

ANALISI NUMERICA DEL COMPORTAMENTO TERMICO DI UNA PALANCOLA ENERGETICA

Gerola M.

Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra “A. Desio”, Milano
Marco.gerola@unimi.it

Cecinato F.

Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra “A. Desio”, Milano
Francesco.cecinato@unimi.it

Haasnoot J. K.

CRUX Engineering BV, Delft (NL)
Haasnoot@crux.nl

Vardon P.J.

TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft (NL)
P.J.Vardon@tudelft.nl

Sommario

L'utilizzo delle installazioni geotermiche superficiali, con particolare riferimento alle cd. geostrutture energetiche, sta aumentando di anno in anno nonostante la scarsità di metodi standardizzati per la loro progettazione termica e meccanica. In questa nota si fa riferimento ad un'innovativa tipologia di geostruttura energetica: una palancola termoattiva, installata a sostegno di una banchina fluviale, in grado di scambiare calore sia con il terreno circostante che con l'acqua superficiale. Uno dei presupposti più importanti per simulare accuratamente gli scambi termici in un'installazione di questa complessità è partire da un corretto profilo di temperatura iniziale nel dominio indagato. In questo lavoro si presentano i tratti fondamentali di un'analisi numerica di “inizializzazione termica” di una palancola termoattiva, convalidata con i dati di campo provenienti dal monitoraggio di un'installazione sperimentale presso Delft (NL). I risultati di tale analisi rappresentano le condizioni iniziali per i successivi studi numerici, volti a valutare le prestazioni energetiche e meccaniche delle palancole termoattive e propedeutici alla definizione di metodi semplificati per la progettazione pratica di queste opere.

1. Introduzione

L'uso del sottosuolo come risorsa energetica, con particolare riferimento alle installazioni geotermiche superficiali, sta gradualmente incrementando negli ultimi decenni. È stato stimato che la capacità energetica delle pompe di calore geotermiche è cresciuta a livello mondiale di circa 20 volte tra il 1995 e il 2010, da 1.9 MWth a 35.2 MWth [1], mentre a fine 2018 la capacità totale delle pompe di calore geotermiche e dei sistemi stoccaggio di calore nel sottosuolo installati in Europa è stata stimata pari a 29600 MWth [2].

I più diffusi sistemi di sfruttamento dell'energia geotermica a bassa entalpia sono le tradizionali “sonde geotermiche” che prevedono il posizionamento di scambiatori di calore a circuito chiuso all'interno di fori verticali appositamente realizzati; tuttavia negli ultimi anni si stanno diffondendo anche le geostrutture energetiche (GE), ovvero strutture geotecniche come fondazioni, opere di sostegno, rivestimenti di tunnel equipaggiate con circuiti di tubi scambiatori di calore. Le GE svolgono quindi la doppia funzione di garantire il supporto strutturale al terreno e/o alla sovrastruttura e di fornire energia utile per il riscaldamento o raffreddamento degli edifici limitrofi [3].

La maggior parte delle GE scambia calore con il terreno circostante o con l'aria situata al contorno. Fanno eccezione a questo schema le palancole termoattive (PTA), oggetto del presente studio, un'innovativa tipologia di GE planare, caratterizzata da un'estesa area di contatto con il terreno, ma capace di scambiare calore anche con

le acque superficiali come ad es. quelle di canali e fiumi [4]. Inoltre, le PE in questione sono in acciaio, materiale altamente conduttivo e quindi in grado di migliorare lo scambio di calore rispetto al calcestruzzo [5]. D'altra parte, l'assenza di metodi standardizzati per la progettazione di PTA comporta la necessità di studi *ad hoc* per comprenderne appieno sia il comportamento termico che termo-meccanico [6].

Il profilo di temperatura nel sottosuolo, la conducibilità e la capacità termiche del terreno, unite ai parametri operativi e costruttivi, sono di fondamentale importanza per l'analisi termica di una GE piana [7] [8].

La conducibilità termica può essere stimata con prove in laboratorio o in sito [9]. Per il calcolo delle proprietà termiche sono inoltre disponibili correlazioni empiriche basate sui risultati di prove penetrometriche valide per terreni saturi [10] e database da cui attingere valori medi di conducibilità e capacità termica sulla base delle caratteristiche geologiche del terreno [11]. Non sono invece molte le informazioni reperibili in letteratura riguardo al profilo di temperatura nel terreno prima dell'attivazione geotermica di una GE. Sono disponibili alcuni metodi analitici semi-empirici per il calcolo della temperatura nel terreno a diverse profondità [3] [12], tuttavia questi metodi si basano sull'ipotesi di un semispazio di terreno omogeneo e non tengono quindi conto di stratigrafie complesse e dell'eventuale presenza di acqua al contorno della GE.

In questa nota è descritto un modello numerico agli elementi finiti finalizzato a ricostruire dapprima il profilo di temperatura iniziale nel dominio di interesse, per svolgere successivamente analisi termiche e termo-meccaniche della PTA. Il modello è validato con i dati provenienti dal monitoraggio di un caso studio di una PE sperimentale installata nei pressi di Delft (NL).

2. Descrizione del modello

La PTA è composta da due diversi tipi di circuito di scambiatori di calore: il primo, profondo 3 metri, scambia calore principalmente con l'acqua del canale; il secondo, profondo 15 metri, scambia calore sia con il terreno sia con l'acqua (Fig. 1). Tutti gli scambiatori sono connessi ad un'unica pompa di calore e, tramite un sistema di valvole, è possibile regolare la portata entrante in ogni tubazione.

La temperatura, sia nel fluido termovettore che nel terreno, è monitorata attraverso 8 stringhe di sensori termici (termistori) (Fig. 2). Le stringhe D_FL D_FR S_FL e S_FR presentano un termistore ogni metro di profondità e le stringhe D_B D_C S_B S_C un termistore ogni 2 metri di profondità.

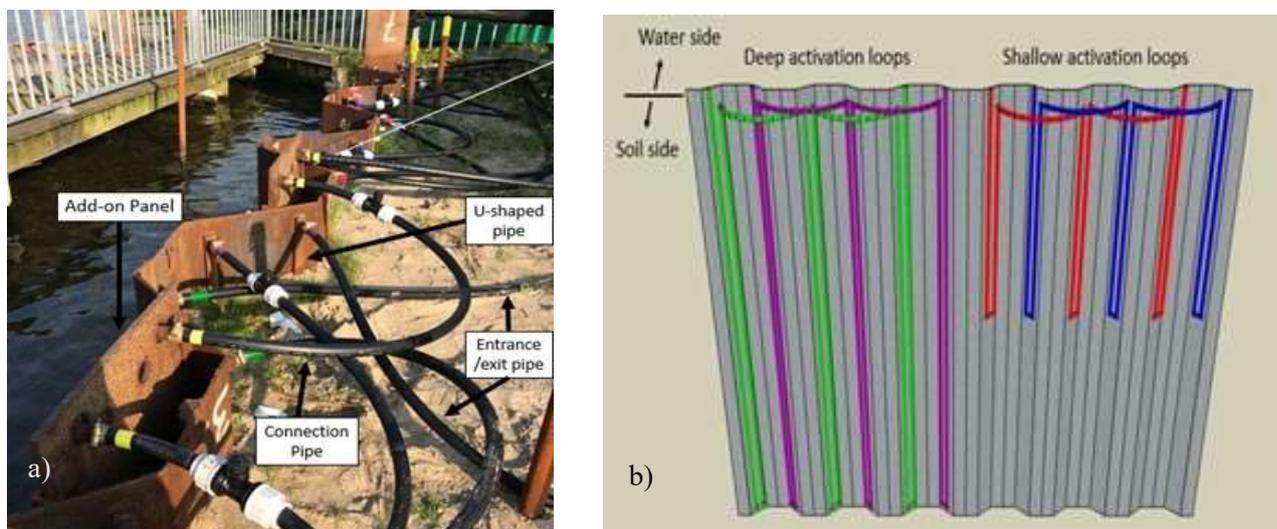


Fig. 2 a) Palancola termoattiva con gli scambiatori di calore b) Loop superficiali e profondi installati con la palancola termoattiva

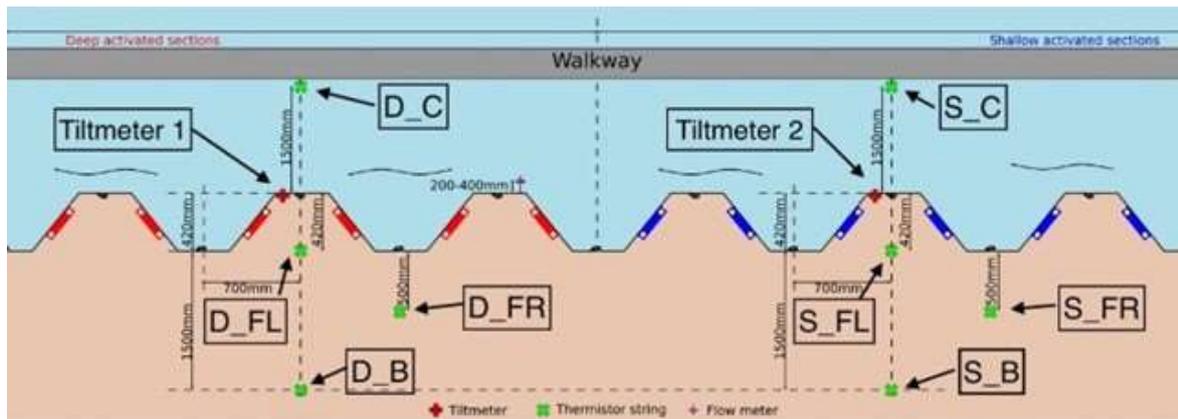


Fig. 2: Posizione delle stringhe contenenti i sensori di temperatura

Il modello numerico agli elementi finiti della PTA è stato sviluppato utilizzando il software COMSOL Multiphysics. La geometria del dominio è rappresentata in Fig. 3. Per ridurre i tempi computazionali, l'acqua del canale non è esplicitamente rappresentata nel dominio, ma si tiene conto del suo effetto termico attraverso opportune condizioni al contorno, descritte nel seguito.

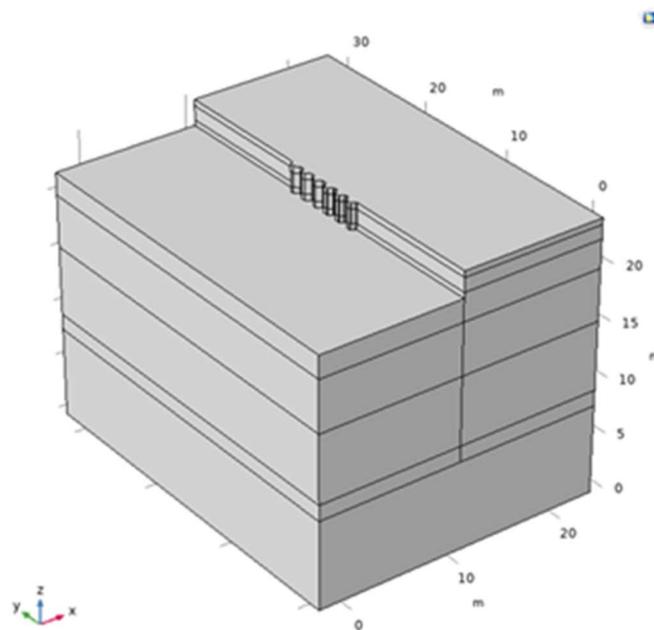


Fig. 3: Dominio del modello numerico della palancola termoattiva

Le proprietà termiche del terreno in esame (capacità e conducibilità termica) sono state determinate sulla base della conoscenza della stratigrafia di dettaglio. In particolare, sono state utilizzate correlazioni empiriche [10] sulla base dei risultati di una prova penetrometrica svolta nei pressi della PTA (Fig.4).

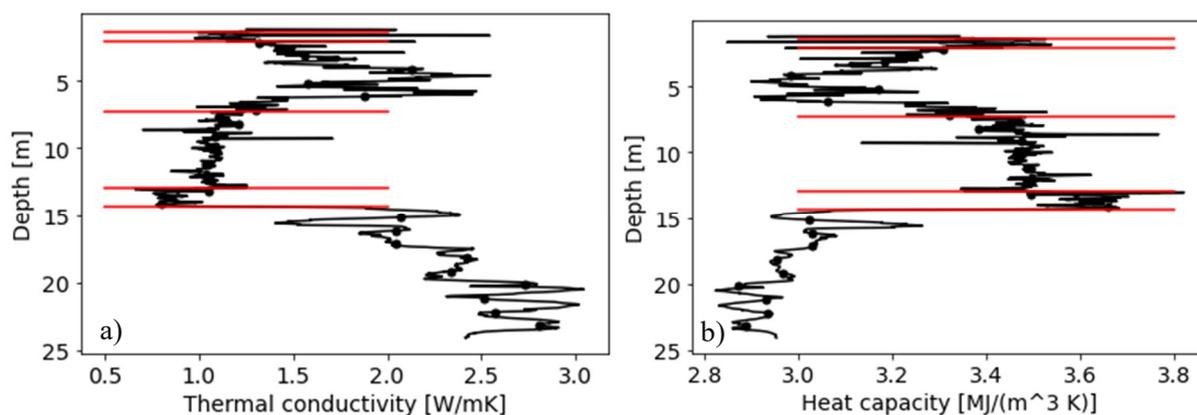


Fig. 4: Calcolo della conducibilità (a) e capacità (b) termica sulla base dei risultati delle CPT.

Data la complessità del dominio, particolare attenzione è rivolta all'assegnazione delle condizioni al contorno: sulla superficie inferiore del dominio è assegnata una temperatura costante che rappresenta una condizione "indisturbata", ossia non influenzata dalle variazioni di temperatura esterna, pari a 12 °C [13]. La condizione di isolamento termico, che pone nullo il flusso termico attraverso le superfici selezionate, è invece assegnata a tutte le facciate verticali del dominio.

Alle superfici a contatto con l'acqua è assegnata la storia temporale di temperature misurate del canale (Fig b). Con tale condizione al contorno non si considera l'effetto convettivo dell'acqua in movimento, che si ipotizza trascurabile data la bassa velocità della corrente rilevata in sito. Alle superfici superiori a contatto con l'aria è assegnata la storia temporale della temperatura atmosferica esterna (Fig a). Per schematizzare la variazione annuale di temperatura di acqua ed aria nel luogo in esame, è stata effettuata un'interpolazione sinusoidale delle temperature misurate relative a un periodo di 3 anni (Fig. 5). Tali input termici sinusoidali sono stati utilizzati per migliorare l'inizializzazione termica, simulando numericamente 10 anni di variazione delle temperature esterne antecedenti all'attivazione geotermica dell'opera.

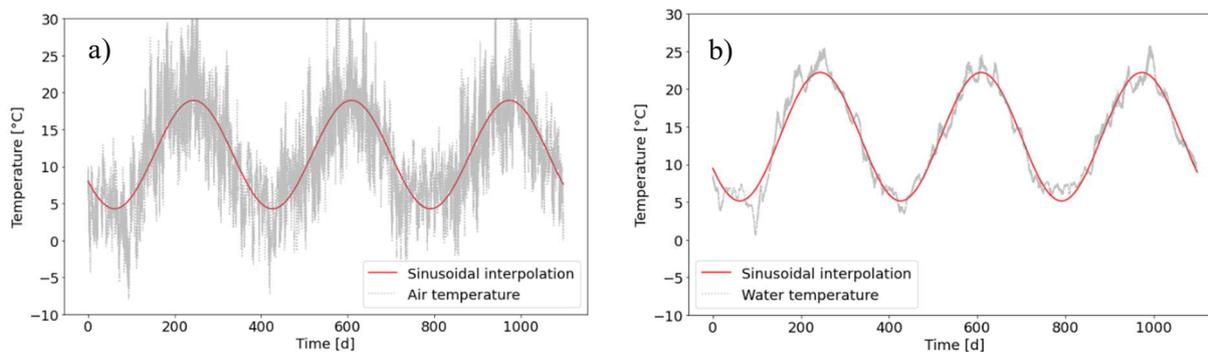


Fig 5 Interpolazione sinusoidale dei dati di temperatura dell'aria (a) e dell'acqua (b)

3. Discussione dei risultati

Le temperature misurate dalle stringhe di sensori D_FL e D_FR subito prima dell'attivazione geotermica della PTA sono state confrontate con i risultati numerici relativi alla stessa data e alle rispettive posizioni dei sensori (Fig. 2). Il confronto si basa sul valore della radice dell'errore quadratico medio (RMSE) ed è stato svolto per un numero di anni di "inizializzazione termica" da 1 a 10.

Considerando un periodo di inizializzazione di 5 anni, si ottiene mediamente il minor valore di RMSE (Fig. 6) e i profili numerici di temperatura dei sensori D_FL e D_FR risultano molto simili a quelli reali (Fig. 7).

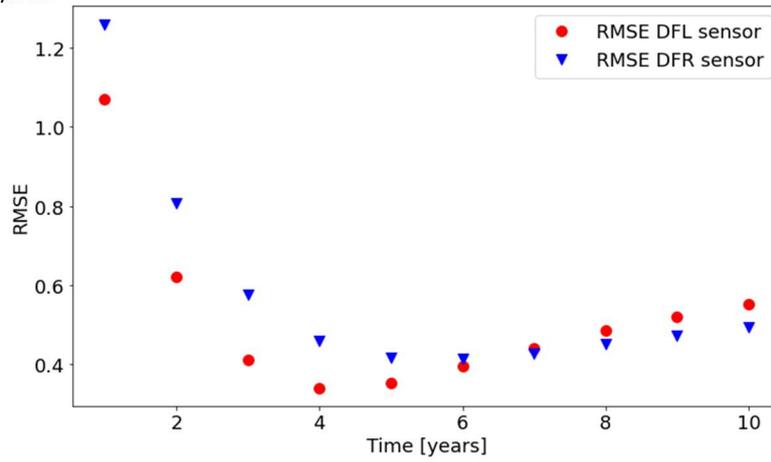


Fig 6 RMSE calcolato alla fine di ogni anno simulato dei profili di temperatura delle stringhe D_FL e D_FR

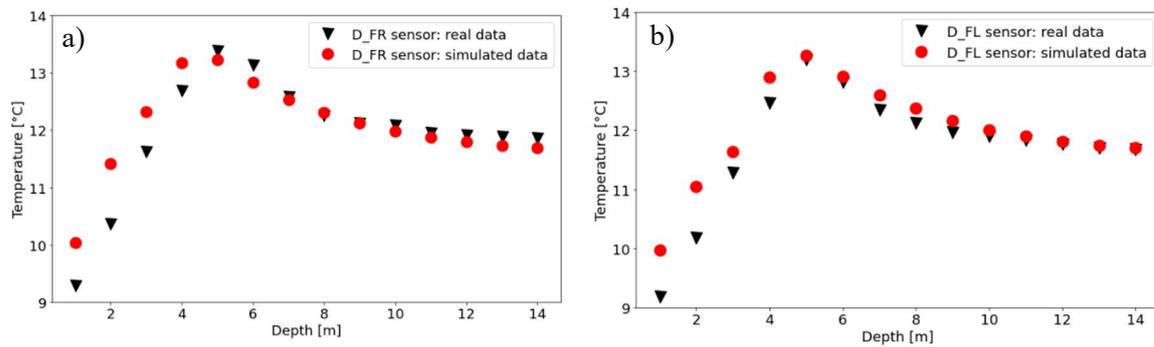


Fig. 7 Confronto delle temperature misurate in sito dai sensori D_FR (a) e D_FL (b) con quelle numeriche dopo 5 anni di simulazione

Nei primi 4 metri di profondità si osserva il maggior scostamento tra simulazioni e misure. Tale differenza può imputarsi, tra le altre cause, all'incertezza nella stima delle proprietà termiche del terreno in questa zona e all'aver trascurato meccanismi di scambio termico secondari come l'irraggiamento solare. La distribuzione di temperatura all'interno del dominio relativo a fine novembre è rappresentata in Fig. 8.

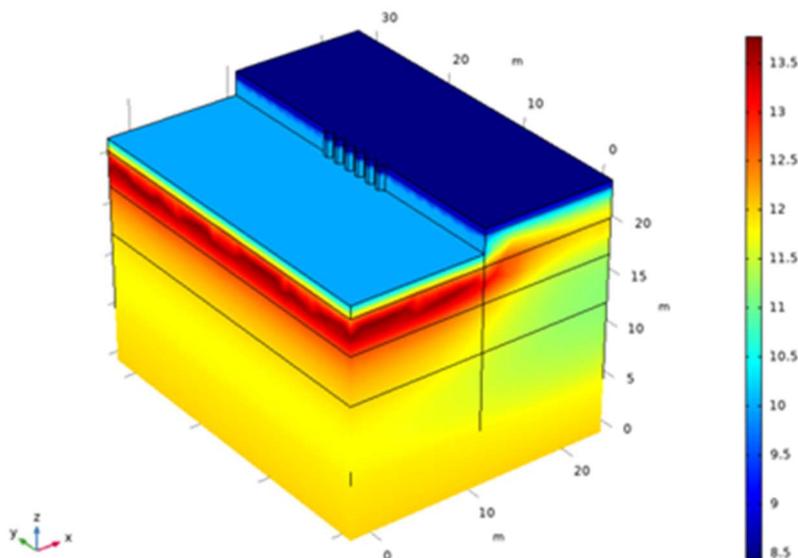


Fig. 8: Profilo di temperatura nel dominio dopo 5 anni di simulazione

Si osserva che nella zona di terreno sottostante il canale si trovano le temperature più alte dovute allo stoccaggio naturale di calore che avviene ogni estate. Infatti il terreno è riscaldato durante i mesi estivi e lentamente si raffredda durante quelli invernali.

4. Conclusioni e sviluppi futuri

Uno degli aspetti fondamentali per lo studio delle prestazioni energetiche di una GE è la conoscenza del profilo di temperatura nel terreno. Per terreni con proprietà termiche eterogenee e in caso di presenza di uno strato d'acqua al bordo dell'opera, è fortemente raccomandabile svolgere numericamente un'accurata inizializzazione termica. Facendo riferimento al caso studio della PTA installata nei pressi di Delft (NL), si è sviluppato un modello numerico per l'analisi termica, con l'intento di riprodurre in primo luogo il profilo di temperatura del sottosuolo iniziale, preesistente all'attivazione geotermica dell'opera. Le temperature misurate da due diverse stringhe di sensori termici sono state confrontate con quelle simulate numericamente ottenendo una buona approssimazione, specialmente per profondità maggiori di 5 metri. Il profilo di temperatura 3D calcolato grazie al modello numerico rappresenta le condizioni iniziali ottimali da utilizzare per successive analisi termiche e/o termo-meccaniche di una PTA.

I prossimi sviluppi di questo progetto di ricerca prevedono (1) la simulazione dello scambio di calore tra la PTA e il terreno e acqua circostanti durante il funzionamento geotermico, utile a ottimizzarne le prestazioni energetiche; (2) lo svolgimento di analisi termo-meccaniche per verificare che le deformazioni e sollecitazioni aggiuntive termo-indotte rientrino nei limiti di accettabilità per lo stato limite di esercizio dell'opera; (3) lo sviluppo di metodi semplificati per la progettazione pratica delle PTA.

Bibliografia

- [1] J. W. Lund, D. H. Freeston, and T. L. Boyd, (2010) "Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review". Conf. Proc. World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, (23 p.).
- [2] B. Sanner, (2019) "Summary of EGC 2019 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe," European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands.
- [3] H. Brandl, (2006) "Energy foundations and other thermo-active ground structures," *Geotechnique*, vol. 56, no. 2, pp. 81–122.
- [4] M. Ziegler, D. Koppmann, R. Peching, and D. Knapp, (2019) "Energy sheet pile walls – Experimental and numerical investigation of innovative energy geostructures". Conf. Proc. XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Reykjavik, Islanda.
- [5] J. Haasnoot, P. J. Vardon, I. Pantev, S. Bersan, B. Bloemers, and D. Smeulders, (2020) "Energy quay walls". in *E3S Web of Conferences*, vol. 205. doi: 10.1051/e3sconf/202020506002.
- [6] P. Bourne-Webb, S. Burlon, S. Javed, S. Kürten, and F. Loveridge, (2016). "Analysis and design methods for energy geostructures". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65. Elsevier Ltd, pp. 402–419. doi: 10.1016/j.rser.2016.06.046.
- [7] S. Kürten, D. Mottaghy, and M. Ziegler, (2014) "A new model for the description of the heat transfer for plane thermo-active geotechnical systems based on thermal resistances". *Acta Geotechnica*, vol. 10, no. 2, pp. 219–229. doi: 10.1007/s11440-014-0311-6.
- [8] S. Kürten, D. Mottaghy, and M. Ziegler, (2015) "Design of plane energy geostructures based on laboratory tests and numerical modelling". *Energy and Buildings*, vol. 107, pp. 434–444, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.08.039.
- [9] Vieira A., Meranga J., Alberdi-Pagola M., Christodoulides P., Javed S., Loveridge F., Nguyen F., Cecinato F., Maranhã F., Florides G., Prodan I., van Lysebetten G., Ramalho E., Salciarini D., Georgiev A., Rosin-Paumier S., Popov R., Lenart S., Erbs Poulsen S., Radioti G. (2017), "Characterisation of ground thermal and Thermo-mechanical behaviour for shallow geothermal energy applications". *Energies*, vol. 10, no. 12. MDPI AG. doi: 10.3390/en10122044.

- [10] P. J. Vardon and J. Peuchen, (2021). “CPT correlations for thermal properties of soils”. *Acta Geotechnica*, vol. 16, no. 2, pp. 635–646, doi: 10.1007/s11440-020-01027-2.
- [11] G. Dalla Santa, A. Galgaro, R. Sassi, M. Cultrera, P. Scotton, J. Mueller, D. Bertermann, D. Mendrinos, R. Pasquali, R. Perego, R. Pera, E. Di sipio, G. Cassiani, M. De Carli, A. Bernardo, (2020) “An updated ground thermal properties database for GSHP applications”. *Geothermics*, vol. 85, doi: 10.1016/j.geothermics.2019.101758.
- [12] D. Hillel, (1982) “Introduction to Soil Physics”. San Diego: Harcourt Brace Jovanovich Publishers.
- [13] J. Busby, A. Kingdon, and J. Williams, (2011) “The measured shallow temperature field in Britain”. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 44, no. 3, pp. 373–387, Aug. 2011, doi: 10.1144/1470-9236/10-049.