POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Studio numerico dell’efficienza di un muro geotermico per lo stoccaggio di calore nel sottosuolo

Original
Studio numerico dell’efficienza di un muro geotermico per lo stoccaggio di calore nel sottosuolo / Alvi, M.R., Insana, A., Barla, M.. - ELETTRONICO. - (2025), pp. 24-29. (Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2025 (IARG2025) Firenze 10-12 settembre 2025).

Availability:
This version is available at: 11583/3003015 since: 2025-09-12T17:27:21Z

Publisher:
Edizione AGI

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

26 November 2026

STUDIO NUMERICO DELL'EFFICIENZA DI UN MURO GEOTERMICO PER LO STOCCAGGIO DI CALORE NEL SOTTOSUOLO

Maria Romana Alvi
Politecnico di Torino
maria.alvi@polito.it

Alessandra Insana
Politecnico di Torino
alessandra.insana@polito.it

Marco Barla
Politecnico di Torino
marco.barla@polito.it

Sommario

Le geostrutture energetiche possono svolgere un ruolo significativo per la decarbonizzazione del settore del riscaldamento e raffrescamento degli edifici, per cui è necessaria l'adozione di soluzioni tecnologiche che siano adeguate sia alle nuove costruzioni che a quelle esistenti. Le geostrutture energetiche sfruttano il sottosuolo come un serbatoio da cui attingere d'inverno per estrarre calore e trasferirlo agli edifici e in cui immagazzinare il calore in eccesso durante l'estate. Nel 2019 è stato realizzato al Politecnico di Torino un prototipo di parete energetica sotterranea, chiamato GeothermSkin. Il circuito geotermico del prototipo è stato integrato al circuito dei collettori solari termici installati sull'edificio mediante due serbatoi di accumulo attraverso cui il calore viene stoccato ed estratto grazie ad una serie di tubazioni aggiuntive al cui interno scorre un fluido termovettore. Lo scopo di tale integrazione è esplorare l'accumulo di calore solare ad alta e bassa temperatura nel sottosuolo e l'eventuale ricarica termica del terreno. Per studiare la fattibilità del sistema, è stato creato un modello numerico 3D termo-idraulico nel quale le proprietà geotermiche del sottosuolo sono state calibrate sulla base di dati sperimentali. Successivamente sono stati considerati diversi scenari operativi per identificare le modalità di accumulo più efficaci e individuare in via preliminare i parametri più influenti sulle prestazioni del sistema e di cui tener conto in fase di progettazione.

1. Introduzione

Per raggiungere gli obiettivi energetici e climatici che ha posto l'Unione Europea (UE), occorre sviluppare o impiegare tecnologie che permettano la decarbonizzazione del settore edile, eliminando l'uso dei combustibili fossili in quanto, secondo la 'Direttiva sulla Performance Energetica degli edifici' (EU/2024/1275), due terzi dell'energia consumata nel riscaldamento e raffrescamento degli edifici proviene da questi. Ciò deve coinvolgere non solo le nuove costruzioni, ma anche quelle esistenti, in quanto attualmente il 75 % degli edifici nell'UE è inefficiente sul piano energetico.
In questo contesto, soprattutto negli ultimi anni, è cresciuto l'interesse verso le geostrutture energetiche data la loro duplice funzione di supporto strutturale e scambiatore di calore, grazie all'impiego di serpentine idrauliche installate nelle o sulle parti strutturali con all'interno un fluido termovettore che

scorrendo trasporta calore (Barla e Insana, 2023). Tali strutture possono essere applicate in contesti urbani e non urbani, sia sulle nuove costruzioni che su quelle esistenti, inserendosi come opere di retrofitting energetico all'interno di interventi di ristrutturazione (Barla et al., 2025). Oltre alla produzione di energia termica pulita e proveniente da una fonte rinnovabile, possono essere impiegate anche per lo stoccaggio del calore in eccesso, come può esser quello solare (la cui domanda energetica si riduce nettamente nei periodi di maggiore produzione, finendo per non esser utilizzato). Così facendo, ne trarrebbe beneficio anche il rendimento della geostruttura energetica durante la successiva fase di estrazione del calore.
Per ottenere informazioni preliminari sul comportamento di una geostruttura energetica integrata con altri fonti di energia ai fini di stoccaggio di calore, è stato realizzato un modello 3D termo-idraulico del prototipo GeothermSkin, ovvero un muro geotermico esistente non troppo profondo i cui circuiti sono integrati a quelli dei collettori solari termici, per l'esecuzione di analisi predittive termo-idrauliche sotto l'ipotesi di diverse condizioni di funzionamento.

2. Il concetto e prototipo di GeothermSkin

La soluzione di GeothermSkin è nata con l'intenzione di trasformare le superfici interrate degli edifici in sistemi di approvvigionamento geotermico con l'obiettivo di soddisfare in parte o del tutto i requisiti energetici. La tecnologia viene realizzata installando e fissando una serie di circuiti idraulici, della tipologia comunemente adottata nei sistemi di riscaldamento a pavimento, direttamente sulla superficie esterna delle porzioni interrate. La tecnologia è dunque altamente versatile e in grado di adattarsi a tutte le geometrie e costruzioni, anche a quelle esistenti che adottano sistemi di riscaldamento e raffrescamento tradizionali, il cui numero nelle aree urbane risulta molto elevato. L'installazione può avvenire anche in maniera modulare, realizzando più circuiti adiacenti collegati in serie o parallelo, sfruttando semplice circuiteria idraulica come valvole a sfera. Questa caratteristica rappresenta un vantaggio laddove dovessero insorgere danni o perdite localizzate nei singoli moduli, in quanto sarebbe possibile escludere i moduli danneggiati senza compromettere l'intera funzionalità del sistema.

2.1 Il prototipo del Politecnico di Torino

La prima realizzazione di questa tecnologia è avvenuta nel 2019 nell'edificio Energy Center, appartenente al Campus del Politecnico di Torino (Baralis e Barla, 2021). Poiché l'edificio era esistente precedentemente all'installazione del prototipo, è stato prima necessario mettere a nudo la parete interrata. Inizialmente il prototipo era composto di tre moduli geotermici di altezza 4.60 m e larghezza 2.5 m con serpentine disposte sia orizzontalmente che verticalmente. Le tubazioni sono in materiale polimerico (polietilene reticolato, Pe-Xa) e hanno un diametro esterno di 20 mm, spessore di 2 mm e una conducibilità termica di 0.38 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ con rugosità di 0.007 mm; la loro posa e fissaggio sulla parete esterna è avvenuta sfruttando dei cavallotti metallici spaziati 75 cm. Il fluido all'interno è una miscela di acqua e glicole propilenico (25% in volume) con un punto di congelamento di -10 °C. Attraverso dei fori realizzati sul muro a 55 cm dalla superficie del terreno, i circuiti di ogni modulo raggiungono l'intercapedine che si trova a tergo del muro e si collegano al collettore idraulico da cui partono le tubazioni di mandata e ritorno (realizzate in polietilene) verso la pompa di calore. Quest'ultima è una macchina termica che mette in comunicazione il circuito primario (quello geotermico) e il secondario (dell'utente) regolando il trasferimento di calore tra i due circuiti in base ai carichi termici dell'edificio e alle esigenze dell'utente. Nella primavera del 2025, sono state apportate delle modifiche idrauliche al prototipo aggiungendo nuovi circuiti geotermici e predisponendo una connessione tra il campo geotermico e quello solare che permetta il trasferimento del calore raccolto mediante i collettori solari (ubicati sul tetto dell'edificio) nel terreno in base alle scelte dell'utente (Fig. 1). Lo stoccaggio di calore nel terreno potrà avvenire sia a basse che ad alte temperature e in periodi definiti dall'utente, grazie ad un sistema di automazione sviluppato ad hoc.

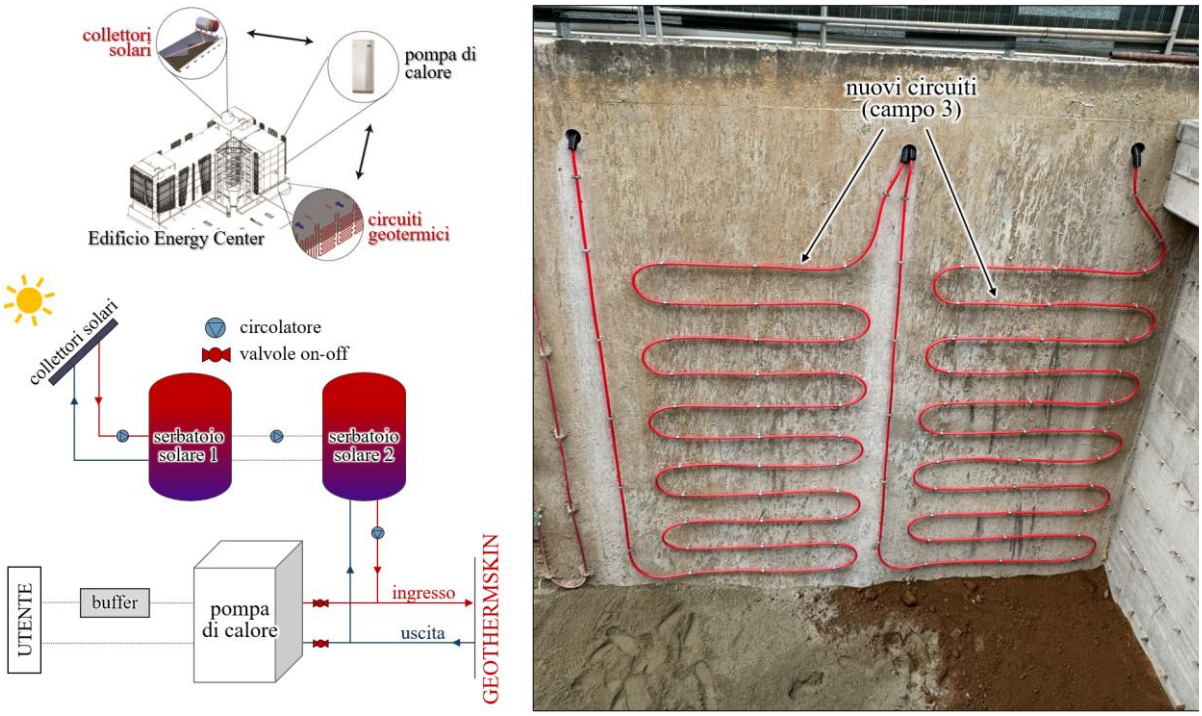

Fig 1. Prototipo Geothermskin: schema con indicazione delle componenti di tutto il prototipo (a sinistra); b) nuovi circuiti idraulici orizzontali (campo 3, a destra).

3. Modellazione numerica

È stato realizzato un modello 3D termo-idraulico nel software COMSOL Multiphysics® v. 6.2 (COMSOL, 2023), riproducendo solo i due circuiti sviluppati orizzontalmente.
Per calibrare le proprietà geotermiche del terreno e validare il modello numerico, sono stati utilizzati i risultati di monitoraggio di campagne sperimentali precedenti (Nguyen, 2020; Baralis e Barla, 2021), con riferimento ai soli circuiti modellati. È stata considerata sia una prova in riscaldamento che in raffrescamento, con i circuiti connessi una volta in parallelo e una volta in serie. Le tubazioni sono state modellate sfruttando elementi monodimensionali ai quali è stata assegnata rugosità, spessore, diametro e conducibilità termica. Le proprietà assegnate al fluido termovettore (miscela di acqua e glicole), invece, sono state calcolate con riferimento alla temperatura media d'ingresso del fluido durante le prove considerate. Sulla base dai dati registrati dai sensori di umidità presenti nel terreno, sono state variate sia le proprietà geotermiche del terreno che il contenuto di acqua e aria nei pori e sono stati paragonati i dati di monitoraggio e quelli numerici in termini di temperature di uscita del fluido termovettore dalle tubazioni e temperatura del terreno in punti a varie profondità e distanze dal muro geotermico. Le proprietà geotermiche del terreno (riporti antropici assimilabili a sabbia con limo) risultanti dalla fase di validazione e che sono adottate per le successive analisi numeriche sono riassunte nella Tabella 1, assieme a quelle degli altri materiali, quali calcestruzzo, aria contenuta nei vuoti del terreno e fluido termovettore (alla temperatura di 20 °C, corrispondente al valore medio in ingresso considerando sia la prova di riscaldamento che raffrescamento).

Tabella 1. Proprietà termiche del terreno e degli altri materiali del modello numerico mostrato in Figura 2.

	Conducibilità termica [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	Calore specifico [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	Densità [$kg \cdot m^{-3}$]
Terreno, strato 1	1.41	790.35	2224.08
Terreno, strato 2	0.75	860.6	2224.08
Terreno, strato 3	2.48	860.6	2224.08
Aria	0.026	1000	1.23
Calcestruzzo	1.12	916.9	2388.46
Fluido termovettore	0.47	3917	1023.44

Dopo la fase di calibrazione, sono state eseguite analisi numeriche con lo scopo di investigare lo stoccaggio di calore a bassa e alta temperatura e in certi periodi di tempo in modo da individuare i fattori più significativi e le migliori condizioni operative per aumentare la resa energetica della geostruttura durante la fase di estrazione di calore. Innanzitutto, è stata ottenuta la distribuzione iniziale della temperatura del sottosuolo applicando per tre anni e mezzo (da gennaio fino ad inizio giugno) la temperatura mensile dell'aria esterna di Torino (misurata nella stazione meteo di ARPA più vicina al sito sperimentale) alla superficie del modello corrispondente alla superficie del terreno, applicando un coefficiente di scambio termico pari a 15 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}$ che tiene in conto sia dello scambio termico per convezione che radiazione. Alla base del modello, invece, è stata imposta la temperatura costante di 15 °C, ritenuto il valore indisturbato di temperatura del sottosuolo nelle zone urbane di Torino (Zaniboni et al., 2025). Durante questa prima fase, la geostruttura energetica è stata supposta esser inattiva, senza che vi fosse alcun flusso nelle tubazioni. Dopo aver inizializzato termicamente il sottosuolo, sono stati riprodotti diversi scenari di stoccaggio di calore e di attivazione termica della geostruttura, durante i quali è stata adottata una connessione in serie per le tubazioni di scambio dei due moduli. La geometria 3D del modello e le condizioni al contorno applicate nelle successive analisi termo-idrauliche sono mostrate in Fig 2.

Sono state assunte tre tipologie di funzionamento durante l'estate (considerata dal 1° giugno al 30 settembre), denominate A1, A2 e A3 come indicato nella Tabella 2. Ogni scenario estivo è stato seguito da un periodo di inattività, fino al 23 ottobre, in cui non è stato previsto alcun funzionamento della geostruttura. In seguito ad ogni scenario estivo, sono stati ipotizzati e studiati 4 scenari invernali (B1, B2, B3 e B4) in cui sono sempre previste 13 h di funzionamento giornaliero del muro energetico per estrarre calore dal terreno, ma con diverso funzionamento notturno. Gli scenari stagionali sono riassunti in Tabella 2.

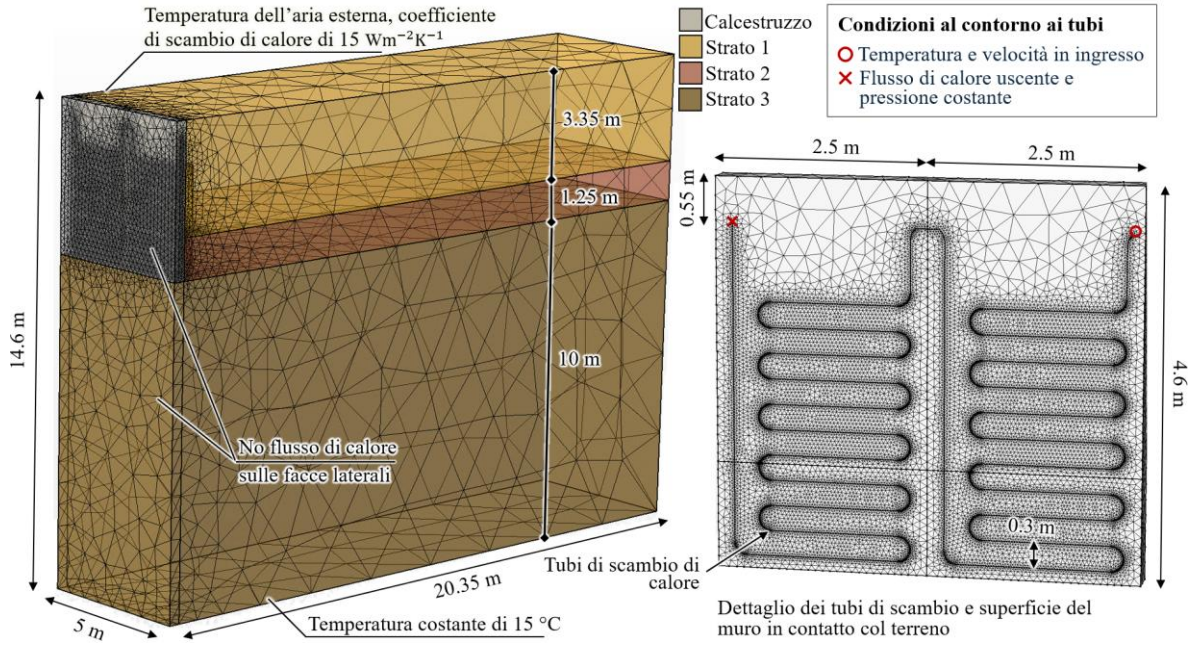

Fig 2. Geometria del modello numerico termo-idraulico e dettaglio del muro geotermico e tubazioni di scambio con indicazione delle condizioni al contorno.

Tabella 2. Scenari stagionali (estivi e invernali) simulati .

Stagione	Nome	Periodo	Funzionamento della geostruttura energetica	
Estate	A1	1 giugno – 30 settembre	Nessuno	
	A2		Raffrescamento (7 h al giorno con T di 28 °C)	
	A3		Stoccaggio (7 h al giorno con T di 60 °C)	
Inverno	B1	23 ottobre – 7 aprile	Estrazione di calore (13 h al giorno con T di 4 °C)	-
	B2			+ 4 h di stoccaggio a 25 °C
	B3			+ 4 h di stoccaggio a 35 °C
	B4			+ 4 h di stoccaggio a 55 °C

I risultati in termini di energia termica estraibile al termine della stagione invernale mediante la geostruttura energetica in tutti gli scenari ipotizzati sono riportati in Fig. 3, assieme alla distribuzione delle temperature sulla superficie del muro a contatto con il terreno negli scenari A3+B1 e A3+B3. Indipendentemente dallo scenario di funzionamento adottato durante la stagione estiva, la performance della geostruttura energetica nella stagione di riscaldamento aumenta notevolmente nel caso vi sia anche stoccaggio di calore sotterraneo durante l'inverno (scenari B2, B3, B4) rispetto al caso in cui non è previsto (B1). Come prevedibile, tale aumento cresce con la temperatura del fluido in ingresso (assunta pari a 25 °C, 35 °C e 55 °C), e approssimativamente di 16-18 $kWh \cdot m^{-2}$ per ogni 10 °C a prescindere dallo scenario estivo considerato. In dettaglio, confrontando la performance della geostruttura al termine della stagione di riscaldamento, nei casi con e senza stoccaggio di calore invernale si misura:

- successivamente allo scenario estivo A1, l'energia termica estraibile adottando le modalità di funzionamento B2, B3 e B4 è maggiore del 177 % (A1+B2), 261 % (A1+B3) e 449 % (A1+B4) rispetto al caso senza stoccaggio di calore durante le 4 ore notturne (A1+B1).
- successivamente allo scenario estivo A2, l'energia termica estraibile adottando le modalità di funzionamento B2, B3 e B4 è maggiore del 148 % (A2+B2), 225 % (A2+B3) e 381.5 % (A2+B4) rispetto al caso senza stoccaggio di calore durante le 4 ore notturne (A2+B1).
- successivamente allo scenario estivo A3, l'energia termica estraibile adottando le modalità di funzionamento B2, B3 e B4 è maggiore del 112.5 % (A3+B2), 171 % (A3+B3) e 294 % (A3+B4) rispetto al caso senza stoccaggio di calore durante le 4 ore notturne (A3+B1).

Dai risultati mostrati in Fig 3 si evince anche che il contributo dato dallo stoccaggio notturno durante la stagione invernale, in cui avviene l'estrazione di calore, sia fondamentale per il miglioramento della performance del muro geotermico rispetto a quello dato dallo stoccaggio estivo (anche alla temperatura di 60 °C dello scenario A3). Va infatti tenuto in considerazione che la profondità della geostruttura esaminata è inferiore ai 5 m, che non è presente alcuna forma di isolamento rispetto alle condizioni ambientali esterne, e che il terreno si trova molto al di sopra del livello della falda (e pertanto è stato considerato del tutto insaturo). Pertanto, dal termine della fase di stoccaggio estivo sotterraneo fino all'inizio del periodo invernale, parte del calore accumulato nel terreno è stato disperso, in particolare in prossimità della zona di scambio. In Fig 4 viene mostrata la distribuzione della temperatura nel volume di terreno a diretto contatto col muro geotermico in due periodi di riferimento dello scenario di stoccaggio A3: nello specifico, al termine del periodo di stoccaggio estivo, a metà di un modulo del muro geotermico, la temperatura a 1 m di distanza si trova a 38.5 °C, mentre all'inizio della fase di riscaldamento invernale si abbassa fino al valore di 30.0 °C; in prossimità delle tubazioni di scambio, invece, la temperatura diminuisce da 49.2 °C fino a 33 °C.

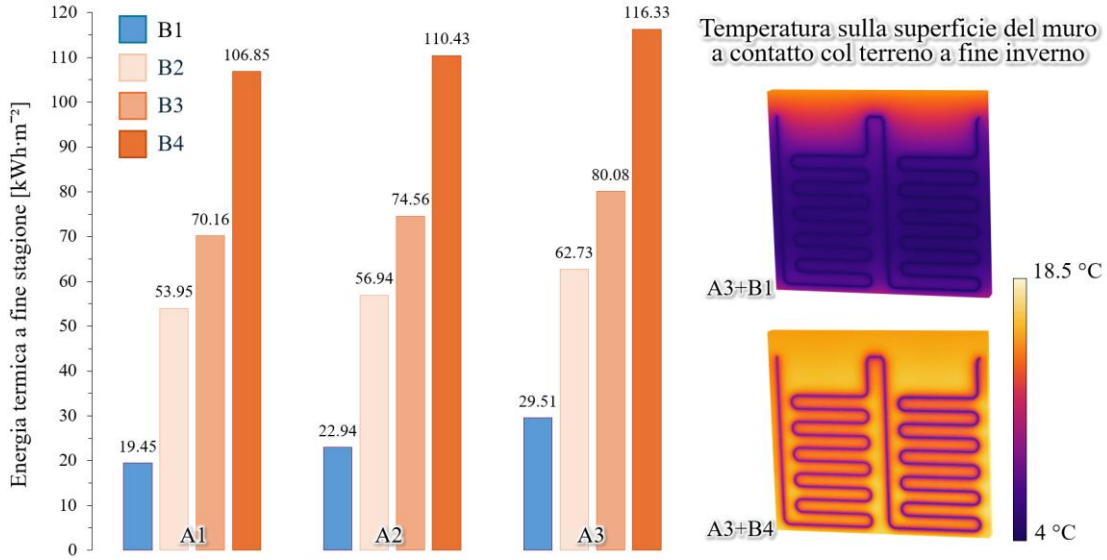

Fig 3. Energia termica estraibile alla fine della stagione di riscaldamento in tutti gli scenari simulati (a sinistra) e temperatura sulla superficie del muro a contatto col terreno in due scenari di riferimento (a destra).

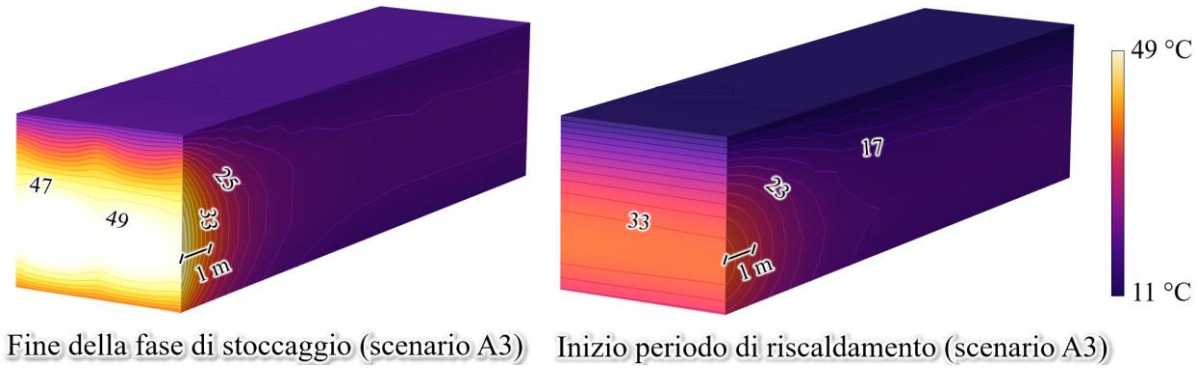

Fig. 4. Temperatura nel terreno a diretto contatto col muro geotermico alla fine del periodo di stoccaggio (a sinistra) e prima della fase di estrazione di calore invernale (a destra), per lo scenario A3.

4. Conclusioni

Al Politecnico di Torino è stato realizzato un prototipo di muro energetico per scambiare calore geotermico. Di recente, sono state apportate delle modifiche idrauliche alla geostruttura per ampliare il numero dei circuiti geotermici e permettere il trasferimento del calore proveniente dai collettori solari nel sottosuolo. Per quantificare in maniera preliminare il miglioramento della resa energetica del sistema durante la stagione di riscaldamento, a seguito dello stoccaggio di calore nel terreno a contatto con la geostruttura, sono state eseguite analisi numeriche termo-idrauliche. I vari scenari hanno evidenziato che vi è un beneficio in termini di calore estratto durante l'inverno, se avviene una fase di stoccaggio di calore nel sottosuolo sia durante la stagione precedente, ma in particolare durante la stagione stessa in cui avviene il recupero di calore. Tali risultati forniscono spunti utili per la campagna sperimentale che verrà eseguita con il nuovo prototipo Geothermskin.

Ringraziamenti

Lo studio è stato realizzato nell'ambito dei progetti "NEST- Network 4 Energy Sustainable Transition" finanziato nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), Missione 4 Componente 2 Investimento 1.3 - Bando n. 1561 del 11/10/2022 del Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR) e "GEOREFIT- Closing knowledge gaps on energy geostructures for retrofitting of buildings and infrastructures" finanziato dal MUR nell'ambito del programma PRIN 2022 (D.D.104-02/02/2022).

Bibliografia

EU/2024/1275 – Direttiva del Parlamento Europeo e Consiglio Europeo del 24 Aprile 2024 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione). Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, Serie L.

Baralis M., Barla M. (2021). "Development and testing of a novel geothermal wall system", *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 12, 689-704.

Barla M., Insana A. (2023). "Energy tunnels as an opportunity for sustainable development of urban areas", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 132, 104902.

Barla M., Cecinato F., Salciarini D., Sterpi D., Alvi M. R., Angelotti A., Capati G., De Feudis S., Gerola M., Insana A., Lupattelli A., Morcioni A., Rafai M. e Scerbo M. (2025). "Utilizzo delle geostrutture energetiche per il retrofitting di edifici e infrastrutture". Atti del XXVIII Convegno Nazionale Di Geotecnica. Sicurezza, Manutenzione e Sviluppo Delle Infrastrutture, Venezia, 1–8.

COMSOL Multiphysics® v. 6.2 (2023). www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

Nguyen B. (2020). Interpretation of an experimental campaign of an energy wall. Tesi magistrale. Politecnico di Torino. Torino.

Zaniboni L., De Luca D. A., Egidio E., Cocca D., Filipello A. e Lasagna M. (2025). "Understanding groundwater behaviour in urban environments: thermal and piezometric analysis in the Turin city area (NW Italy)". *Groundwater for Sustainable Development*, 30, 101472.