

MISURE DI TEMPERATURA DI LUNGO TERMINE IN UN PALO DI PROVA NEL SOTTOSUOLO NAPOLETANO

Luca Di Girolamo

Università degli Studi di Napoli Federico II
luca.digirolamo@unina.it

Gabriella Marone

Università degli Studi di Napoli Federico II
gabriella.marone@unina.it

Gianpiero Russo

Università degli Studi di Napoli Federico II
pierusso@unina.it

Sommario

Nell'ultimo decennio, ai tradizionali impianti geotermici si sta affiancando la nuova tecnologia dei pali energetici i quali combinano la funzione energetica degli impianti geotermici con la funzione strutturale dei pali di fondazione. Tale tecnologia sfrutta la temperatura del sottosuolo per alimentare pompe di calore geotermiche destinate al riscaldamento/raffrescamento gli edifici. Tuttavia, la temperatura del sottosuolo non risulta costante a tutte le profondità. In particolare, per le profondità alle quali operano i pali energetici essa può risultare alquanto variabile. In questa nota sono riportati i risultati delle misure di temperatura a lungo termine del sottosuolo nella provincia di Napoli a valle di sperimentazioni su un palo energetico di prova. Inoltre, i risultati sono stati confrontati con espressioni analitiche di letteratura attraverso le quali è possibile previsioni circa l'andamento delle temperature nel sottosuolo in funzione del tempo e della profondità.

1. Introduzione

Sostenibilità ambientale e contenimento dei gas serra sono tra i principali obiettivi delle politiche energetiche mondiali al fine di combattere gli effetti dei cambiamenti climatici. Tali obiettivi sono tuttavia in netto contrasto con la sempre crescente domanda di energia che nella maggior parte dei casi è basata sull'utilizzo di combustibili fossili, principali responsabili della produzione di CO₂.

In questo contesto, lo sfruttamento dell'energia geotermica a bassa entalpia attraverso sistemi geotermici superficiali si sta fortemente espandendo in Europa trovando riscontro nelle politiche energetiche dato il basso impatto ambientale in termini di CO₂ e l'alta efficienza energetica. Questi sistemi, infatti, sono utilizzati per il riscaldamento e raffreddamento degli edifici attraverso scambiatori interrati collegati ad una pompa di calore geotermica.

I pali energetici rappresentano un'evoluzione abbastanza recente degli impianti geotermici. Essi combinano il ruolo strutturale dei pali di fondazione e quello energetico degli scambiatori di calore geotermici. Tuttavia, se confrontati ai tradizionali pali di fondazione, i primi sono sottoposti a carichi termomeccanici.

Il principio di funzionamento di un qualsiasi impianto geotermico e dunque dei pali energetici è collegato alla presenza di una zona di omotermia nel sottosuolo, determinando superiori performance energetiche rispetto alle più tradizionali pompe di calore ad aria. Tuttavia, l'ipotesi di temperatura costante per le profondità alle quali operano i pali energetici può rivelarsi non corretta soprattutto nelle zone più superficiali dove le temperature risentono in maniera più sensibile delle variazioni climatiche esterne (giornaliere e stagionali).

La conoscenza dei profili termici e della variazione della temperatura nel tempo è fondamentale per un'ottimizzazione della progettazione essendo la temperatura "indisturbata" del sottosuolo uno dei parametri

principali al fine di potere prevedere i carichi termici a cui sarà sottoposto il palo di fondazione.

Tuttavia, la temperatura del sottosuolo può essere influenzata da alcuni fattori come, ad esempio, la struttura e le proprietà fisiche del terreno stesso, le variazioni della temperatura dell'aria esterna, fattori climatici, topografia, radiazione solare, precipitazioni, copertura della superficie tramite manufatti antropici o elementi vegetali (van Manen e Wallin, 2012). Tali fattori fanno sì che durante l'anno i profili termici del sottosuolo siano variabili con la profondità (Islam, 2017). Rispetto all'onda termica media annuale dell'aria esterna valutata con cadenza mensile, l'onda termica del sottosuolo presenta un incremento dello smorzamento in ampiezza ed un incremento dello sfasamento al crescere della profondità. Solo per i primi 10 cm circa la temperatura media annuale del terreno tende a coincidere con quella dell'aria esterna (Baggs, 1983).

La temperatura del sottosuolo risulta costante e pari circa alla temperatura media annuale dell'aria esterna dopo i 15 m di profondità (Rybach e Sanner, 2000). Pertanto, essa risulterà inferiore rispetto a quella dell'aria esterna nei periodi estivi e maggiore nei periodi invernali (nell'emisfero boreale) con conseguenti vantaggi dal punto di vista energetico per la pompa di calore geotermica.

In letteratura si distinguono generalmente tre zone di temperatura in funzione della profondità. La zona compresa tra 0 e 2 m è denominata *surface zone*. Essa è sensibile alle variazioni di temperatura giornaliere dell'aria esterna. In questa zona i parametri termici del suolo sono importanti, ma la temperatura è influenzata soprattutto dalle condizioni superficiali come, ad esempio, la copertura del suolo, la velocità del vento e le interazioni con le sovrastrutture. La zona compresa tra 2 e 15 m è denominata *shallow zone*. In questa zona, invece, il sottosuolo risulta sensibile alle variazioni climatiche stagionali. Le condizioni climatiche esterne e gli agenti atmosferici tendono a diventare trascurabili ma la presenza della falda acquifera, l'interazione con le sovrastrutture e gli edifici devono essere tenute in considerazione per gli scambi termici. Infine, la zona compresa tra 15 e 50 m è denominata *deep zone*. A queste profondità la temperatura del sottosuolo è quasi costante e dipende sopra i 20-30 m dalla localizzazione geografica. Al di sotto dei 50 m la temperatura del sottosuolo è completamente influenzata dal flusso geotermico. Generalmente, i pali energetici, date le loro lunghezze, trovano il massimo sviluppo geometrico all'interno della *shallow zone*. La conoscenza dei profili termici fornisce dati importanti per quel che concerne la progettazione energetica e geotecnica e strutturale. Tuttavia, dati sperimentali derivanti dal monitoraggio nel tempo delle temperature del sottosuolo non sono sempre disponibili e i progettisti necessitano di strumenti alternativi più rapidi (Ozgener e Tester, 2013).

In questa nota sono stati descritti i principali risultati ottenuti da una campagna di monitoraggio delle temperature del sottosuolo. Il monitoraggio è stato svolto presso il comune Crispano in provincia di Napoli, a valle di prove termiche eseguite su un palo di fondazione equipaggiato con scambiatore di calore e strumentato con estensimetri a corda vibrante e termistori. Lo scopo è stato quello di valutare l'influenza delle variazioni termiche esterne stagionali sulla temperatura del sottosuolo ricostruendo i profili termici con la profondità.

Inoltre, alcuni metodi analitici, riportati in letteratura, vengono utilizzati per fornire previsioni circa l'andamento della temperatura del sottosuolo nel tempo a diverse profondità dal piano campagna. Il confronto tra i risultati ottenuti con i metodi analitici ed i dati sperimentali ha confermato l'utilità dei metodi a fornire previsioni utili in fase progettuale.

2. Sperimentazione

La sperimentazione è stata effettuata su un palo trivellato in conglomerato cementizio armato, di diametro 0,60 m e lunghezza 12 m realizzato presso la zona industriale del comune di Crispano (Na). Il palo è stato armato per tutta la lunghezza (armature longitudinali 8 ϕ 14 e spirale ϕ 8/20). Il palo è stato equipaggiato con scambiatori di calore a spirale in polietilene ad alta densità di diametro 0,02 m e lunghezza totale di circa 85 m. Con questa configurazione è stato possibile raggiungere una lunghezza effettiva delle tubazioni 6,5 volte la lunghezza totale del palo massimizzando la superficie di scambio termico. Il palo è stato realizzato mediante scavo a secco in terreno di origine vulcanica di tipo piroclastico. La stratigrafia del sottosuolo è stata indagata attraverso prove CPT e sondaggi a carotaggio continuo fino ad una profondità di circa 15 m. Il sottosuolo è

composto da un'alternanza di sabbie limose e limi sabbiosi. Dai sondaggi effettuati non è stata rilevata falda acquifera fino alla quota indagata.

Per un periodo di circa sette mesi le temperature del palo e del terreno circostante sono state monitorate attraverso sensori di temperatura disposti a diverse profondità (Fig 1). Lungo l'asse del palo sono state disposte 8 corde vibranti munite di termistori interni (WVi) e 4 termistori NTC fissati alle armature ed in prossimità degli scambiatori di calore a spirale (TPi). A 1D di distanza dal palo è stato realizzato un foro di monitoraggio equipaggiato con 4 termistori NTC (TSi) (Fig 1).

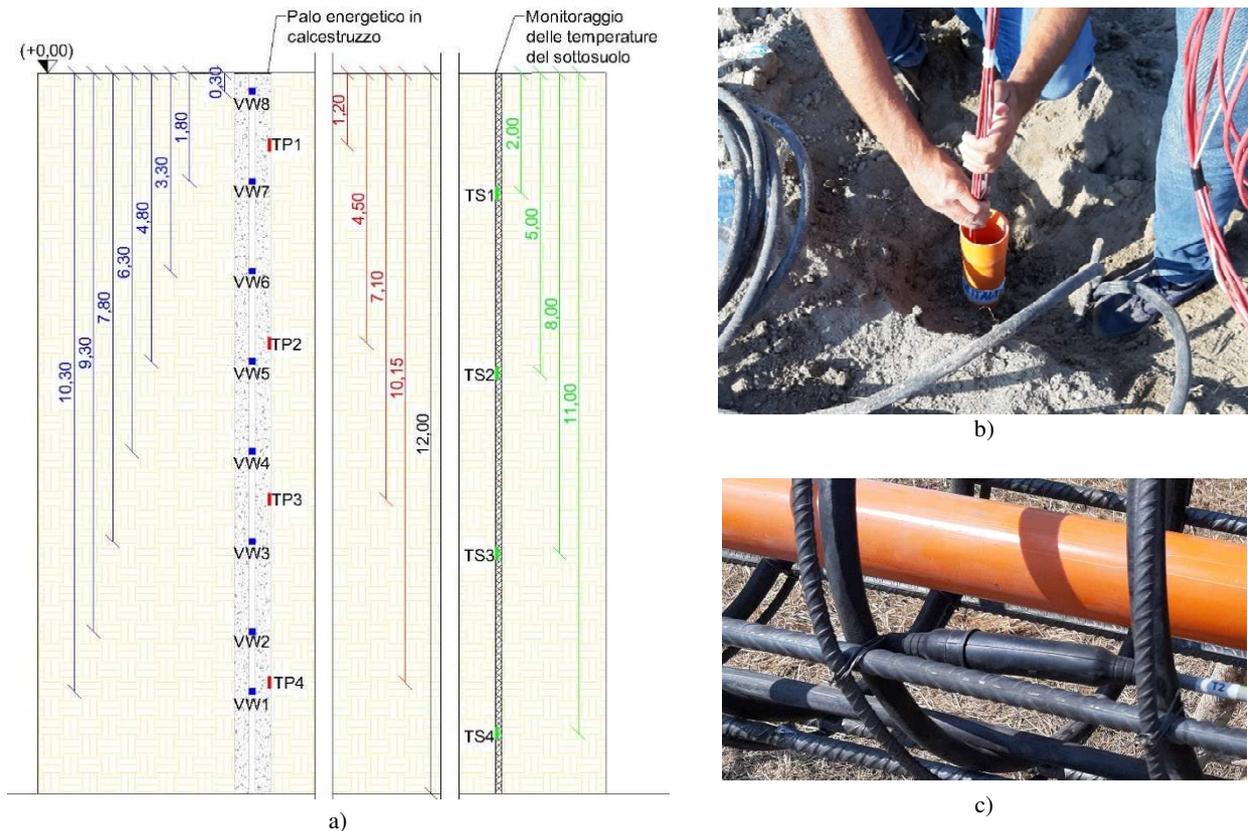


Fig 1. a) Disposizione dei sensori; b) inserimento delle corde vibranti in asse al palo; c) installazione dei sensori di temperatura nella zona del copriferro palo

I sensori installati per l'esecuzione di prove termiche sono stati utilizzati per il monitoraggio della temperatura del sottosuolo. Non essendo attivo il palo termicamente si assume che abbia raggiunto l'equilibrio termico con il sottosuolo e pertanto le misure di temperatura sia all'interno del palo che nel foro di monitoraggio hanno permesso di determinare l'andamento della temperatura del sottosuolo nel tempo a diverse profondità.

3. Approccio analitico

Prevedere la temperatura del sottosuolo ad una determinata profondità e istante di tempo, può risultare una procedura di non così semplice attuazione. Infatti, l'influenza delle condizioni climatiche annuali (i.e. variazioni stagionali della temperatura dell'aria, fenomeni atmosferici episodici etc.) possono portare a risultati molto variabili. Tuttavia, una funzione matematica armonica come quella proposta da Hillel (1982) risulta il modo più semplice per rappresentare il regime termico fluttuante per tutte le profondità del sottosuolo.

L'equazione 1 è ampiamente utilizzata e soprattutto, se calibrata con misurazioni di sito, può fornire previsioni dell'andamento della temperatura nel sottosuolo (Hillel, 1982).

$$T(z, t) = T_m + A_0 e^{-z/d} \left[\sin\left(\omega(t - t_0) - \frac{z}{d} - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

Equazione 1

Dove:

$T(z, t)$ è la temperatura del sottosuolo all'istante di tempo t e alla profondità z ;

T_m è la temperatura media del sottosuolo;

z è la profondità considerata nel calcolo;

t è l'istante di tempo considerate nel calcolo;

A_0 è l'ampiezza d'onda termica calcolata a ridosso della superficie del terreno;

$\varphi(z)$ è l'angolo di fase alla profondità z ;

ω è la frequenza radiale definita come: $2\pi/P$;

P è il periodo;

t_0 è l'istante iniziale dal cui si effettua il calcolo;

d è denominata profondità di smorzamento ed è definita come la profondità alla quale l'ampiezza dell'onda termica decresce fino ad una frazione pari a $1/e$ (37%) di A_0 . La profondità di smorzamento è collegata alla diffusività termica del sottosuolo α [m^2/s] e alla frequenza radiale ω :

$$d = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$$

Equazione 2

La diffusività termica descrive la profondità e la velocità di penetrazione di un'onda termica all'interno del sottosuolo (Brandl, 2006).

4. Risultati

In questo paragrafo sono riportate le misure di temperatura ottenute dai sensori di Fig 1. Le misure si riferiscono ad un periodo di monitoraggio che va da fine settembre 2020 ad aprile 2021. Le misure dei sensori VW_i e TP_i e TS_i sono riportate in Fig 2 a) e b), rispettivamente. Dalle figure è possibile notare che i sensori più prossimi alla superficie sono sensibilmente influenzati dalle variazioni di temperatura dell'ambiente esterno. In particolare, per il sensore $WV8$ a 30 cm di profondità dal p.c., si verifica un'escursione termica che varia da $6,2$ °C nel mese di gennaio a $15,7$ °C nel mese di aprile. A queste profondità, inoltre, gli effetti di smorzamento e sfasamento dell'onda termica sono alquanto attenuati. Anche le misure di $TP1$, a 1,20 m dal p.c., mostrano la stessa tendenza di $WV8$. Tuttavia, in questo caso, la maggiore profondità di installazione del sensore rispetto a $WV8$ fa sì che gli effetti di smorzamento e sfasamento dell'onda termica siano più evidenti. Anche le misure fornite da $TS1$ sono caratterizzate da fluttuazioni stagionali che variano da $22,6$ °C misurati nel mese di ottobre a $12,6$ °C misurati a marzo. Dopo i 7 m l'andamento delle temperature risulta essere alquanto costante su valori che si attestano attorno ai $16,7$ °C (Fig 2).

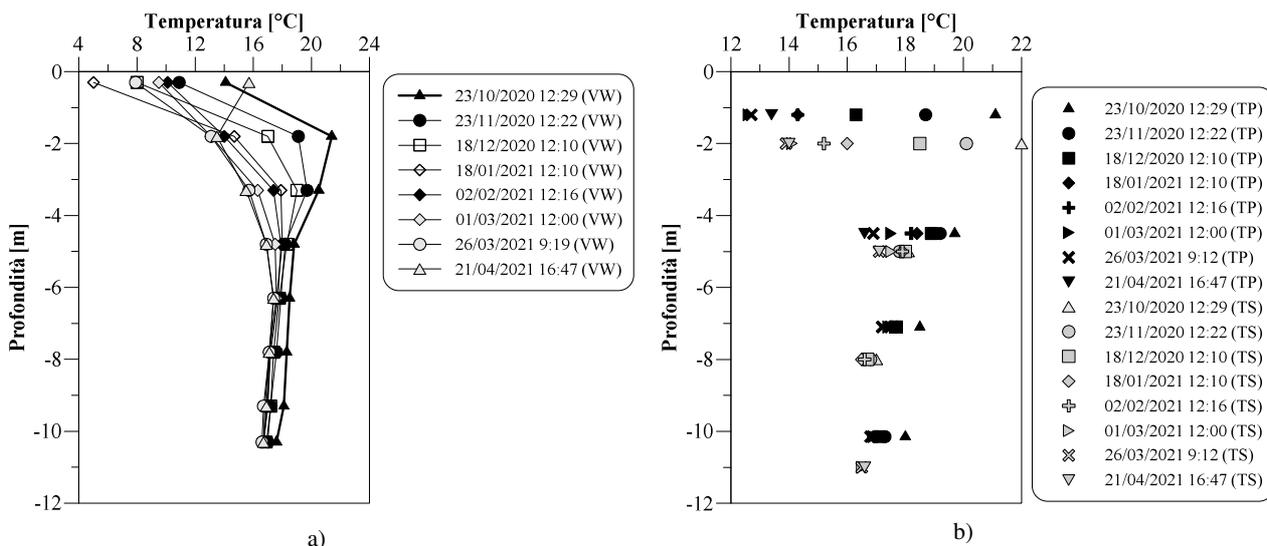


Fig 2. Misurazione delle temperature a diverse profondità e diversi istanti di tempo a) in asse al palo; b) nel copriferro del palo e nel terreno

5. Confronti tra l’approccio analitico e le misurazioni ottenute

La relazione matematica proposta da Hillel (1982) riportata in Equazione 1 è stata utilizzata per un duplice scopo. In prima istanza, partendo dai valori misurati, è stata determinata la diffusività termica media del terreno. Successivamente, con i dati ottenuti è stata fatta una previsione delle temperature del sottosuolo nel tempo per diverse profondità.

Nel calcolo, la temperatura media del sottosuolo è stata ricavata dalle misurazioni di sito, mentre la temperatura dell’aria è stata considerata pari alla temperatura di superficie. Il miglior fitting tra i valori sperimentali e quelli calcolati sono stati ottenuti considerando una diffusività termica del terreno pari a $0,0216 \text{ m}^2/\text{d}$ (Fig 3).

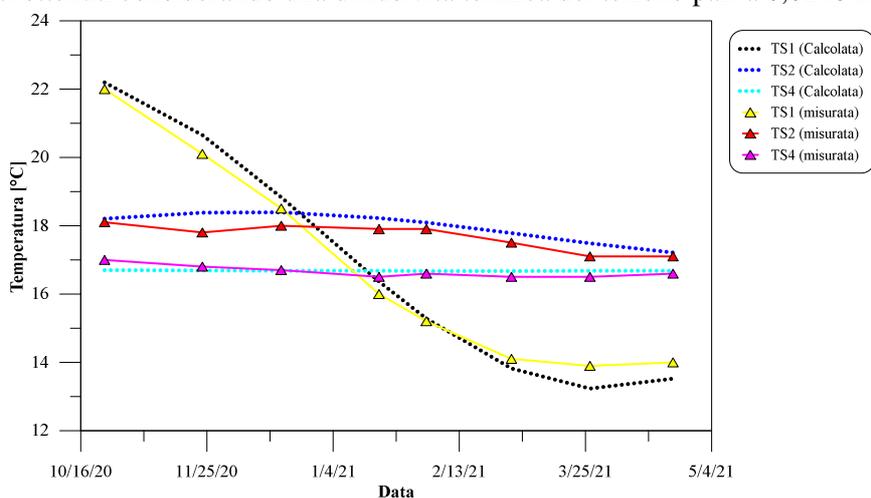


Fig 3. Fitting tra i dati misurati e le temperature ottenute dai calcoli con la diffusività imposta

In Fig 4 sono riportati gli andamenti delle temperature a scala mensile in funzione della profondità (a) e le temperature a dodici diverse profondità con il tempo. Con la profondità si osserva sia uno smorzamento che uno sfasamento delle temperature massime e minime.

Inoltre, si nota come da 7 m di profondità la temperatura si aggira intorno ad un valore costante di circa $17 \text{ }^\circ\text{C}$, (molto prossimo a quello ottenuto sperimentalmente).

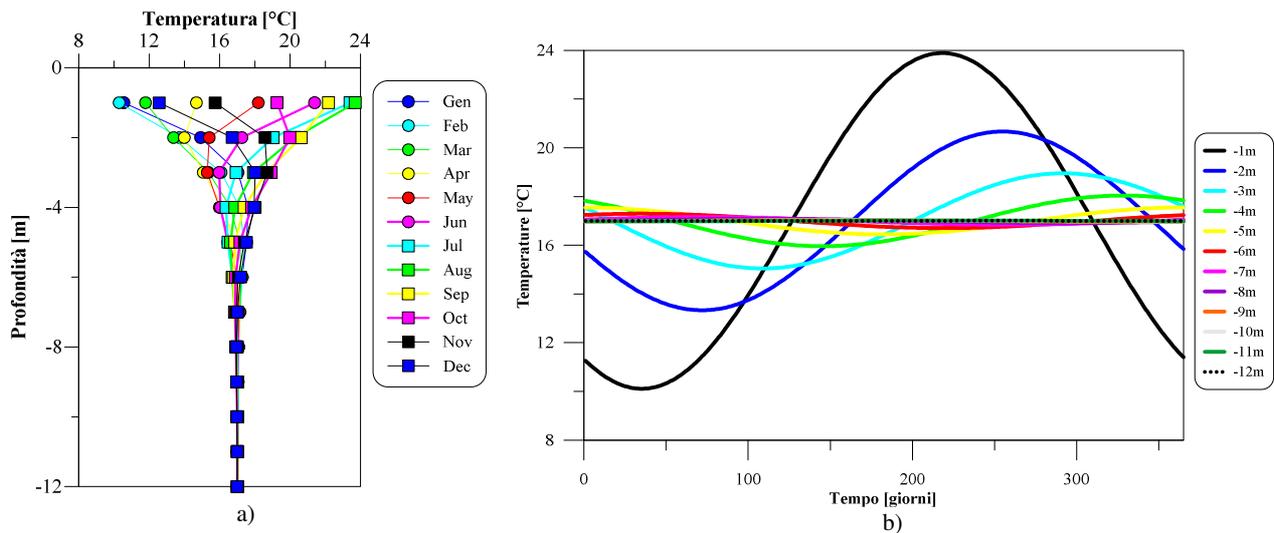


Fig 4. Andamento delle temperature calcolato attraverso la formula di Hillel (1982) a) in funzione della profondità; b) in funzione del tempo

6. Conclusioni

In questa nota sono stati descritti i risultati ottenuti da una campagna di monitoraggio di temperature a lungo termine a valle di una sperimentazione effettuata su un palo energetico installato in terreni piroclastici in un sito della provincia di Napoli. I dati ottenuti hanno permesso di determinare le temperature del sottosuolo durante il periodo di inattività del palo energetico. I risultati dimostrano che le temperature si attestano intorno ad un valore costante di circa 17 °C dopo aver superato una profondità dal piano campagna di circa 7 m. Ciò comporta che nella pratica, pali energetici di lunghezza confrontabile a quella del palo di prova descritto nella nota (12 m) o con sviluppo minore, per più della metà della loro lunghezza sono immersi in zone del sottosuolo in cui la temperatura risulta più o meno variabile. Tale dato dovrebbe essere tenuto in considerazione durante la progettazione dei pali energetici per la valutazione degli effettivi carichi termici (ΔT) a cui è sottoposta la struttura sia per la valutazione dell'effettivo scambio termico che sussiste tra palo e terreno dal punto di vista energetico. Nella nota, infine, partendo da alcuni dati iniziali delle misurazioni, è stato ricavato, attraverso formule di letteratura, l'andamento annuale delle temperature del sottosuolo con la profondità. Tale andamento fornisce un'indicazione progettuale per i sottosuoli del napoletano o comunque delle zone limitrofe al sito di sperimentazione.

Bibliografia

- Baggs, S. A. (1983) "Remote prediction of ground temperature in Australian soils and mapping its distribution", *Solar Energy*, 30(4), pp. 351–366. doi: 10.1016/0038-092X(83)90189-5.
- Brandl, H. (2006) 'Energy foundations and other thermo-active ground structures', *Geotechnique*, 56(2), pp. 81–122. doi: 10.1680/geot.2006.56.2.81.
- Hillel, D. (1982) 'Soil Temperature and Heat Flow', *Introduction to Soil Physics*, pp. 155–175. doi:10.1016/b978-0-08-091869-3.50013-5.
- Islam, R. (2017) 'A comparative study on the variation of soil temperature at different depths', 8(7), pp. 444–446.
- van Manen, S. M. and Wallin, E. (2012) 'Ground temperature profiles and thermal rock properties at Wairakei, New Zealand', *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 43, pp. 313–321. doi: 10.1016/j.renene.2011.11.032.
- Ozgener, O., Ozgener, L. and Tester, J. W. (2013) 'A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications', *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Elsevier Ltd, 62(1), pp. 473–480. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.031.
- Rybach, L. and Sanner, B. (2000) 'Ground-source heat pump systems - the European Experience', *GHC Bulletin*, (March), pp. 16–26. Available at: <http://www.sanner-geo.de/media/art4.pdf>.