedzí 2–4 mm. V dôsledku kolísania teplôt je vhodné obaliť najviac exponované dĺžky potrubia tepelnoizolačným materiálom v závislosti od konkrétnych teplotných výkyvov. V samotných potrubíach je zabezpečené prúdenie kvapaliny pomocou elektricky poháňaných čerpadel, jej funkcia je prenos tepla medzi jednotlivými prvkami geotermálneho systému. Zvyčajne táto kvapalina pozostáva z vody s nemrznúcimi alebo slanými prísadami.

V praxi poznáme mnoho variácií rozmiestnenia potrubí. Rozmiestnenie ovplyvňuje obťažnosť pri ich ukladaní, samotnú prevádzku a prevádzkové náklady, pretože variantné konfigurácie ovplyvňujú čas montáže a dĺžku potrubí [4]. Pri energetických pilótach so štandardným priemerom sa najčastejšie využívajú potrubia viacnásobného tvaru U.

2 NAVRHOVANIE ENERGETICKÝCH PILÓT

Na návrh energetických pilót sa v praxi používajú numerické a analytické metódy. Vo všeobecnosti sa na návrh energetických pilót používa analytická metóda návrhu skupiny energetických pilót formou ekvivalentnej pilóty. Táto metóda spočíva v návrhu skupinového pilótového základu, ktorý sa následne pretransformuje na osamelú ekvivalentnú energetickú pilótu. Spomínaný postup zohľadňuje účinky skupinového základu. Výsledné hodnoty sadnutia pre medzný stav použiteľnosti sú odčítané z diagramov pre sadnutie, ktoré riešia problematiku mechanického aj termického sadnutia [1].

Charakteristiky podložia ovplyvňujúce návrh energetického systému

Okrem štandardných vstupov používaných pri výpočte hĺbkových základov je potrebné mať na zreteli termické a hydraulické charakteristiky podložia, ktoré zohrávajú významnú rolu na výsledný návrh energetického základu.

Medzi takéto charakteristiky podložia patrí predovšetkým tepelná vodivosť podložia λ_{soil} [W/m.°C]. Definujeme ju ako atribút udávajúci množstvo tepla kolmo prepúšťaného meranou plochou v danom teplotnom gradiente, teda vlastnosť uskutočňovať vedenie tepla [5]. Je to kľúčový parameter, ktorý charakterizuje geotermálny potenciál podložia [1]. Orientačné hodnoty tepelnej vodivosti sa nachádzajú v Tab. 1. Závisí od mineralogického zloženia, hustoty v suchom stave, vlhkosti a zrnitosti [6]. Tepelnú vodivosť podložia stanovujeme v laboratóriu pomocou špeciálnych meracích prístrojov. Na meranie tepelnej vodivosti skalných hornín a zemín v ustálených podmienkach sa používa metóda delenej tyče. V prechodných podmienkach sa na meranie používa metóda jednej sondy, táto metóda je vhodná aj na stanovenie súčiniteľa teplotnej vodivosti α_d [m²/s]. Správne laboratórne postupy zabezpečujú vysokú presnosť nameraných hodnôt. Zobrazenie metód na určenie tepelnej vodivosti so špecifikáciou je uvedené v Tab. 2. Napriek existencii viacerých metód na stanovenie tepelnej vodivosti zemín a skalných hornín je najvhodnejšou skúškou terénna skúška stanovenia teplotnej odozvy vo vrte [7].

Tab. 1 Tepelné vlastnosti vybraných materiálov [8].

Materiál	Hustota [kg/m ³]	Tepelná vodivosť [W/m.°C]
Vzduch [10 °C]	1,25	0,026
Voda [25 °C]	999,87	0,59
Ľad [0 °C]	917	2,25
Granit	2750	1,70-4,00
Vápenec	2300	1,26-1,33
Hliny	1450	1,28
Piesky	~2270	1,60-2,10

Tab. 2 Prehľadná tabuľka metód na stanovenie tepelnej vodivosti λ_{soil} [9].

Metóda	Vhodné pre zeminy	Vhodné pre skalné horniny	Poznámka
Metóda viacerých sond	áno	áno	Terénna a laboratórna skúška
Metóda jednej sondy	áno	áno	Laboratórna skúška vhodná najmä pre jemnozrnné neporušené vzorky
Metóda delenej tyče		áno	Laboratórna skúška vhodná najmä pre hrubozrnné zeminy
Neustálené vedenie tepla (TPS)	áno	áno	Laboratórna skúška vhodná najmä pre skalné horniny, nutné zväžiť použitie pre zeminy
Geotermálna odozva vo vrte (TRT)	áno	áno	Terénna skúška

Ďalšou dôležitou charakteristikou podložia je prirodzená teplota podložia T_0 [°C]. Stanovuje sa in situ s použitím termočlánkov alebo pomocou matematických vzťahov, kde je prirodzená teplota podložia funkciou

teploty v čase a hĺbky [10], [11]. Vyššia hodnota pôsobí priaznivo na návrh energetických pilôt, pretože znižuje riziko spojeného s progresívnym ochladzovaním podlažia a tým zjednodušuje optimalizáciu celého geotermálneho systému.

V neposlednom rade je pre návrh geotermálnych systémov dôležité stanoviť rýchlosť prúdenia podzemnej vody v_w [m/deň], je definovaná ako pohyb vody v podlaží. Tento parameter podlažia je veľmi dôležitý pre návrh geotermálnych systémov založených na energetických geokonštrukciách. Ak je rýchlosť prúdenia podzemnej vody v_w do 0,5–1,0 [m/deň] je umožnené sezónne uskladnenie tepla v podlaží. V opačnom prípade hovoríme o nadlimitnej hodnote, ktorá sezónne uskladnenie tepla neumožňuje. Čo znamená, že tepelná vodivosť podlažia nezohráva výraznú rolu v množstve extrahovanej energie. V tomto prípade za optimálnych podmienok je množstvo extrahovanej energie z podlažia výrazne väčšie [1]. Rýchlosť prúdenia podzemnej vody sa v Bratislave pohybuje v kvartéri v rozsahu 1.10^{-1} až 1.10^{-4} m/s. Pripustnosť jemnozrnných zemín (CS až CH) tvoriacich neogén v Bratislave v rozmedzí od $k = 1.10^{-8}$ m/s do $k = 1.10^{-10}$ m/s [12].

Množstvo extrahovanej energie

Základnou odlišnosťou návrhu energetického základu je potreba výpočtu množstva extrahovanej energie. Výpočet sa realizuje samostatne pre výpočet potreby vykurovania a chladenia.

V oboch prípadoch je potrebné poznať vrcholovú potrebu výkonu a koeficient výkonu tepelného čerpadla, z tých dvoch veličín sa určí potrebné množstvo extrahovaného výkonu. Na druhej strane je potrebné vyjadriť predpokladané množstvo extrahovaného výkonu so započítaním všetkých energetických pilôt, ktoré budú zapojené v geotermálnom systéme. Toto množstvo je rovné súčinu počtu pilôt, dĺžke pilôt a množstvu extrahovanej energie na meter bežný pilóty.

Podielom predpokladaného množstva extrahovaného výkonu z energetických pilôt a potrebného množstva extrahovaného výkonu určíme výsledné percentuálne vyjadrenie krytia potreby energie na vykurovanie a chladenie budovy. V prípade, že je výsledná hodnota menšia ako 100 %, sústava energetických pilôt nepokryje všetky energetické nároky hornej stavby na vykurovanie resp. chladenie a teda bude potrebný návrh dodatočného konvenčného spôsobu vykurovania resp. chladenia.

Účinnok energetických pilôt na zmeny teploty podlažia

V dôsledku prevádzky energetických pilôt dochádza k zmenám teplôt podlažia. Aby sa tomu predišlo a bola tým zabezpečená obnoviteľnosť systému je potrebné dodržať stanovené teplotné limity. Tieto limity sú definované nasledovným vzťahom:

$$T_{t,R} + T_0 \geq T_{lim}, \quad (1)$$

kde $T_{t,R}$ je predpokladaná zmena teploty pilóty na konci vykurovacieho obdobia [°C], T_0 – prirodzená teplota podlažia [°C], T_{lim} – limitná hodnota zmeny teploty na konci vykurovacieho obdobia, $T_{lim} = 2$ [°C].

Prirodzená teplota podlažia T_0 sa mení v závislosti od ročných období prvých 4 až 6 m [1]. Štandardne však uvažujeme s dĺžkou energetických pilôt 20 m a minimálne s jedným podzemným podlažím. To znamená, že atmosférické vplyvy a teda zmeny ročných období majú zanedbateľný vplyv na daný geotermálny systém.

V prípade, že výsledná teplota je podľa vzťahu (1) väčšia ako limitná hodnota zmeny teploty na konci vykurovacieho obdobia T_{min} [°C], výsledný návrh je optimálny a je možné postupovať v návrhu.

Ak je vypočítaná hodnota menšia ako T_{min} [°C], návrh nie je optimálny a dochádzalo by k progresívnemu ochladzovaniu podlažia spojeného s možnými problémami pilôt v oblasti zamrznania [13]. Takýto návrh nie je akceptovateľný a je nutné pristúpiť k jeho zmene. Existuje mnoho spôsobov ako optimalizovať výpočet za účelom, aby výsledné posúdenie (1) bolo vyhovujúce. Jedným spôsobom je zmena počtu pilôt, s ktorými budeme uvažovať ako s energetickými pilótami s podmienkou zachovania rovnakého množstva extrahovanej energie na vykurovanie a chladenie [1]. Druhým a menej náročným riešením je zmena (zníženie) inštalovaného výkonu energetického systému. V obidvoch prípadoch je nutné výpočet iterovať dovtedy, kým nebude výsledné posúdenie zmeny teploty na konci vykurovacieho obdobia vyhovujúce.

Pri prevádzkovom režime založenom na výmene tepla je primárnym účelom energetických pilôt využiť podlažie ako zdroj tepla. Teplo v podlaží je extrahované a premiestnené do hornej stavby v chladnom období alebo v čase potreby vykurovania. V opačnej situácii je teplo z hornej stavby prenesené do podlažia počas letných mesiacov alebo v období, kedy je potrebné hornú stavbu chladíť. Tento cyklus tepla zabezpečuje obnoviteľnosť navrhnutého energetického základu [1].

3 VÝSLEDKY

V rámci môjho výskumného projektu sa podrobne venujem stanoveniu termických charakteristík podlažia a ich vplyvu na samotný návrh energetických pilótových základov.

Ďalším aspektom výskumu je aj statický návrh a posúdenie energetických pilótových základov, kde som za použitia softvéru Thermo-pile vyvinutého EPFL Lausanne (Švajčiarsko) namodeloval energetický pilótový základ pre budovu s celkovou energetickou potrebou na vykurovanie $15,50 \text{ MW.h.yr}^{-1}$ a na chladenie $8,70 \text{ MW.h.yr}^{-1}$. Výsledný základ je pilótový základ s deviatimi pilótami s dĺžkou $L = 20 \text{ m}$, priemerom $D = 0,8 \text{ m}$. Vo výpočte som uvažoval so zjednodušením vo forme ekvivalentného pilótového základu. Ekvivalentný pilótový základ mal priemer $D_{\text{eq}} = 9,93 \text{ m}$. Pri výpočte sa uvažovalo s celkovým vertikálnym zaťažením $F = 10 \text{ MN}$. Energetický pilótový základ pokryl celkovú potrebu energie na vykurovanie $15,50 \text{ MW.h.yr}^{-1}$ a chladenie $8,70 \text{ MW.h.yr}^{-1}$. Prírodná teplota podlažia bola uvažovaná $T_0 = 11 \text{ }^\circ\text{C}$. Predpokladaná zmena teploty na konci vykurovaného obdobia predstavovala hodnotu $T_{\text{L,R}} = -8,98 \text{ }^\circ\text{C}$ a teda nebola prekročená limitná hodnota podľa vzťahu (1), čím sa stal návrh efektívny a obnoviteľný.

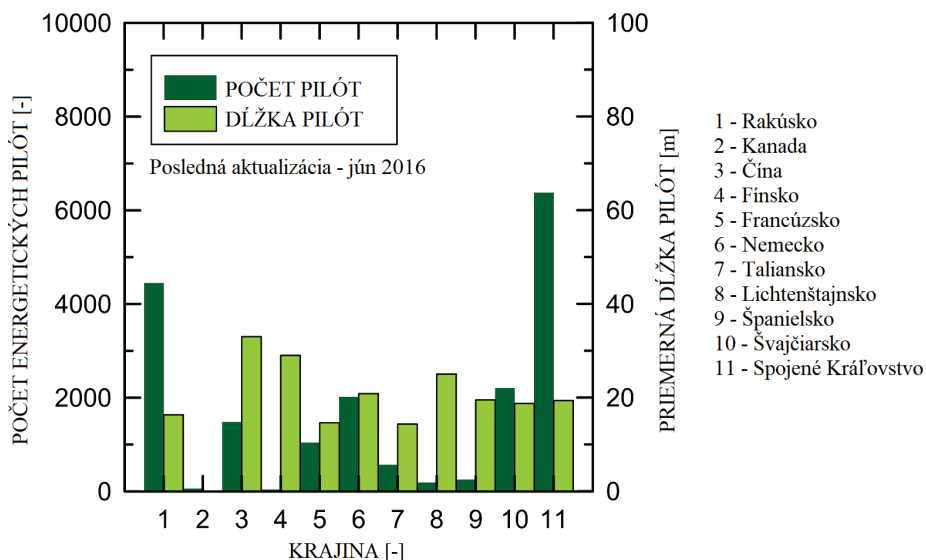
Daný výpočet som verifikoval ručným výpočtom vstupných údajov a výpočtom a posúdením medzného stavu únosnosti. Výpočet a posúdenie medzného stavu použiteľnosti spočíval vo výpočte mechanického a termického sadnutia. Ich súčet predstavoval celkové sadnutie energetického pilótového základu. Výpočet potvrdil doterajšie poznatky v tejto oblasti, že termické sadnutie energetického pilótového základu je oproti mechanickému sadnutiu zanedbateľné [1].

4 ZÁVER

Navrhovanie energetických pilót je a aj bude z dôvodu využívania obnoviteľnej energie nezastupiteľným článkom v stavebníctve vo svete, ale aj na Slovensku, vid' Obr. 2. V neposlednom rade prispieva ekologickým šetrným spôsobom k budovaniu nízko uhlíkových budov a infraštruktúr [14].

Poznatky v tejto oblasti zakladania sú na vysokej úrovni a samotné navrhovanie a posudzovanie takýchto geotermálnych systémov nepredstavuje náročnú úlohu pre geotechnikov. Výnimkou je skupinové pôsobenie pilót a ich vzájomná interakcia, na ktoré analytické modely nestačia svojou nepresnosťou a práve preto je potrebné aplikovať numerické modelovanie energetických geotermálnych systémov so zahrnutím termických zmien v horninovom prostredí.

Ďalšou pomyselnou výzvou pri navrhovaní energetických pilót je správne určenie lokálnych termických charakteristík podlažia ako napríklad tepelná vodivosť podlažia a prírodná teplota podlažia, ktoré sú do značnej miery kľúčom k optimálnemu a efektívnemu výslednému návrhu.



Obr. 2 Počet a priemerná dĺžka realizovaných energetických pilót vo vybraných krajinách [14].

Pod'akovanie

Táto publikácia bola vypracovaná v rámci projektu VEGA 1/0745/21 Analýza vstupných dát a ich spracovanie na zvýšenie spoľahlivosti navrhovania geotechnických a energetických konštrukcií.

Použité zdroje

- [1] Laloui, L., Rotta Loria, A., F., 2020. Analysis and Design of Energy Geostructures, Academic Press, 1096 pages, ISBN 978-0-12-820623-2.
- [2] Povrchové a hĺbkové geotermálne systémy. [online]. Dostupné na internete: <https://geothermie-schweiz.ch/geothermie/geothermie-uebersicht/>
- [3] Wang, D., Lu, L., Cui, P., 2017. Simulation of thermomechanical performance of pile geothermal heat exchanger (PGHE) considering temperature-depend interface behavior. Appl. Therm. Eng., č. 139, 2017, pp. 356-366.
- [4] Fadejev, J., Simon, R., Kurnitski, J., Haghghat, F., 2017. A review on energy piles design, sizing and modeling. In Energy 122, 390-407.
- [5] Durmeková, T., Wagner, P., a Frankovská, J., 2013. Vlastnosti hornín a ich stanovenie v laboratóriu. 1. Skalné horniny, Univerzita Komenského v Bratislave, 173 strán, ISBN 978-80-223-3330-6.
- [6] Zhang, N., Wang, Z., 2017. Rewiew of soil thermal conductivity and predictive models, Int. J. Therm. Sci., č. 117, 2017, 172-183.
- [7] Frankovská, J., 2020. Možnosti využitia horninového prostredia na energetické účely, In Geotechnika 2020, 6 strán.
- [8] Bejan, V., Kraus, AD., 2003. Heat transfer handbook. New York: Wiley.
- [9] EN 1997-2. Geotechnical Design – Ground properties.
- [10] Kasuda, T., and Archenbach, P., R., 1965. Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States, ASHRAE Transactions, Vol. 71, Part 1.
- [11] Kalogirou, S., A Florides, G., 2004. Measurements of Ground Temperature at Various Depths. 7 pages.
- [12] Frankovská, J., Kopecký, M., Turček, P., 2014. The correlation of surface area with hydraulic conductivity of fine-grained soils. In SGEM 2014. GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining : conference proceedings. Sofia : STEF 92 Technology, 2014, p. 893-900.
- [13] SIA D 0190 2005. Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührenden Betonbauteilen - Leitfaden zu Planung, Bau und Betrieb, SIA Zurich.
- [14] Laloui, L., Rotta Loria, A. F. 2017. Energetické geokonstrukce: silná technologie pro vytváření prostředí s nízkým obsahem uhlíku, In Geotechnika 20, č. 1, 2017, 3-18.