



## مطالعه‌ی عددی اثر ضریب انبساط حرارتی شمع و خاک بر پاسخ مکانیکی شمع انرژی

محمد رضا صادق‌زاده، محمدمهدی احمدی\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۶  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

### کلمات کلیدی:

شمع انرژی  
ضریب انبساط حرارتی  
بارگذاری حرارتی متناوب  
مدل‌سازی تفاضل محدود  
خاک رس اشباع

**خلاصه:** با توجه به آلودگی‌های زیست محیطی حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی، جایگزین کردن انرژی‌های پاک به جای سوخت‌های فسیلی به یکی از مهم‌ترین مسائل در سطح جهان تبدیل شده است. استفاده از شمع‌های انرژی به منظور تبادل حرارت روسازها با زمین از جمله روش‌های بهره‌مندی از انرژی پاک است و با توجه به مزیت‌های این روش، استفاده از آن در سطح جهان در حال افزایش است. به منظور حفظ ایمنی و امکان بهره‌برداری مناسب از سازه‌های ساخته شده بر روی شمع‌های انرژی، لازم است تا اثرات تبادل حرارت بین شمع‌های انرژی و زمین بر پاسخ مکانیکی شمع و همچنین اثر پارامترهای مختلف بر اندرکنش بین شمع انرژی و خاک به درستی مطالعه شود. در این مقاله ابتدا با استفاده از نرم‌افزار FLAC، مدلی سه بعدی با روش حل تفاضل محدود به منظور تحلیل حرارتی - مکانیکی شمع انرژی ایجاد شده و با مقایسه‌ی نتایج مدل حاضر با نتایج آزمون‌های صحرایی و عددی سایر محققین، صحت‌سنجی شده است. با استفاده از مدل عددی حاضر، اثرات تغییر ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی و خاک رس بر تنش محوری، اصطکاک در جداره شمع و جابه‌جایی محوری در طول شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی سرمایشی و گرمایشی متناوب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات ضریب انبساط حرارتی مصالح شمع، باعث ایجاد تغییرات قابل توجه بر رفتار شمع انرژی تحت گرمایش و سرمایش می‌شود؛ در حالی که تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک اثرات اندکی بر رفتار مکانیکی شمع انرژی، تنها در زمان بارگذاری حرارتی گرمایشی دارد.

### ۱- مقدمه

که برخلاف سیستم‌های مرسوم نظیر گمانه‌های زمین گرمایی<sup>۱</sup>، نیاز به حفر گمانه‌های جداگانه به منظور تبادل حرارت با زمین را ندارند؛ بنابراین ضمن کاهش فضای مورد نیاز جهت نصب، هزینه‌های حفر گمانه اضافه نیز در شمع‌های انرژی وجود ندارد [۴]. همچنین مطالعات اخیر نشان می‌دهند که استفاده از شمع‌های انرژی از دهه‌ی ۸۰ میلادی تا سال ۲۰۱۸، باعث جلوگیری از تولید بیش از ۲۰ هزار تن گاز دی‌اکسید کربن در سطح جهان شده است. این مزیت‌ها باعث افزایش روزافزون استفاده از شمع‌های انرژی در سطح جهان شده است [۵]. شمع‌های انرژی علاوه بر تبادل حرارت، وظیفه‌ی باربری و کنترل جابه‌جایی فونداسیون‌ها را نیز بر عهده دارند؛ بنابراین به منظور حفظ ایمنی و امکان بهره‌برداری مناسب از سازه‌های ساخته شده بر روی شمع‌های انرژی، لازم است تا اثرات تبادل حرارت بین شمع‌های انرژی و زمین و همچنین اثر پارامترهای مختلف بر اندرکنش بین

افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه آلودگی‌های زیست محیطی و تغییرات اقلیم گسترده در سطح جهان شده است. از این رو، مدیریت منابع انرژی و جایگزین کردن انرژی‌های پاک همچون انرژی زمین گرمایی به جای سوخت‌های فسیلی، به یکی از مهم‌ترین مسائل در سطح جهان تبدیل شده است [۲ و ۱]. در دهه‌های اخیر، استفاده از پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی (GSHP<sup>۱</sup>) برای تبادل حرارت روسازه‌ها<sup>۲</sup> با زمین و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، بسیار گسترش یافته است [۳]. شمع‌های انرژی<sup>۳</sup> یک از انواع سیستم‌های GSHP هستند

- 1 Ground Source Heat Pump
- 2 superstructures
- 3 energy piles

4 geothermal boreholes

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mmahmadi@sharif.edu

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



شمع و خاک، تنش‌ها و جابه‌جایی‌های ایجاد شده در شمع انرژی به درستی مطالعه شود [۶].

در دو دهه‌ی گذشته محققین زیادی به بررسی رفتارهای همبسته‌ی حرارتی - مکانیکی<sup>۱</sup> شمع‌های انرژی به خصوص با تمرکز بر آزمون‌های صحرایی پرداخته‌اند. لویی و همکاران<sup>۲</sup> [۱] به بررسی تنش محوری و جابه‌جایی شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی و بازیابی حرارتی<sup>۳</sup> (بازگشت به دمای اولیه) پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش دمای شمع انرژی باعث ایجاد تنش محوری فشاری و کرنش محوری انبساطی در طول شمع می‌شود و با بازگشت شمع به دمایی نزدیک به حالت اولیه، تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده نیز تقریباً به حالت اولیه خود باز می‌گردند و می‌توان رفتار شمع انرژی را از دیدگاه مکانیکی به صورت الاستیک در نظر گرفت. بورن وب و همکاران<sup>۴</sup> [۷] به بررسی اندرکنش شمع انرژی و خاک رس اشباع تحت بارگذاری همبسته‌ی حرارتی - مکانیکی پرداختند. با توجه به نتایج به دست آمده گزارش کردند که بارگذاری حرارتی یک شمع انرژی که تحت بار مکانیکی ثابت قرار دارد، می‌تواند مقدار تنش اصطکاکی در جداره شمع را با توجه به این که بارگذاری حرارتی از نوع گرمایشی یا سرمایشی باشد، کاهش یا افزایش دهد. ژیانگ و همکاران<sup>۵</sup> [۸] شمع‌های انرژی کوبشی تحت بارگذاری‌های مختلف حرارتی - مکانیکی را با استفاده از آزمون‌های صحرایی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، نوع نصب شمع‌های انرژی و همچنین مقدار بار مکانیکی وارد بر سر شمع، باعث تغییر جابه‌جایی‌های ایجاد شده در سر شمع و همچنین تغییر مقدار تنش محوری در طول شمع انرژی می‌شود. چن و همکاران<sup>۶</sup> [۹] نیز از یک مدل صحرایی شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی تنها، برای بررسی رفتار حرارتی - مکانیکی شمع انرژی استفاده کردند. نتایج این پژوهش بیان‌کننده‌ی اثر قابل توجه شرایط گیرداری سر و نوک شمع بر پاسخ‌های مکانیکی آن و همچنین محل تشکیل بیشترین تنش محوری در طول شمع است. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مقدار تنش محوری در شمع انرژی رابطه‌ای نسبتاً خطی

با میزان تغییرات دما دارد.

در سال‌های اخیر مطالعات عددی مختلفی به منظور بررسی اثر تغییر پارامترهای مختلف بر رفتار حرارتی - مکانیکی شمع‌های انرژی انجام شده است. سالسیارینی و همکاران<sup>۷</sup> [۱۰] با استفاده از مدل عددی المان محدود به بررسی رفتار حرارتی - مکانیکی شمع‌های انرژی در یک گروه شمع پرداختند. بر اساس نتایج این پژوهش، فاصله شمع‌های انرژی فعال در گروه شمع انرژی بر پاسخ‌های مکانیکی شمع تاثیر قابل توجهی دارد. همچنین با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای ضریب انبساط حرارتی و ضریب رسانایی حرارتی خاک، مشاهده کردند که تغییرات این دو پارامتر تاثیر بسیار اندکی بر پاسخ‌های مکانیکی گروه شمع انرژی دارد. سانگ و همکاران<sup>۸</sup> [۱۱] با استفاده از مدل عددی المان محدود به بررسی اثر سختی خاک ماسه‌ای بر میزان جابه‌جایی و تنش محوری در طول شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی و سرمایشی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاهش مدول الاستیسیته‌ی خاک باعث کاهش تنش محوری و افزایش جابه‌جایی شمع انرژی می‌شود. یانگ و همکاران<sup>۹</sup> [۱۲] اثرات بارگذاری حرارتی مختلف بر جابه‌جایی‌های برگشت‌ناپذیر شمع انرژی را با استفاده از روش المان محدود تحت بارگذاری حرارتی تنها، بررسی کردند. بر اساس نتایج این پژوهش، گرمایش شمع انرژی جابه‌جایی برگشت‌ناپذیر بسیار اندکی در سر شمع ایجاد می‌کند و با بازگشت شمع انرژی به دمای اولیه، مقدار جابه‌جایی در سر شمع تقریباً صفر می‌شود. این در حالی است که سرمایش شمع انرژی باعث ایجاد نشست‌های برگشت‌ناپذیر قابل توجهی می‌شود و هر چه اختلاف دمای اعمال شده به شمع بیشتر باشد، جابه‌جایی‌های برگشت‌ناپذیر نیز بزرگ‌تر می‌شوند. اسدی و همکاران [۱۳] اثر افزایش دما بر مقاومت برشی در سطح مشترک خاک و بتن را با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش دمای شمع انرژی به طور متوسط باعث افزایش مقاومت برشی در سطح مشترک خاک و شمع می‌گردد.

همچنین برخی پژوهشگران با شبیه‌سازی مدل‌های واقعی در ابعاد کوچک‌تر در آزمایشگاه، رفتار حرارتی - مکانیکی شمع‌های

- 1 thermo – mechanical
- 2 Laloui et. al
- 3 thermal recovering
- 4 Bourne – Webb et. al
- 5 Jiang et. al
- 6 Chen et. al

- 7 Salciarini et. al
- 8 Sung et. al
- 9 Yang et. al

در پژوهش‌های پیشین تنها به بررسی اثر مقادیر مختلف خصوصیات حرارتی خاک بر تنش محوری یا جابه‌جایی سر شمع انرژی پرداخته شده است و از مطالعه‌ی سایر پاسخ‌های مکانیکی همچون اصطکاک در جداری شمع انرژی صرف‌نظر شده است.

هدف این پژوهش، بررسی اثر مقادیر مختلف ضریب انبساط حرارتی شمع‌های انرژی بتنی و مقادیر مختلف ضریب انبساط حرارتی خاک‌های رسی بر پاسخ مکانیکی شمع‌های انرژی است. با توجه به این که تاکنون بررسی پارامترهای مدنظر برای تک شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی متناوب انجام نشده است، این مقاله سعی دارد تا اثر تغییر ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی و خاک رسی را در یک سیکل کامل بارگذاری حرارتی متناوب (شامل ابتدا یک دوره‌ی گرمایش سپس سرمایش و در انتها بازگشت به دمای اولیه) مطالعه کند. همچنین با توجه به این که در پژوهش‌های پیشین اثر پارامترهای مدنظر تنها بر مقدار تنش محوری و جابه‌جایی در سر شمع انرژی بررسی شده است، در این مقاله علاوه بر تنش‌های محوری و جابه‌جایی ایجاد شده در طول شمع انرژی، اثرات تغییر ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی و خاک رسی بر تنش اصطکاک در جداری شمع انرژی نیز با استفاده از یک مدل عددی سه بعدی، مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- مباحث نظری و مدل‌سازی عددی

### ۲-۱- مدل عددی

در این پژوهش به منظور تحلیل حرارتی - مکانیکی شمع انرژی، از مدل عددی سه بعدی با روش حل تفاضل محدود<sup>۵</sup> در نرم‌افزار FLAC سه بعدی<sup>۶</sup> استفاده شده است. ابتدا برای صحت‌سنجی مدل عددی، به مقایسه‌ی پاسخ‌های مکانیکی و حرارتی شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی - مکانیکی در مدل حاضر با پژوهش صحرائی انجام شده در دانشگاه لمبت لندن<sup>۷</sup> [۱۹، ۱۸ و ۱۷] و مدل عددی تعریف شده توسط هان<sup>۸</sup> و همکاران [۲۰] بر اساس نتایج پژوهش صحرائی دانشگاه لمبت پرداخته شده است. در این مدل، شمع انرژی به طول ۲۳ متر با قطر متوسط ۰/۵۵ متر تحت بار مکانیکی ثابت و بارگذاری حرارتی متناوب درون خاک رسی اشباع قرار دارد. کل مدت زمان

انرژی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. وو و همکاران<sup>۱</sup> [۱۴] با استفاده از مدل کوچک مقیاس آزمایشگاهی به بررسی رفتار حرارتی - مکانیکی شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی متناوب<sup>۲</sup> پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مقدار جابه‌جایی برگشت‌ناپذیر ایجاد شده تحت بارگذاری‌های حرارتی متناوب، در شمع‌های انرژی اتکایی بیشتر از شمع‌های اصطکاک است. روتا لوریا و همکاران<sup>۳</sup> [۱۵] اثرات بارگذاری‌های حرارتی مختلف را بر رفتار مکانیکی شمع انرژی با استفاده از مدل آزمایشگاهی مطالعه کردند. بر اساس نتایج این پژوهش گزارش شده است که تشدید تغییرات دمای اعمال شده به شمع، اثر قابل توجهی بر مقاومت اصطکاک جداره و همچنین مقاومت نوک شمع انرژی دارد. نگوین و همکاران<sup>۴</sup> [۱۶] به بررسی نشست‌های برگشت‌ناپذیر شمع‌های انرژی تحت بارگذاری همبسته حرارتی - مکانیکی در بلند مدت با استفاده از مدل آزمایشگاهی در خاک رس پرداختند. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری حرارتی، نشست‌های برگشت‌ناپذیر در سر شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی - مکانیکی افزایش می‌یابد و هر چه بار مکانیکی در سر شمع بیشتر باشد، نرخ افزایش نشست‌های برگشت‌ناپذیر تحت بارگذاری حرارتی یکسان، بیشتر می‌شود. یانگ و همکاران [۱۷] با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی به بررسی اثر تراوش آب در خاک بر رفتار مکانیکی و حرارتی شمع انرژی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، زمانی که سرعت تراوش آب در خاک زیاد باشد، مقدار کرنش و جابه‌جایی‌های ایجاد شده در شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی، تعدیل می‌یابد.

همان‌طور که در متون فنی گذشته مشاهده می‌شود، در اکثر پژوهش‌ها به بررسی اثر خصوصیات مختلف خاک و انواع مختلف بارگذاری‌های حرارتی و حرارتی - مکانیکی بر جابه‌جایی‌های ایجاد شده در سر شمع و توزیع تنش محوری در طول آن پرداخته شده است. با توجه به استفاده از مصالح مختلف در ساخت شمع‌های انرژی، این شمع‌ها خصوصیات حرارتی نظیر ضریب انبساط حرارتی متفاوتی در پروژه‌های مختلف دارند و لازم است تا اثر مقادیر مختلف خصوصیات حرارتی شمع‌ها بر پاسخ‌های مکانیکی آن‌ها مطالعه شود. همچنین

5 Finite difference method  
6 FLAC 3D  
7 Lambeth College, London  
8 Han

1 Wu et. al  
2 cyclic thermal loading  
3 Rotta Loria et. al  
4 Nguyen et. al

شبکه‌بندی شده است. ابعاد المان‌ها و شبکه‌بندی انجام شده بر اساس آنالیز حساسیت انتخاب شده است. در مدل‌سازی انجام شده مرز فوقانی کاملاً آزاد است؛ همچنین جابه‌جایی مرز تحتانی با استفاده از تکیه‌گاه مفصلی و سایر مرزها با تکیه‌گاه غلتکی محدود شده است. لازم به ذکر است که به جز مرز فوقانی که می‌تواند با خاک و شمع انرژی تبادل حرارت داشته باشد، دمای سایر مرزها ثابت در نظر گرفته شده است. در مدل حاضر دمای اولیه خاک و شمع انرژی مشابه آن چه که در پژوهش صحرایی گزارش شده برابر  $20^{\circ}\text{C}$  فرض شده است. به منظور در نظر گرفتن اندرکنش میان شمع انرژی و خاک اطراف، از المان‌های حد فاصل<sup>۱</sup> در سطح مشترک شمع انرژی و خاک اطراف آن استفاده شده است. در نرم‌افزار FLAC لازم است تا حتماً سختی قائم ( $k_n$ )، سختی برشی ( $k_s$ ) و مقاومت برشی المان‌های حد فاصل مشخص گردد. مقدار سختی قائم و برشی المان‌های حد فاصل باید به نحوی باشد که تحت بارگذاری‌های انجام شده، شمع آزادانه در خاک جابه‌جا نشود و در عین حال این المان‌ها باید بتوانند احتمال لغزش شمع در خاک، جابه‌جایی نسبی شمع و خاک و انتقال نیرو بین آن‌ها را در نظر بگیرند. بدین منظور بر اساس پیشنهاد نرم‌افزار، سختی برشی و قائم المان‌های حد فاصل به ترتیب مطابق رابطه‌ی (۱) و (۲) در نظر گرفته شده است:

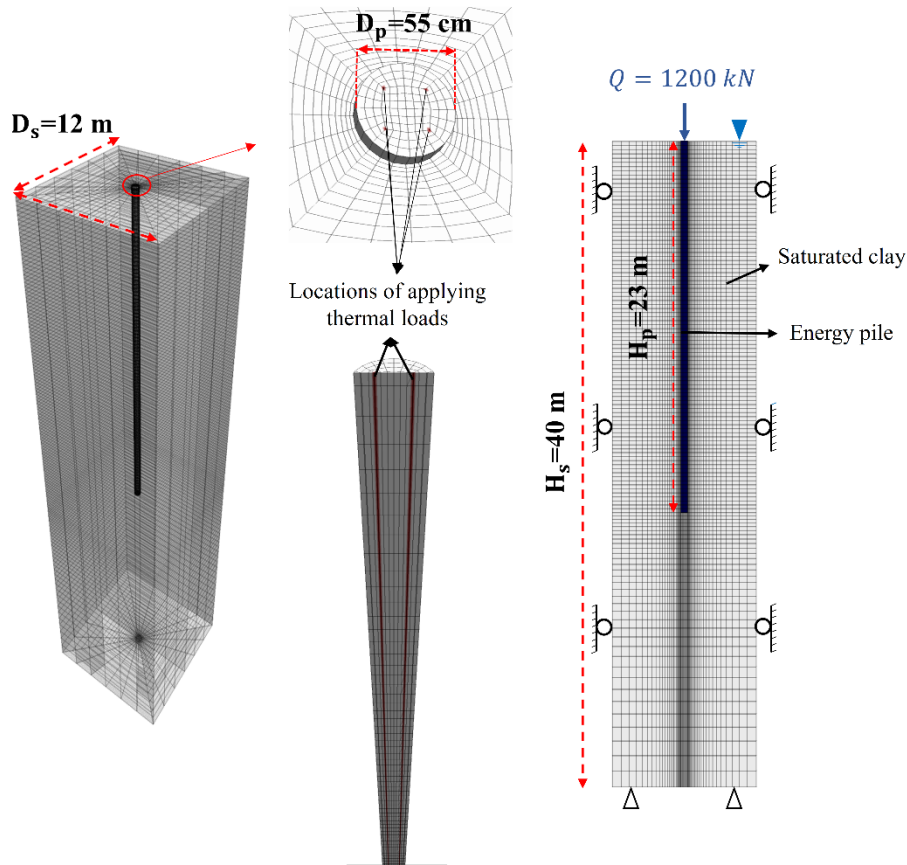
$$k_s = \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta Z_{\min}} \quad (1)$$

$$k_n = 10k_s \quad (2)$$

در این روابط  $K$  و  $G$  به ترتیب مدول بالک و مدول برشی خاک و  $\Delta Z_{\min}$  اندازه‌ی کوچک‌ترین بعد المان خاک در مجاورت المان حد فاصل است.

برای تعیین مقاومت برشی المان‌های حد فاصل لازم است تا زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی این المان‌ها مشخص گردد. با توجه به این که در آزمایش صحرایی زاویه اصطکاک داخلی خاک رس اشباع برابر با صفر گزارش شده، در این پژوهش نیز مقدار زاویه‌ی

بارگذاری حرارتی  $43^{\circ}\text{C}$  روز است که شامل  $31$  روز دوره‌ی سرمایش و  $12$  روز گرمایش می‌شود و در تمام این مدت بار مکانیکی ثابت  $1200$  کیلونیوتن به سر شمع اعمال می‌شود. در پژوهش دانشگاه لمبث، در دوره‌های سرمایش و گرمایش به ترتیب سیال با دمای  $6^{\circ}\text{C}$  و  $40^{\circ}\text{C}$  درون لوله‌های انتقال سیال شمع انرژی به چرخش درآمده است. در این پژوهش نحوه‌ی بارگذاری حرارتی به صورت اعمال دمای سیال ورودی به محل‌های قرارگیری لوله‌های انتقال سیال درون شمع انرژی است و از مدل‌سازی لوله‌های انتقال سیال و چرخش سیال صرف نظر شده است. شکل ۱ هندسه، شبکه‌بندی، محل‌های اعمال بارگذاری حرارتی و مکانیکی و همچنین شرایط مرزی مکانیکی مدل حاضر را نشان می‌دهد. در برخی از پژوهش‌های پیشین [۲۱ و ۱۲] فاصله‌ی مرزهای عمودی مدل تا جداره‌ی شمع انرژی حدود  $10$  برابر قطر شمع در نظر گرفته شده است. در این پژوهش نیز ابتدا فاصله‌ی مرزهای عمودی مدل از جداره‌ی شمع انرژی کمی بیش از  $10$  برابر قطر شمع انرژی در نظر گرفته شد؛ سپس آنالیزهای حساسیت نشان دادند که کاهش فاصله‌ی مرزهای عمودی مدل تا جداره‌ی شمع به کمتر از  $10$  برابر قطر شمع، باعث تغییر نتایج می‌شود؛ در عین حال افزایش این فاصله به بیش از  $10$  برابر قطر شمع تقریباً تأثیری بر نتایج ندارد و تنها زمان محاسبات را افزایش می‌دهد؛ بنابراین در این مقاله نیز فاصله‌ی مرزهای عمودی تا جداره‌ی شمع کمی بیش از  $10$  برابر قطر شمع انرژی در نظر گرفته شده است. برای تعیین فاصله‌ی مرز افقی تحتانی تا انتهای شمع نیز مشابه تعیین فاصله‌ی مرزهای عمودی، از آنالیز حساسیت استفاده شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، کاهش فاصله‌ی انتهای شمع تا مرز افقی تحتانی به کمتر از  $0.5$  برابر ارتفاع شمع، باعث تغییر نتایج می‌شود در حالی که افزایش این فاصله به بیش از  $0.5$  برابر ارتفاع شمع، تغییر قابل توجهی در نتایج حاصل نمی‌کند؛ بنابراین در این مقاله به منظور حفظ دقت نتایج، فاصله‌ی انتهای شمع انرژی تا مرز افقی تحتانی، حدود  $0.739$  برابر ارتفاع شمع ( $17$  متر) در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور افزایش دقت و کاهش زمان محاسبات، در شمع انرژی و نواحی نزدیک به آن از المان‌هایی با ابعاد کوچک و با فاصله گرفتن از شمع از المان‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر استفاده شده است. لازم به ذکر است که ارتفاع شمع انرژی به  $92$  قسمت مساوی (فواصل  $25$  سانتی‌متری) و سطح شمع انرژی در هر مقطع از آن به  $54$  قسمت



شکل ۱. هندسه، شبکه‌بندی، بارگذاری حرارتی و مکانیکی و شرایط مرزی مدل عددی

Fig. 1. Geometry, meshing, thermal and mechanical loading and boundary conditions of the numerical model

### ۲-۱-۱- مبانی نظری انتقال حرارت

تابش<sup>۱</sup>، همرفت<sup>۲</sup> و رسانش<sup>۳</sup>، مکانیزم‌های انتقال حرارت در طبیعت هستند. بر اساس مطالعات انجام شده، درصد مشارکت تابش در انتقال حرارت در خاک‌های درشت‌دانه حدود ۱٪ و در خاک‌های ریزدانه کمتر از ۱٪ است [۲۲]. همچنین پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهند که روش انتقال حرارت همرفت زمانی تاثیر قابل توجهی دارد که خاک اشباع و نفوذپذیری بالایی داشته باشد [۲]؛ بنابراین با توجه به ریزدانه بودن خاک در این پژوهش، از روش‌های انتقال حرارت تابش و همرفت صرف نظر شده و تنها از روش رسانش در مدل‌سازی عددی استفاده شده است.

اصطکاک داخلی خاک و همچنین زاویه‌ی اصطکاک داخلی المان‌های حد فاصل برابر با صفر در نظر گرفته شده است. مقدار چسبندگی المان‌های حد فاصل در پژوهش‌های عددی مشابه، بین ۰/۶۷ تا ۱ مقدار چسبندگی خاک اطراف شمع در نظر گرفته شده است. در مدل عددی این پژوهش، مقدار چسبندگی المان‌های حد فاصل برابر با ۰/۶۷ چسبندگی خاک مجاور شمع انرژی در هر تراز ارتفاعی در نظر گرفته شده است؛ زیرا بر اساس آنالیز حساسیت انجام شده، زمانی که چسبندگی المان‌های حد فاصل برابر با ۰/۶۷ چسبندگی خاک در نظر گرفته می‌شود، پاسخ‌های مکانیکی شمع انرژی در مدل حاضر، تطابق بهتری با پاسخ‌های شمع انرژی در مدل صحرایی دارند.

- 1 radiation
- 2 convection
- 3 conduction

نیروی گرانش است.

با فرض رفتار الاستیک خطی برای شمع انرژی، تانسور تنش کل از رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}(\varepsilon_{kl} - \alpha \Delta T \delta_{kl}) \quad (7)$$

در این رابطه  $C_{ijkl}$  تانسور سختی (شامل مدول یانگ ( $E$ ) و ضریب پواسون ( $\nu$ ))،  $\varepsilon_{kl}$  تانسور کرنش کل،  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی و  $\delta_{kl}$  دلتای کرونکر هستند.

### ۲-۱-۳ مدل رفتاری و مشخصات مصالح

در مدل عددی حاضر انتقال حرارت تنها از طریق رسانش و مشخصات حرارتی مصالح (ضریب انبساط حرارتی، ضریب رسانایی حرارتی و گرمای ویژه) به صورت همسان<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهش‌های پیشین [۱]، رفتار شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی نزدیک به حالت الاستیک است، به همین منظور در مدل عددی حاضر نیز رفتار شمع انرژی به صورت حرارتی - الاستیک در نظر گرفته شده است. برای خاک رسی اشباع نیز با توجه به مشخصات گزارش شده از مدل صحرایی، مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک دراکر - پراگر<sup>۳</sup> و موهر - کولمب<sup>۴</sup> مورد بررسی قرار گرفتند و در نهایت با توجه به تطابق بهتر نتایج به دست آمده با استفاده از مدل رفتاری موهر - کولمب، در ادامه‌ی پژوهش از مدل رفتاری موهر - کولمب برای خاک استفاده شده است.

در جدول ۱ مشخصات هندسی، حرارتی و مکانیکی شمع انرژی و خاک نشان داده شده است. این مشخصات بر اساس گزارش‌ها و مدل‌سازی‌های انجام شده از پژوهش صحرایی در دانشگاه لمبث لندن است [۲۶، ۲۰-۱۸ و ۷] و برای صحت‌سنجی مدل عددی استفاده شده است.

### ۲-۱-۴ صحت‌سنجی مدل عددی

در این بخش به منظور اطمینان از صحت مدل عددی، به مقایسه‌ی پاسخ‌های مکانیکی و حرارتی به دست آمده از مدل حاضر

معادله‌ی انتقال حرارت از طریق رسانش مطابق رابطه (۳) است [۲۳]. این رابطه پارامترهای تاثیرگذار در انتقال حرارت از طریق رسانش در خصوص شمع انرژی و محیط خاکی را نشان می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است که انتقال حرارت از طریق رسانش در نرم‌افزار FLAC نیز بر اساس این رابطه است.

$$(\rho C)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \lambda_{eff} \nabla T \quad (3)$$

در این رابطه  $(\rho C)_{eff}$  ظرفیت گرمایی حجمی موثر در فشار ثابت،  $T$  دما،  $t$  زمان،  $\nabla$  عملگر دیفرانسیلی بردار<sup>۱</sup> (گرادیان) و  $\lambda_{eff}$  ضریب رسانایی حرارتی موثر است.

در محیط‌های متخلخل مانند خاک،  $(\rho C)_{eff}$  و  $\lambda_{eff}$  به ترتیب از روابط (۴) و (۵) به دست می‌آیند:

$$(\rho C)_{eff} = \theta_f \rho_f C_{p,f} + (1 - \theta_f) \rho_s C_{p,s} \quad (4)$$

$$\lambda_{eff} = \theta_f \lambda_f + (1 - \theta_f) \lambda_s \quad (5)$$

در این روابط  $\theta_f$  نسبت حجمی سیال منفذی به دانه‌های جامد،  $\rho_f$  چگالی سیال منفذی،  $C_{p,f}$  ظرفیت گرمایی ویژه سیال منفذی در فشار ثابت،  $\rho_s$  چگالی ذرات جامد،  $C_{p,s}$  ظرفیت گرمایی ویژه ذرات جامد در فشار ثابت،  $\lambda_f$  و  $\lambda_s$  به ترتیب ضریب رسانایی حرارتی سیال منفذی و ذرات جامد هستند.

### ۲-۱-۲ مبانی نظری تنش‌های حرارتی در شمع‌های انرژی

معادله‌ی تعادل استاتیکی شمع انرژی مطابق رابطه (۶) است [۲۴]:

$$\nabla \cdot \sigma_{ij} + \rho g_i = 0 \quad (6)$$

در این رابطه  $\sigma_{ij}$  تانسور تنش کل،  $\rho$  چگالی حجمی و  $g_i$  بردار

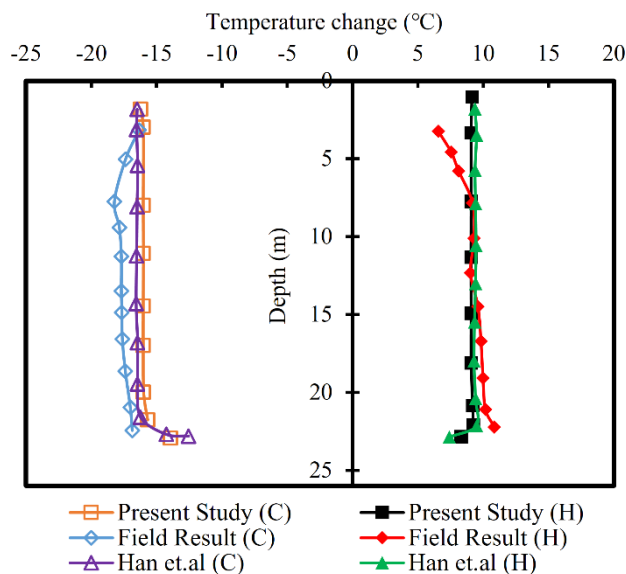
1 vector differential operator

2 Isotropic  
3 Drucker - Prager  
4 Mohr - Coulomb

جدول ۱. مشخصات هندسی، حرارتی و مکانیکی استفاده شده در مدل عددی برای صحت‌سنجی

Table 1. Geometric, thermal and mechanical characteristics of the present numerical model

مقدار	مشخصات
۰/۵۵	قطر شمع انرژی (m)
۲۳	طول شمع انرژی (m)
۱۲	عرض مرزهای مدل (m)
۴۰	عمق مدل (m)
۰/۱۲	فاصله محل‌های اعمال بارگذاری حرارتی از مرکز شمع (m)
۲/۳	ضریب رسانایی حرارتی موثر خاک رس ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
۱/۵	ضریب رسانایی حرارتی موثر شمع ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
۱	ضریب انبساط حرارتی خاک رس ( $\mu K^{-1}$ )
۸/۵	ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی ( $\mu K^{-1}$ )
۱۳۸۰	ظرفیت گرمایی ویژه خاک رس ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
۸۸۰	ظرفیت گرمایی ویژه شمع انرژی ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
۲۰۰۰	چگالی خاک رس ( $kg \cdot m^{-3}$ )
۲۵۰۰	چگالی شمع انرژی ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$65, Z < 4 m$ $65+8/2Z, Z \geq 4 m$	چسبندگی خاک رس (kPa)
۰	زاویه اصطکاک داخلی خاک رس ( $^{\circ}$ )
۰/۶۷ $C_u$	چسبندگی المان حد فاصل
۰	زاویه اصطکاک داخلی المان حد فاصل ( $^{\circ}$ )
۰/۴	ضریب پواسون خاک رس
۰/۱۳	ضریب پواسون شمع انرژی
۱۰۰۰ $C_u$	مدول الاستیسیته خاک رسی
۴۰	مدول الاستیسیته شمع انرژی (GPa)
۲۰	دمای اولیه ( $^{\circ}C$ )
۰	فاصله تراز آب زیرزمینی از سطح زمین (m)



شکل ۲. تغییرات دما در سطح مشترک شمع و خاک در انتهای دوره‌های گرمایش و سرمایش

Fig. 2. Temperature change at the soil-pile interface at the end of heating and cooling periods

مناسبی دارد. بر اساس این شکل حداکثر مقدار اختلاف نتایج مدل حاضر با مدل صحرایی در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب ۲۶٪ و ۱۲٪ و مقدار اختلاف نتایج مدل حاضر با نتایج مدل هان در زمان گرمایش و سرمایش، حداکثر ۳٪ است.

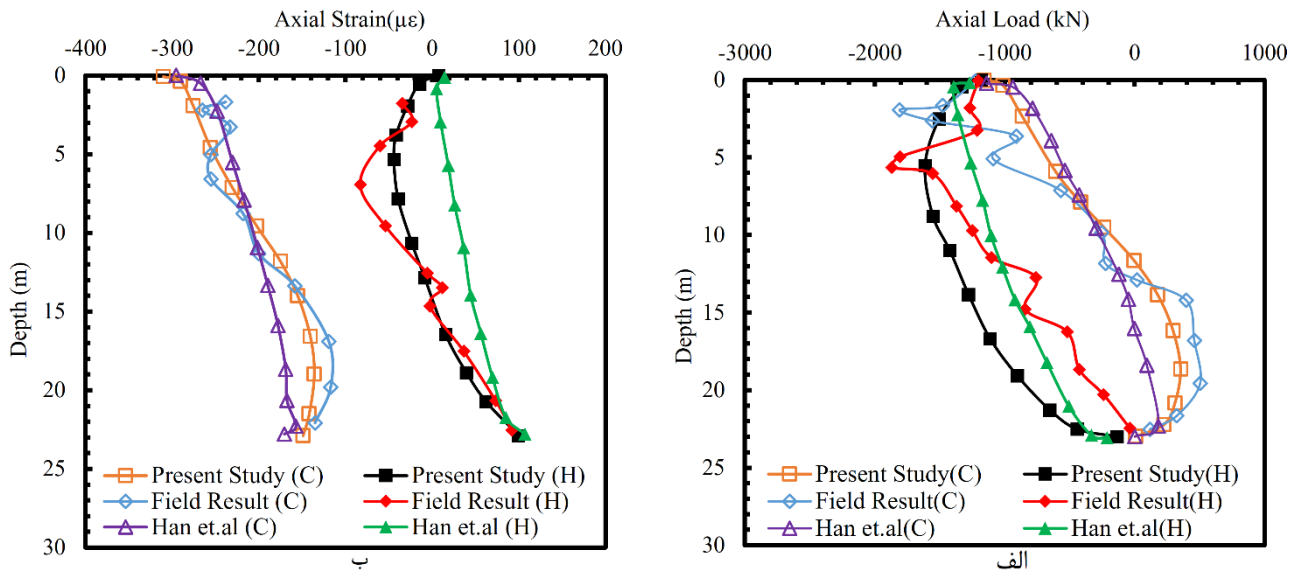
شکل ۳ نیرو و کرنش محوری ایجاد شده در طول شمع انرژی تحت بارگذاری همبسته‌ی حرارتی - مکانیکی را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب در دوره‌های سرمایش و گرمایش، روند تغییرات نتایج به دست آمده از مدل حاضر، کاملاً مطابق روند تغییرات نتایج مدل صحرایی و مدل عددی هان است. همچنین مقدار کرنش محوری به دست آمده از مدل حاضر (شکل ۳-ب) در دوره‌های گرمایش و سرمایش، تطابق بسیار بهتری با کرنش محوری به دست آمده از مدل صحرایی نسبت به مدل عددی هان دارد. لازم به ذکر است که حداکثر مقدار اختلاف کرنش محوری به دست آمده از مدل حاضر با مدل صحرایی در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب ۳۵٪ و ۱۵٪ است.

در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود که نیروی محوری به دست آمده از مدل صحرایی در حدود ۴ متر فوقانی دارای نوسانات زیادی است؛ علت این موضوع می‌تواند تغییرات قطر شمع در قسمت‌های فوقانی

با نتایج گزارش شده از آزمون صحرایی دانشگاه لمبث و مطالعه‌ی عددی المان محدود هان و همکاران در نرم‌افزار COMSOL که بر مبنای آزمون صحرایی دانشگاه لمبث می‌باشد، پرداخته شده است. لازم به ذکر است که در مدل صحرایی دانشگاه لمبث در ۴ متر اولیه، خاک دستی وجود دارد که اطلاعات کافی از مشخصات این خاک دستی موجود نیست؛ بنابراین، در مدل حاضر و مدل عددی هان از نظر گرفتن آن صرف نظر شده و خاک تماماً به صورت رس مدل‌سازی شده است. در نتایج و شکل‌های ارائه شده، علامت مثبت نشان دهنده‌ی کرنش انبساطی، نیرو و تنش کششی، تنش اصطکاکی رو به بالا در جداره‌ی شمع و جابه‌جایی شمع انرژی رو به بالا است. همچنین حروف H، C و R استفاده شده در شکل‌ها به ترتیب بیانگر گرمایش، سرمایش و بازگشت شمع انرژی به دمای اولیه (بازبایی حرارتی) هستند.

برای بررسی صحت پاسخ‌های حرارتی مدل حاضر، از مقایسه‌ی تغییرات دما در جداره‌ی شمع انرژی (سطح مشترک شمع و خاک) تحت بارگذاری حرارتی در این مدل با نتایج صحرایی و مدل عددی هان و همکاران استفاده شده است. شکل ۲ نشان می‌دهد که تغییرات دما در این مدل در جداره‌ی شمع با نتایج دیگر محققین مطابقت





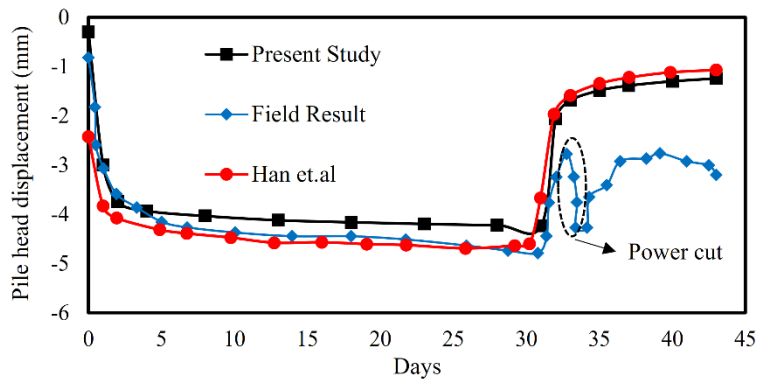
شکل ۳. پروفیل نیرو و کرنش محوری ایجاد شده در شمع انرژی تحت بارگذاری همبسته‌ی حرارتی- مکانیکی در انتهای دوره‌های گرمایش و سرمایش: الف) نیروی محوری؛ ب) کرنش محوری

Fig. 3. Axial load and strain profiles along the energy pile under coupled thermo-mechanical loading at the end of heating and cooling periods: A) Axial load, B) Axial strain

نیروی محوری به دست آمده از مدل حاضر، نزدیک به مقادیر نیروی محوری گزارش شده از مدل صحرایی باشد. همچنین در شکل ۳-الف می‌توان مشاهده کرد که در زمان گرمایش، مقدار نیروی محوری به دست آمده از مدل صحرایی دارای نوسانات زیادی در طول شمع انرژی است؛ علت این امر می‌تواند شرایط پیچیده شمع و خاک، خطا در اندازه‌گیری‌ها یا ثابت نبودن مقدار مدول یانگ شمع بر خلاف آن چه که از مدل صحرایی گزارش شده، باشد؛ همین امر باعث افزایش اختلاف نتایج مدل صحرایی و مدل عددی حاضر در برخی از اعماق شمع انرژی شده است.

در شکل ۴ مقدار جابه‌جایی در بالای شمع انرژی تحت بارگذاری همبسته‌ی حرارتی - مکانیکی نشان داده شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که منحنی‌های شکل ۴، جابه‌جایی‌های ایجاد شده در بالای شمع پس از رسیدن شمع به تعادل استاتیکی تحت بارگذاری مکانیکی در طول دوره‌ی بارگذاری حرارتی را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که در شکل ۴ علت افزایش اختلاف نتایج مدل حاضر با آزمون صحرایی در دوره‌ی گرمایش، رخداد قطع برق در زمان انجام آزمون صحرایی است که اندازه‌گیری‌های صحرایی پس از قطع برق را بی اعتبار می‌کند. اما ذکر این نکته حائز اهمیت است که مدل حاضر

آن در مدل صحرایی باشد (بر اساس گزارشات انجام شده از مدل صحرایی، قطر شمع انرژی در ۴ متر اولیه ثابت نیست اما در مدل حاضر و مدل عددی هان، قطر شمع انرژی در تمام طول آن ثابت فرض شده است). همچنین در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود که در دوره‌ی سرمایش (C) به جز ۴ متر اولیه (که از خاک دستی و شمع با قطر متغیر در مدل صحرایی استفاده شده)، نتایج به دست آمده از مدل حاضر تطابق بهتری با نتایج مدل صحرایی نسبت به مدل عددی هان دارد. لازم به ذکر است که حداکثر مقدار اختلاف نیروی محوری به دست آمده از مدل حاضر با مدل صحرایی در زمان سرمایش، ۵۵٪ است که مربوط به اعماق اولیه می‌شود و در سایر اعماق اختلاف نتایج کاهش می‌یابد. در شکل ۳-الف در زمان گرمایش همانطور که مشخص است، اختلاف میان نتایج به دست آمده از مدل حاضر و مدل صحرایی، افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در زمان گرمایش حداکثر مقدار اختلاف نیروی محوری به دست آمده از مدل حاضر با مدل صحرایی، ۵۲٪ است. با توجه به اینکه در شکل ۲ و شکل ۳-ب نشان داده شد که به ترتیب تغییرات دمای شمع و تغییرات کرنش محوری ایجاد شده در مدل صحرایی و مدل حاضر در زمان گرمایش (H) تطابق خوبی با یکدیگر دارند، بنابراین انتظار می‌رود که مقادیر



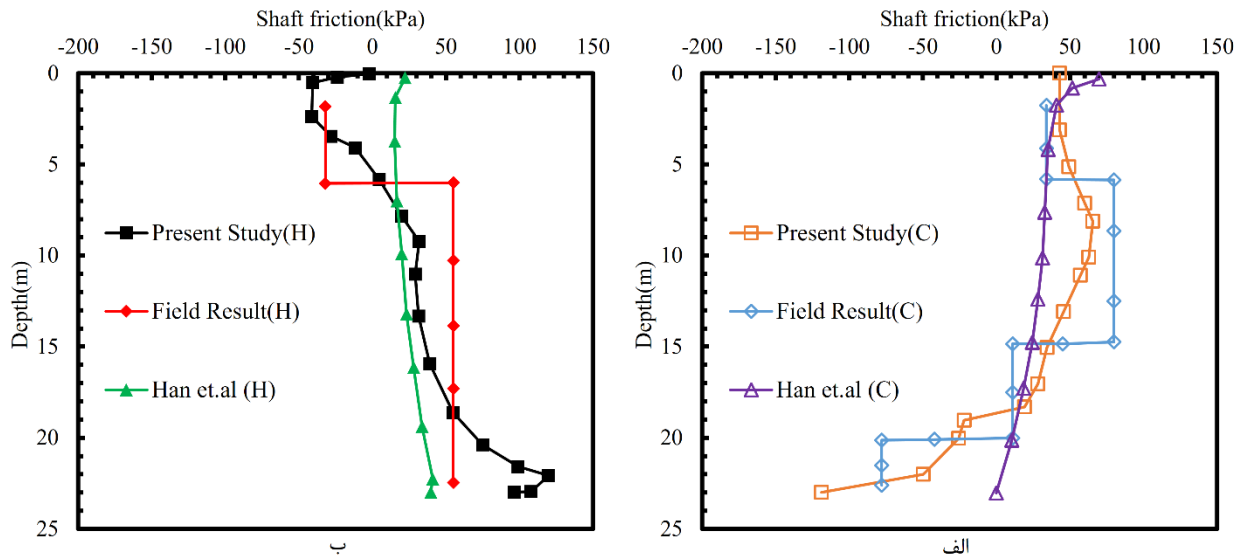
شکل ۴. منحنی جابه‌جایی ایجاد شده در بالای شمع انرژی تحت بارگذاری همبسته حرارتی - مکانیکی

Fig. 4. Energy pile head displacement under coupled thermo-mechanical loading

بیان نشده است. با توجه به توضیحات داده شده در خصوص اختلاف زیاد نتایج مدل حاضر و مدل صحرایی با مدل هان در  $day = 0$ ، با صرف نظر از روز نخست، حداکثر مقدار اختلاف نتایج به دست آمده از مدل حاضر با نتایج مدل صحرایی و مدل هان، به ترتیب ۱۰٪ و ۱۲٪ است.

شکل ۵ تنش اصطکاکی ایجاد شده در جداری شمع انرژی تحت بارگذاری همبسته حرارتی - مکانیکی در انتهای دوره‌های سرمایه‌گذاری و گرمایش را نشان می‌دهد. در این پژوهش مقدار تنش برشی ایجاد شده در المان‌های حد فاصل در سطح مشترک شمع و خاک به عنوان تنش اصطکاکی در نظر گرفته شده است. در مدل حاضر مقدار اصطکاک در جداری شمع به صورت پیوسته در همه‌ی اعماق توسط نرم‌افزار محاسبه شده است اما در مدل صحرایی به دلیل محدودیت ابزارگذاری، اصطکاک تنها در چند نقطه از جداری شمع اندازه‌گیری شده است؛ به همین دلیل در نتایج به دست آمده از مدل صحرایی در شکل ۵، تغییرات ناگهانی و زیاد در مقدار اصطکاک در برخی از اعماق در جداری شمع مشاهده می‌شود. همچنین در نتایج به دست آمده از مدل صحرایی مشاهده می‌شود که در برخی از اعماق در جداری شمع مقدار تنش اصطکاکی با تغییر عمق، عوض نمی‌شود در حالی که در نتایج به دست آمده از مدل حاضر و مدل هان، تغییرات پیوسته‌ای در مقدار اصطکاک در جداری شمع با پیشروی در عمق مشاهده می‌گردد. با توجه به این که مقدار کرنش‌های محوری ایجاد شده و در نتیجه جابه‌جایی نسبی شمع و خاک در

مطابقت خوبی با مدل هان دارد. همچنین لازم به ذکر است که در مدل صحرایی پیش از اعمال بارگذاری حرارتی، شمع انرژی تحت بارگذاری و سپس باربرداری برابر با  $1800 \text{ kN}$  قرار داده شده است و سپس در  $day = 0$  بار مکانیکی  $1200 \text{ kN}$  و بارگذاری حرارتی به صورت همزمان به شمع انرژی اعمال شده است. مقدار نشست حدود  $0.7$  میلی‌متر که در  $day = 0$  در نتایج مدل صحرایی مشاهده می‌شود، حاصل از بارگذاری و باربرداری نیروی  $1800 \text{ kN}$  است که پیش از این به شمع انرژی اعمال شده است. در مدل حاضر نیز روند بارگذاری‌های مکانیکی و حرارتی کاملاً مشابه مدل صحرایی است؛ به همین دلیل در نتایج به دست آمده از مدل حاضر نیز مشاهده می‌شود که در  $day = 0$  نشست معادل  $0.35$  میلی‌متر در سر شمع وجود دارد و سپس مشابه با مدل صحرایی و تحت اثر اعمال همزمان بار مکانیکی  $1200 \text{ kN}$  و بارگذاری حرارتی سرمایه‌گذاری، مقدار نشست در سر شمع افزایش می‌یابد. اما در نتایج به دست آمده از مدل هان همانطور که مشاهده می‌شود در  $day = 0$  مقدار نشست در سر شمع برابر با  $2/4$  میلی‌متر است که اختلاف زیادی با نتایج حاصل از مدل حاضر و مدل صحرایی دارد. این اختلاف احتمالاً به این دلیل ایجاد شده که در مدل هان بارگذاری حرارتی سرمایه‌گذاری و مکانیکی  $1200$  به صورت همزمان به شمع اعمال نشده است و احتمالاً ابتدا بار مکانیکی  $1200 \text{ kN}$  به سر شمع اعمال شده و پس از آن به تعادل رسیدن شمع تحت بار مکانیکی، بارگذاری حرارتی به آن اعمال شده است. لازم به ذکر است که در مقاله‌ی هان علت این اختلاف در نتایج



شکل ۵. تنش اصطکاکی در جداره شمع انرژی تحت بارگذاری همبسته حرارتی- مکانیکی: الف) انتهای دوره سرمایش؛ ب) انتهای دوره گرمایش

**Fig. 5. Energy pile shaft friction under coupled thermo-mechanical loading: A) At the end of cooling period, B) At the end of heating period**

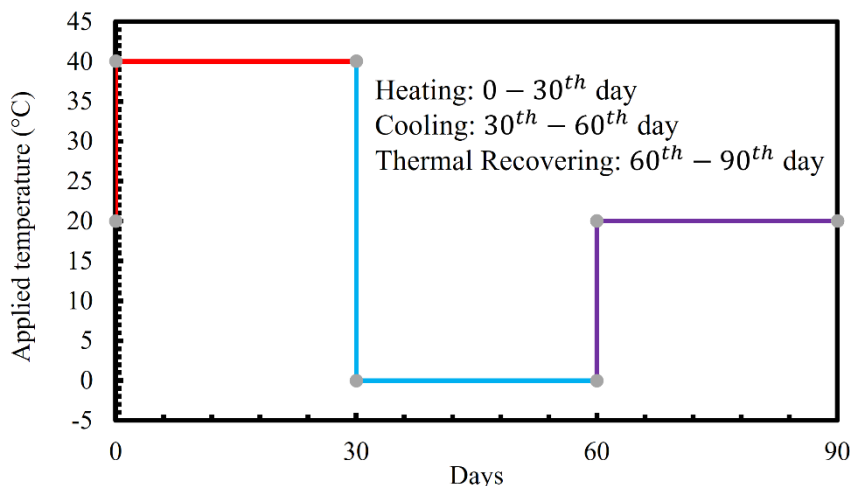
اختلاف‌هایی بین نتایج به دست آمده از این پژوهش با اندازه‌گیری‌های صحرائی به ویژه در ۴ متر اولیه شده است؛ اما در مجموع، مقایسه‌های انجام شده از پاسخ‌های حرارتی و مکانیکی شمع انرژی در شکل ۲ تا شکل ۵ نشان می‌دهند که مدل حاضر از دقت قابل‌قبولی در بررسی رفتار شمع انرژی تحت شرایط مشخص شده برخوردار است. بنابراین در ادامه‌ی این پژوهش از مدل عددی ایجاد شده برای مطالعات مدنظر استفاده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش با استفاده از مدل عددی سه بعدی صحت‌سنجی شده، اثر تغییرات ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی و خاک بر تنش محوری، اصطکاک در جداره و جابه‌جایی در طول شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی متناوب مورد بررسی قرار گرفته است. به غیر از حذف بار مکانیکی در سر شمع و تغییر نوع بارگذاری حرارتی، سایر شرایط مدل و مشخصات مصالح کاملاً مطابق مدل صحت‌سنجی شده است. مدت و مقدار بارگذاری حرارتی در شکل ۶ و مقادیر مختلف ضرایب انبساط حرارتی شمع انرژی و خاک در جدول ۲ نشان داده شده است.

اعماق مختلف تحت بارگذاری همبسته‌ی حرارتی - مکانیکی یکسان نیست، بنابراین روند تغییر پیوسته‌ی مقدار اصطکاک در جداره‌ی شمع که در نتایج مدل حاضر و مدل هان مشاهده می‌شود، منطقی به نظر می‌رسد و علت ثابت بودن مقدار تنش اصطکاکی گزارش شده در برخی اعماق شمع و سپس تغییرات ناگهانی در آن که در نتایج مدل صحرائی مشاهده می‌شود، می‌تواند به دلیل محدودیت در ابزارگذاری و یا خطا در اندازه‌گیری‌ها باشد. همچنین لازم به ذکر است که در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب حداکثر مقدار اختلاف اصطکاک به دست آمده از مدل حاضر با مدل صحرائی، به ترتیب ۴۰٪ و ۴۵٪ است. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار اصطکاک به دست آمده از نتایج مدل حاضر تطابق بهتری با نتایج حاصل از آزمون صحرائی نسبت به مدل هان دارد.

لازم به ذکر است که در واقعیت خاک شرایط پیچیده‌تری نسبت به مدل عددی این مقاله دارد. علاوه بر این، همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در واقعیت در ۴ متر اولیه از پروفیل خاک صحرائی، خاک دستی گزارش شده که به دلیل عدم وجود مشخصات خاک دستی، از مدل‌سازی آن صرف نظر شده است. موارد بیان شده باعث ایجاد



شکل ۶. بارگذاری حرارتی متناوب اعمال شده به شمع انرژی

Fig. 6. Cyclic thermal loading applied to the energy pile

جدول ۲. ضرایب انبساط حرارتی مورد مطالعه شمع انرژی و خاک

Table 2. Thermal expansion coefficients used in the present study

ضرایب انبساط حرارتی خاک ( $\mu\text{K}^{-1}$ )	ضرایب انبساط حرارتی مصالح شمع انرژی ( $\mu\text{K}^{-1}$ )
۱، ۵، ۱۰	۸/۵، ۱۲، ۱۶

به وجود آمده در آن برابر با  $(\alpha_p \Delta T)$  خواهد بود که به آن کرنش حرارتی آزاد  $(\varepsilon_{T-free})$  می‌گویند. در این حالت هیچ تنش حاصل از بارگذاری حرارتی در شمع به وجود نمی‌آید. اما زمانی که شمع انرژی درون خاک قرار دارد، به دلیل اندرکنش بین شمع و خاک و اصطکاک ایجاد شده در جداره‌ی شمع، مقدار کرنش حرارتی به وجود آمده در شمع، کم‌تر از کرنش حرارتی آزاد است. در این حالت، کرنش حرارتی ایجاد شده در شمع را با  $(\varepsilon_T)$  نشان می‌دهند. در این شرایط، مقدار کرنشی که باعث ایجاد تنش در شمع می‌شود، برابر اختلاف کرنش حرارتی آزاد با کرنش حرارتی ایجاد شده در شمع  $(\alpha_p \Delta T - \varepsilon_T)$  است که به آن کرنش حرارتی محدود شده  $(\varepsilon_{T-Rstr})$  می‌گویند.

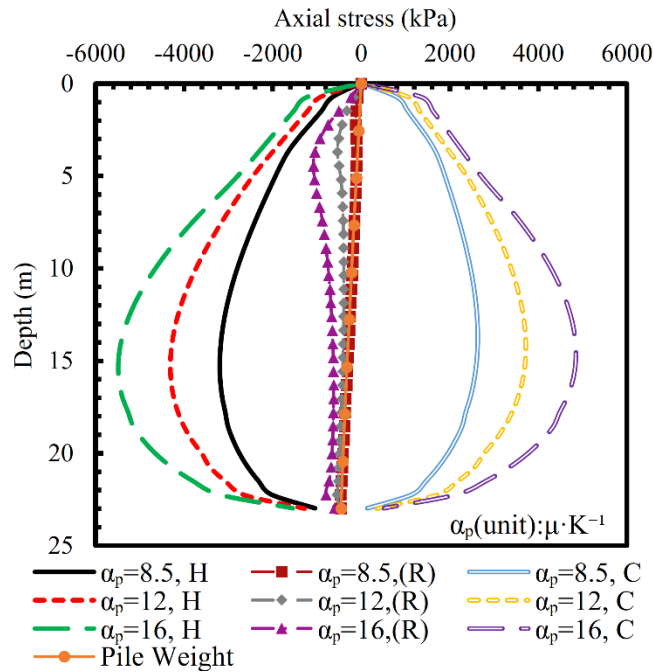
### ۳-۱- اثر تغییر ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی

شکل ۷ تنش محوری در طول شمع‌های انرژی با ضرایب انبساط حرارتی مختلف تحت بارگذاری حرارتی و همچنین در زمان بازگشت

در ادامه‌ی این بخش به منظور تحلیل نتایج به دست آمده، از رابطه‌ی (۸) برای بحث در خصوص کرنش‌ها و تنش‌های محوری استفاده شده است. از رابطه‌ی (۸) برای محاسبه‌ی تنش محوری ایجاد شده در شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی تنها، با خصوصیات حرارتی و مکانیکی همسان و یکنواخت استفاده می‌شود [۱۸].

$$\sigma_T = -E_p (\alpha_p \Delta T - \varepsilon_T) \quad (8)$$

در این رابطه  $\sigma_T$  تنش حرارتی ایجاد شده،  $E_p$  مدول الاستیسیته‌ی شمع،  $\alpha_p$  ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی و  $\varepsilon_T$  کرنش حرارتی ایجاد شده در شمع انرژی است. چنانچه در اطراف، بالا و پایین شمع انرژی هیچ‌گونه قید و محدودیتی وجود نداشته باشد، زمانی که شمع انرژی، تنها تحت بارگذاری حرارتی یکنواخت  $\Delta T$  قرار بگیرد، کرنش

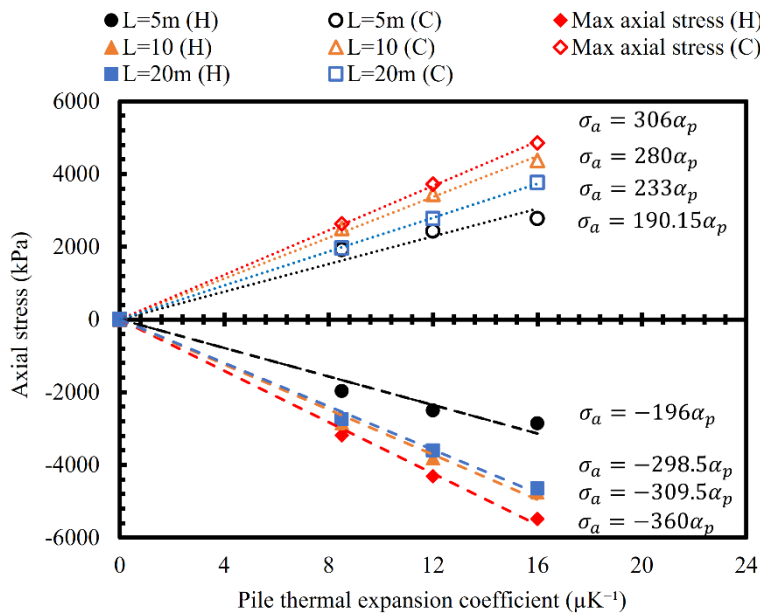


شکل ۷. اثر تغییر ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی بر تنش محوری در طول آن

Fig. 7. The effect of changing the thermal expansion coefficient of the energy pile on the axial stress

انرژی می‌شود. همچنین شکل ۷ نشان می‌دهد که با بازگشت شمع انرژی به دمای اولیه، در صورتی که ضریب انبساط حرارتی شمع کوچک باشد، تنش محوری در شمع نیز به حالت اولیه خود یعنی تنش فشاری برابر با وزن شمع، باز می‌گردد؛ اما با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع، تنش محوری در انتهای دوره بازیابی حرارتی دیگر به حالت اولیه خود باز نمی‌گردد و هر چه ضریب انبساط حرارتی شمع بیشتر باشد، اختلاف تنش محوری در انتهای دوره بازیابی حرارتی با حالت اولیه (تنش ناشی از وزن شمع) بیشتر می‌شود. از دیگر نکات حائز اهمیت در شکل ۷، عدم تقارن مقدار تنش‌های محوری فشاری و کششی ایجاد شده در طول شمع انرژی تحت اختلاف دمای یکسان در زمان گرمایش و سرمایش است. علت این موضوع می‌تواند تنش فشاری حاصل از وزن شمع انرژی باشد که باعث افزایش تنش فشاری در زمان گرمایش و کاهش تنش کششی در زمان سرمایش شمع انرژی می‌شود. شکل ۷ نشان می‌دهد که حداکثر مقدار تنش فشاری در زمان

به دمای اولیه را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع، مقدار تنش محوری فشاری و کششی ایجاد شده به ترتیب در دوره‌های گرمایش و سرمایش، در طول شمع نیز افزایش می‌یابد؛ به نحوی که با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع از  $8.5 \mu/K$  به  $12 \mu/K$ ، مقدار تنش محوری حداکثر در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب  $35\%$  و  $41\%$  و با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع از  $8.5 \mu/K$  به  $16 \mu/K$ ، مقدار تنش محوری حداکثر در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب  $72\%$  و  $85\%$  افزایش می‌یابد. در اثر افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع، انتظار می‌رود که تحت بارگذاری حرارتی یکسان، کرنش محوری ایجاد شده در آن افزایش یابد. با توجه به رابطه‌ی (۸)، افزایش تنش محوری نشان دهنده‌ی آن است که در اثر افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع، علاوه بر کرنش حرارتی ایجاد شده، کرنش حرارتی محدود شده ( $\epsilon_{T-Rst}$ ) نیز در طول شمع انرژی افزایش می‌یابد. افزایش کرنش حرارتی محدود شده به معنی افزایش اندرکنش بین شمع و خاک اطراف آن است که موجب جلوگیری از کرنش حرارتی آزادانه‌ی شمع



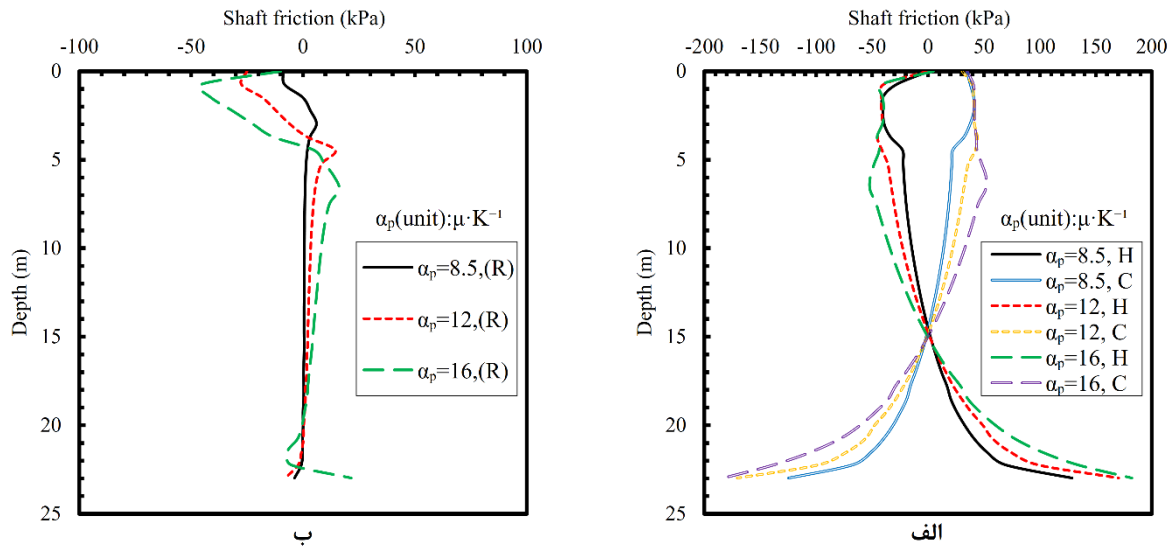
شکل ۸. رابطه‌ی تغییرات تنش محوری در شمع انرژی نسبت به ضریب انبساط حرارتی شمع

Fig. 8. The relationship between the axial stress and the thermal expansion coefficient of the energy pile

تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی و سرمایشی نشان می‌دهد. مقادیر تنش برای هر عمق مشخص از شمع‌های انرژی با ضرایب انبساط حرارتی مختلف در شکل ۸، در واقع از شکل ۷ به دست آمده است. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که بین تنش محوری ایجاد شده در اعماق مختلف از شمع انرژی و همچنین حداکثر مقدار تنش محوری با مقدار ضریب انبساط حرارتی شمع، رابطه‌ای تقریباً خطی وجود دارد. از این موضوع می‌توان برای تخمین اولیه حداکثر تنش محوری ایجاد شده تحت شرایط اولیه‌ی مشابه با این پژوهش جهت طراحی شمع‌های انرژی استفاده کرد. همچنین در شکل ۸ مشاهده می‌شود که مقدار تنش محوری در بعضی از اعماق شمع زمانی که مقدار ضریب انبساط حرارتی شمع کوچک است، با مقدار تنش محوری سایر اعماق تقریباً برابر است اما با افزایش مقدار ضریب انبساط حرارتی شمع، مقدار تنش محوری در آن اعماق دیگر با یکدیگر برابر نیستند؛ علت این موضوع همانطور که در شکل ۷ نیز مشخص است، تغییر شیب منحنی‌های مربوط به تنش محوری در نیمه‌ی فوقانی و تحتانی شمع‌های انرژی در اثر تغییر ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی است. در شکل ۹ به مقایسه‌ی تنش اصطکاکی ایجاد شده در جداره‌ی

بارگذاری حرارتی گرمایشی برای شمع‌هایی با ضرایب انبساط حرارتی  $۸/۵ \mu/K$ ،  $۱۲ \mu/K$  و  $۱۶ \mu/K$ ، به ترتیب برابر با  $-۳۱۹۰$ ،  $-۳۱۹۰$  و  $-۴۳۱۰$  کیلوپاسکال است. همچنین مشاهده می‌شود که حداکثر مقدار تنش کششی در زمان سرمایش برای شمع‌هایی با ضرایب انبساط حرارتی  $۸/۵ \mu/K$ ،  $۱۲ \mu/K$  و  $۱۶ \mu/K$ ، به ترتیب برابر با  $۲۶۲۰$ ،  $۳۷۱۰$  و  $۴۸۵۰$  کیلوپاسکال است. با توجه به این که مقاومت فشاری بتن شمع‌ها تحت هیچ شرایطی نباید کمتر از  $۲۵ \text{ Mpa}$  باشد [۲۷]، می‌توان نتیجه گرفت که تنش‌های فشاری ایجاد شده تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی تنها، نمی‌تواند باعث گسیختگی بتن گردد. همچنین با توجه به این که مقدار مقاومت کششی بتن معمولاً بین  $۸\%$  تا  $۱۲\%$  مقاومت فشاری آن است [۲۸]، در صورتی که ضریب انبساط حرارتی بتن و مقدار بارگذاری حرارتی سرمایشی زیاد باشد و بتن به خوبی توسط آرماتورهای فولادی مسلح نشده باشد، ممکن است تنش‌های کششی ایجاد شده در شمع تحت بارگذاری حرارتی سرمایشی تنها، باعث گسیختگی بتن شود.

شکل ۸ رابطه‌ی میان تغییرات تنش محوری در اعماق مختلف شمع انرژی را نسبت به مقادیر مختلف ضریب انبساط حرارتی شمع



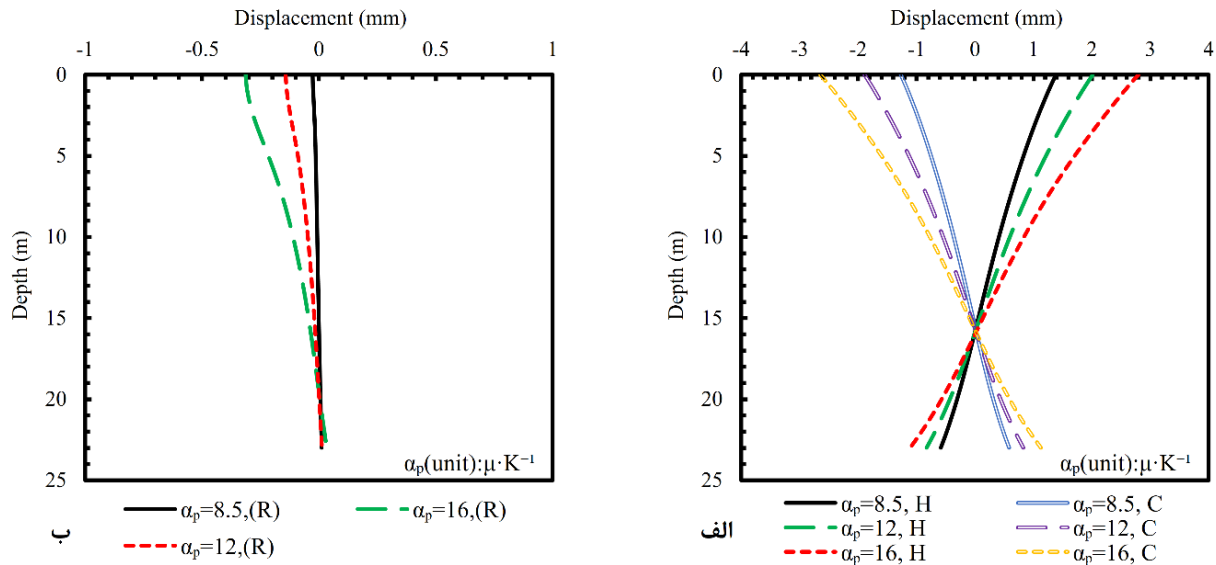
شکل ۹. اثر تغییر ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی بر تنش اصطکاکی در جداره‌ی آن: الف) تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی و سرمایشی؛ ب) در انتهای دوره بازیابی حرارتی

Fig. 9. The effect of changing the thermal expansion coefficient of the energy pile on the energy pile shaft friction: A) Under heating and cooling loading, B) At the end of thermal recovering

کرنش محوری محدود شده و تنش محوری در شمع انرژی به هنگام افزایش ضریب انبساط حرارتی، متأثر از افزایش اصطکاک در جداره‌ی شمع انرژی می‌باشد.

شکل ۹-ب نشان می‌دهد که با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی، مقدار تنش اصطکاکی در جداره‌ی شمع در انتهای دوره بازیابی حرارتی، افزایش می‌یابد. این موضوع نشان دهنده‌ی آن است که با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی، جابه‌جایی نسبی بین شمع و خاک پس از بازگشت شمع انرژی به دمای اولیه نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضریب انبساط حرارتی و در نتیجه کرنش محوری شمع، به دلیل اندرکرنش موجود میان شمع و خاک، جابه‌جایی‌های برگشت‌ناپذیر خاک نیز افزایش می‌یابد. همچنین در شکل ۹-ب مشاهده می‌شود که مقدار اصطکاک ایجاد شده در جداره‌ی شمع، دارای نوساناتی است. علت این موضوع می‌تواند نوسانات مربوط به جابه‌جایی‌های ایجاد شده در خاک اطراف شمع نسبت به حالت اولیه باشد. دلیل نوسانات خاک در زمان بازگشت شمع به دمای اولیه نیز می‌تواند مقدار کرنش‌های پلاستیک

شمع‌های انرژی با ضرایب انبساط حرارتی مختلف تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی و سرمایشی و در انتهای دوره بازیابی حرارتی پرداخته شده است. شکل ۹-الف نشان می‌دهد که افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع باعث افزایش مقدار تنش اصطکاکی ایجاد شده در دوره‌های حرارتی گرمایشی و سرمایشی می‌شود؛ به نحوی که با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع از  $8/5 \mu/K$  به  $12 \mu/K$ ، حداکثر مقدار تغییر اصطکاک در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب  $52\%$  و  $95\%$  و با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع از  $8/5 \mu/K$  به  $16 \mu/K$ ، حداکثر مقدار تغییر اصطکاک در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب  $142\%$  و  $168\%$  افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع افزایش کرنش محوری ایجاد شده در شمع انرژی می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، تحت بارگذاری حرارتی یکسان، افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع باعث افزایش کرنش محوری آن می‌شود و این موضوع باعث شده است تا تحت شرایط موجود، جابه‌جایی نسبی شمع و خاک افزایش یابد، در نتیجه تنش اصطکاکی در جداره‌ی شمع نیز افزایش می‌یابد. ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که دلیل افزایش



شکل ۱۰. اثر تغییر ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی بر جابه‌جایی محوری در طول آن: الف) تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی و سرمایشی؛ ب) در انتهای دوره بازیابی حرارتی

Fig. 10. The effect of changing the thermal expansion coefficient of the energy pile on the displacement along the energy pile: A) Under heating and cooling loading, B) At the end of thermal recovering

جابه‌جایی‌های بزرگ در سر شمع می‌تواند باعث ایجاد اثرات مخربی بر فونداسیون و سازه‌ی فوقانی گردد و قابلیت بهره‌برداری سازه‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. لازم به ذکر است که به منظور بررسی دقیق‌تر این موضوع، بهتر است از بارگذاری همبسته‌ی حرارتی - مکانیکی استفاده شود تا به شرایط واقعی نزدیک‌تر باشد.

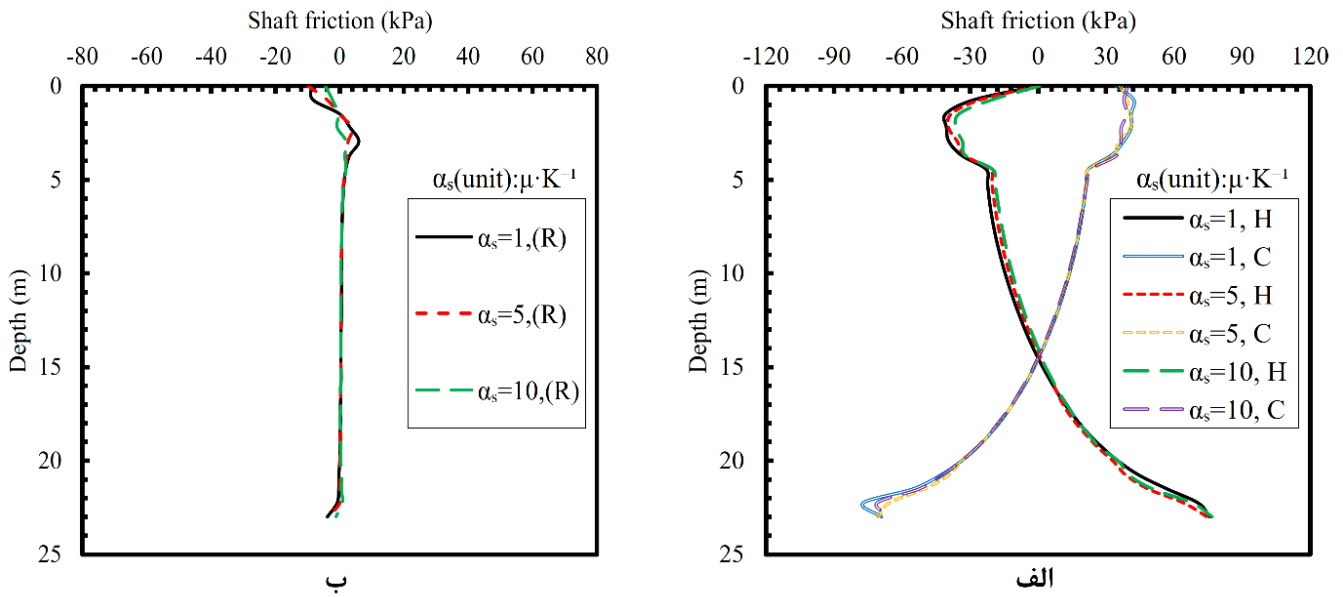
در شکل ۱۰-ب مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع، مقدار جابه‌جایی محوری در انتهای دوره بازیابی حرارتی نیز در شمع افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی، جابه‌جایی‌های برگشت‌ناپذیر شمع نیز افزایش می‌یابد.

### ۳-۲- اثر تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک

شکل ۱۱ تنش اصطکاکی ایجاد شده در جداری شمع انرژی قرار گرفته در خاک با ضرایب انبساط حرارتی مختلف را تحت بارگذاری حرارتی و در انتهای دوره بازیابی حرارتی، نشان می‌دهد. در شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک،

مختلفی باشد که در زمان بارگذاری حرارتی در آن ایجاد شده است. شکل ۱۰ تفاوت میان مقدار جابه‌جایی محوری ایجاد شده در طول شمع‌هایی با ضرایب انبساط حرارتی مختلف را در زمان بارگذاری حرارتی و در انتهای دوره بازیابی حرارتی نشان می‌دهد. در شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود که افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع باعث افزایش بالا آمدگی سر شمع در زمان بارگذاری حرارتی گرمایشی و افزایش نشست سر شمع در زمان بارگذاری سرمایشی می‌شود؛ به نحوی که با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع از  $8.5 \mu/K$  به  $16 \mu/K$ ، مقدار جابه‌جایی در سر شمع در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب  $45\%$  و  $49\%$  و با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع از  $8.5 \mu/K$  به  $16 \mu/K$ ، مقدار جابه‌جایی در سر شمع در زمان گرمایش و سرمایش نزدیک به  $100\%$  افزایش می‌یابد. علت این موضوع افزایش کرنش محوری در طول شمع در اثر افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صورتی که مقدار ضریب انبساط حرارتی شمع زیاد باشد، نشست و بالا آمدگی بزرگی به ترتیب در زمان سرمایش و گرمایش در سر شمع ایجاد می‌شود. این



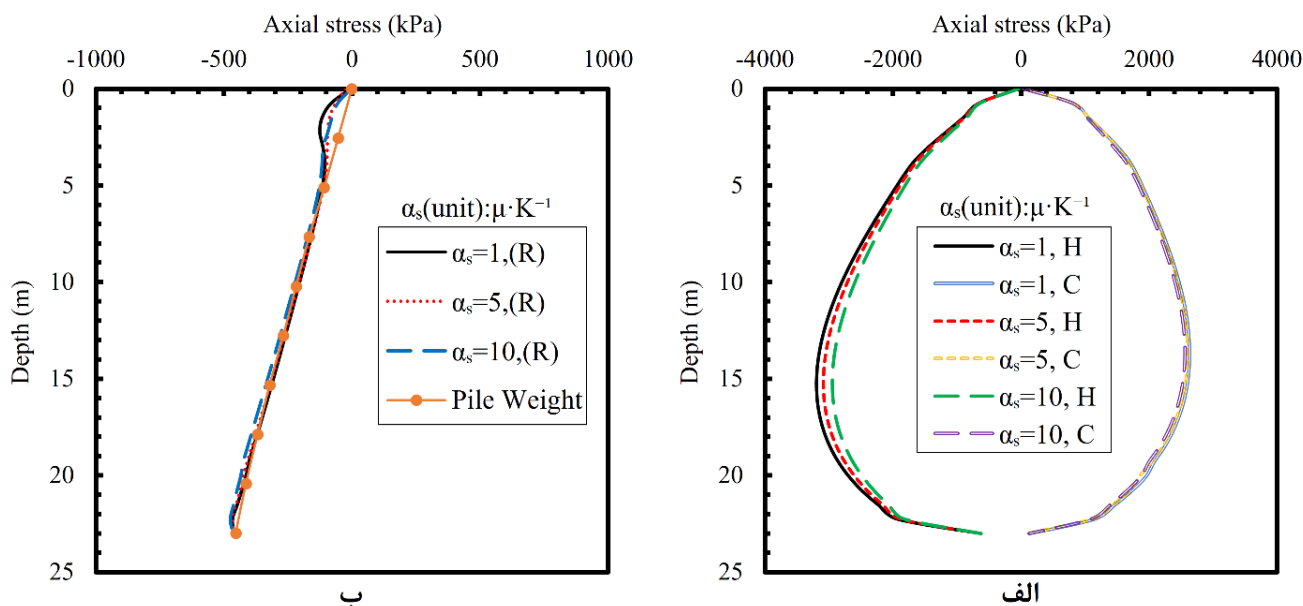


شکل ۱۱. اثر تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک بر اصطکاک در جداره‌ی شمع انرژی: الف) تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی و سرمایشی؛ ب) در انتهای دوره بازیابی حرارتی

Fig. 11. The effect of changing the thermal expansion coefficient of the soil on the energy pile shaft friction: A) Under heating and cooling loading, B) At the end of thermal recovering

شکل ۱۲ تنش محوری در طول شمع انرژی قرار گرفته در خاک‌هایی با ضرایب انبساط حرارتی مختلف را تحت بارگذاری حرارتی و همچنین در انتهای دوره بازیابی حرارتی نشان می‌دهد. در شکل ۱۲-الف می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک، تنش محوری ایجاد شده در طول شمع انرژی در زمان بارگذاری حرارتی گرمایشی کمی کاهش می‌یابد؛ به نحوی که با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک از  $1 \mu/K$  به  $5 \mu/K$  و از  $1 \mu/K$  به  $10 \mu/K$ ، مقدار تنش محوری حداکثر در زمان گرمایش به ترتیب  $4\%$  و  $8\%$  کاهش می‌یابد. علت این موضوع، کاهش تنش اصطکاکی در جداره‌ی شمع انرژی است که در شکل ۱۱-الف نشان داده شد. کاهش اصطکاک در جداره‌ی شمع، باعث افزایش کرنش حرارتی ایجاد شده تحت بارگذاری حرارتی یکسان می‌شود به عبارتی دیگر، مقدار کرنش محوری محدود شده در شمع کاهش می‌یابد و همان‌طور که در رابطه‌ی (۸) نشان داده شد، کاهش کرنش محوری محدود شده به معنای کاهش تنش محوری در طول شمع انرژی است. همچنین مشاهده می‌شود که با تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک، تنش

در زمان بارگذاری حرارتی گرمایشی، تنش اصطکاکی در جداره‌ی شمع انرژی کمی کاهش می‌یابد؛ به نحوی که با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک از  $1 \mu/K$  به  $5 \mu/K$  و از  $1 \mu/K$  به  $10 \mu/K$ ، حداکثر مقدار تغییر اصطکاک در زمان گرمایش به ترتیب برابر با  $2\%$  و  $9\%$  می‌باشد. در زمان بارگذاری حرارتی سرمایشی تقریباً هیچ تغییری در مقدار اصطکاک در جداره‌ی شمع ایجاد نمی‌شود. علت کاهش اندک اصطکاک در زمان بارگذاری گرمایشی، می‌تواند کاهش جابه‌جایی شمع و خاک نسبت به یکدیگر باشد. همچنین در شکل ۱۱-ب می‌توان مشاهده کرد که تغییر در ضریب انبساط حرارتی خاک، تغییری در مقدار اصطکاک در جداره‌ی شمع در انتهای دوره بازیابی حرارتی ایجاد نمی‌کند. علاوه بر این، شکل ۱۱-ب نشان می‌دهد که به جز چند متر ابتدایی که مقدار اصطکاک دارای نوسانات بسیار کمی است، در سایر نقاط شمع، مقدار اصطکاک تقریباً برابر با صفر است. این موضوع نشان دهنده‌ی آن است که خاک و شمع انرژی رفتاری نزدیک به حالت الاستیک دارند و تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک تاثیری بر این موضوع ندارد.



شکل ۱۲. اثر تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک بر تنش محوری در طول شمع انرژی (الف) تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی و سرمایشی؛ (ب) در انتهای دوره بازیابی حرارتی

Fig. 12. The effect of changing the thermal expansion coefficient of the soil on the axial stress along the energy pile: A) Under heating and cooling loading, B) At the end of thermal recovering

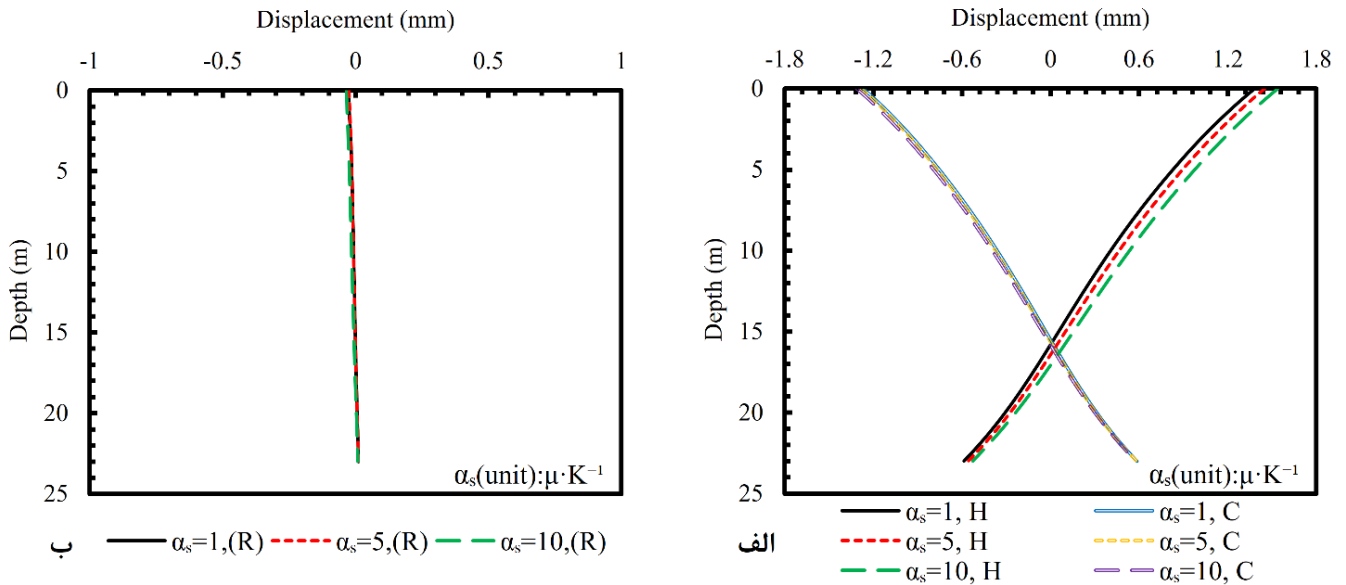
بالای نقطه‌ی خنثی<sup>۱</sup> (نقطه‌ای که مقدار جابه‌جایی در آن صفر است) افزایش و مقدار جابه‌جایی نقاط قرار گرفته در زیر نقطه‌ی خنثی، کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک از  $1 \mu/K$  به  $5 \mu/K$  و از  $1 \mu/K$  به  $10 \mu/K$ ، مقدار بالا آمدگی سر شمع در زمان گرمایش به ترتیب ۵٪ و ۱۱٪ افزایش می‌یابد. نکته مهم دیگر در این شکل، نزدیک‌تر شدن نقطه‌ی خنثی به انتهای شمع انرژی در اثر افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک تحت بارگذاری گرمایشی است.

در شکل ۱۳-ب نیز مشاهده می‌شود که با بازگشت شمع انرژی به دمای اولیه، جابه‌جایی در طول شمع نیز تقریباً صفر می‌شود و شمع به حالت اولیه‌ی خود باز می‌گردد و تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک تاثیری بر این موضوع ندارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک اثری بر برگشت‌پذیری رفتار شمع انرژی ندارد.

محوری در زمان بارگذاری حرارتی سرمایشی تغییری نمی‌کند. دلیل این موضوع نیز تغییر نکردن اصطکاک در جداره‌ی شمع انرژی است. شکل ۱۲-ب نشان می‌دهد که تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک تاثیری بر مقدار تنش محوری در طول شمع انرژی در انتهای دوره بازیابی حرارتی ندارد و شمع به حالت اولیه‌ی خود بازگشته و مقدار کرنش محوری محدود شده در آن تقریباً صفر می‌شود؛ در نتیجه تنها تنش محوری حاصل از وزن شمع باقی می‌ماند.

شکل ۱۳ جابه‌جایی محوری در طول شمع انرژی قرار گرفته در خاک‌هایی با ضرایب انبساط حرارتی مختلف را تحت بارگذاری حرارتی و همچنین در انتهای دوره بازیابی حرارتی نشان می‌دهد. در شکل ۱۳-الف مشاهده می‌شود که تحت بارگذاری حرارتی سرمایشی، تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک اثری بر میزان جابه‌جایی نقاط مختلف شمع انرژی ندارد؛ در حالی که تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی، با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک، مقدار جابه‌جایی نقاط واقع در

1 null point



شکل ۱۳. اثر تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک بر میزان جابه‌جایی محوری در طول شمع انرژی: الف) تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی و سرمایشی؛ ب) در انتهای دوره بازیابی حرارتی

Fig. 13. The effect of changing the thermal expansion coefficient of the soil on the displacement along the energy pile: A) Under heating and cooling loading, B) At the end of thermal recovering

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثرات تغییر ضریب انبساط حرارتی مصالح شمع انرژی و خاک رس اشباع بر پاسخ مکانیکی تک شمع انرژی اعم از تنش محوری، جابه‌جایی محوری و اصطکاک در جداره‌ی شمع تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی و سرمایشی متناوب با استفاده از مدل سه بعدی حرارتی - مکانیکی تفاضل محدود، مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه، بخشی از مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش بیان شده است:

۱- افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی باعث می‌شود علاوه بر کرنش محوری ایجاد شده، کرنش محوری محدود شده نیز در طول شمع افزایش یابد؛ در نتیجه تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی و سرمایشی به ترتیب تنش محوری فشاری و کششی نیز در طول شمع انرژی افزایش می‌یابند؛ به نحوی که با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع از  $8/5 \mu\text{K}$  به  $12 \mu\text{K}$  مقدار تنش محوری حداکثر در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب  $52\%$  و  $95\%$  و با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع از  $8/5 \mu\text{K}$  به  $16 \mu\text{K}$  حداکثر مقدار تغییر اصطکاک در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب  $142\%$  و  $168\%$  افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع می‌تواند افزایش جابه‌جایی شمع و خاک نسبت به یکدیگر در اثر افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی باشد.

۴- افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی باعث تشدید

حرارتی شمع از  $8/5 \mu\text{K}$  به  $16 \mu\text{K}$  مقدار تنش محوری حداکثر در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب  $72\%$  و  $85\%$  افزایش می‌یابد.

۲- مقدار تنش محوری ایجاد شده در هر عمقی از شمع انرژی تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی و سرمایشی با مقدار ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی رابطه‌ای خطی دارد.

۳- افزایش ضریب انبساط حرارتی مصالح شمع انرژی باعث افزایش اصطکاک بین شمع و خاک در زمان بارگذاری حرارتی می‌شود؛ به نحوی که با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع از  $8/5 \mu\text{K}$  به  $12 \mu\text{K}$  حداکثر مقدار تغییر اصطکاک در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب  $52\%$  و  $95\%$  و با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع از  $8/5 \mu\text{K}$  به  $16 \mu\text{K}$  حداکثر مقدار تغییر اصطکاک در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب  $142\%$  و  $168\%$  افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع می‌تواند افزایش جابه‌جایی شمع و خاک نسبت به یکدیگر در اثر افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی باشد.

۴- افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی باعث تشدید

نزدیک‌تر می‌گردد؛ در حالی که تحت بارگذاری حرارتی سرمایشی، تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک اثری بر مقدار جابه‌جایی و محل تشکیل نقطه‌ی خنثی در طول شمع انرژی ندارد.

۹- تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک اثری بر رفتار برگشت‌پذیر شمع انرژی و خاک تحت بارگذاری حرارتی تنها، ندارد و با بازگشت به دمای اولیه، شمع انرژی و خاک نیز تقریباً به حالت اولیه‌ی خود باز می‌گردند.

## ۵- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

C	بارگذاری حرارتی سرمایشی
$C_{eff}$	ظرفیت گرمایی ویژه، $J/kg \cdot K$
$C_{p,f}$	ظرفیت گرمایی ویژه سیال منفذی در فشار ثابت، $J/kg \cdot K$
$C_{p,s}$	ظرفیت گرمایی ویژه دانه‌های جامد در فشار ثابت، $J/kg \cdot K$
$C_{ijkl}$	تانسور سختی، kPa
$D_p$	قطر شمع انرژی، m
$D_s$	عرض مرزهای مدل، m
E	مدول الاستیسیته، kPa
G	مدول برشی، kPa
H	بارگذاری حرارتی گرمایشی
$H_p$	ارتفاع شمع انرژی، m
$H_s$	ارتفاع مدل، m
K	مدول بالک، kPa
$K_n$	مقاومت عمودی المان حد فاصل، kPa/m
$K_s$	مقاومت برشی المان حد فاصل، kPa/m
Q	نیروی وارد بر سر شمع انرژی، kN
R	بازیابی حرارتی
T	دما، °C
t	زمان، s
$\Delta Z_{min}$	کوچک‌ترین بعد المان خاک، m

### علائم یونانی

$\alpha_p$	ضریب انبساط حرارتی شمع انرژی، $\mu/K$
$\alpha_s$	ضریب انبساط حرارتی خاک، $\mu/K$
$\alpha$	ضریب انبساط حرارتی، $\mu/K$
$\delta_{kl}$	دلتای کروئکر
$\epsilon_{T-free}$	کرنش حرارتی آزاد
$\epsilon_T$	کرنش حرارتی ایجاد شده

کرنش‌های ایجاد شده تحت بارگذاری حرارتی می‌شود؛ بنابراین زمان گرمایش و سرمایش شمع، به ترتیب مقدار بالا آمدگی و نشست سر شمع نیز افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع از  $8/5 \mu/K$  به  $12 \mu/K$  مقدار جابه‌جایی در سر شمع در زمان گرمایش و سرمایش به ترتیب ۴۵٪ و ۴۹٪ و با افزایش ضریب انبساط حرارتی شمع از  $8/5 \mu/K$  به  $16 \mu/K$  مقدار جابه‌جایی در سر شمع در زمان گرمایش و سرمایش نزدیک به ۱۰۰٪ افزایش می‌یابد.

۵- با افزایش جابه‌جایی‌های شمع انرژی، به دلیل اندرکنش میان شمع و خاک مقدار جابه‌جایی و در نتیجه کرنش پلاستیک در خاک نیز افزایش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود تا هنگام بازگشت شمع انرژی به دمای اولیه، خاک اجازه‌ی بازگشت شمع به حالت اولیه را ندهد. هر چه جابه‌جایی شمع و خاک در زمان بارگذاری حرارتی بیشتر باشد، رفتار برگشت‌ناپذیر شمع نیز تشدید می‌شود.

۶- افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک باعث کاهش اندک اصطکاک در جداره‌ی شمع در زمان گرمایش می‌شود به نحوی که با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک از  $1 \mu/K$  به  $5 \mu/K$  و از  $1 \mu/K$  به  $10 \mu/K$ ، حداکثر مقدار تغییر اصطکاک در زمان گرمایش به ترتیب برابر با ۲٪ و ۹٪ می‌باشد. اما تحت بارگذاری سرمایشی، تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک اثری بر مقدار اصطکاک در جداره‌ی شمع انرژی ندارد.

۷- با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک، به دلیل کاهش اندک اصطکاک در جداره‌ی شمع در زمان گرمایش، مقدار تنش محوری نیز اندکی کاهش می‌یابد به نحوی که با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک از  $1 \mu/K$  به  $5 \mu/K$  و از  $1 \mu/K$  به  $10 \mu/K$ ، مقدار تنش محوری حداکثر در زمان گرمایش به ترتیب ۴٪ و ۸٪ کاهش می‌یابد. اما در زمان سرمایش، مقدار تنش محوری با تغییر ضریب انبساط حرارتی خاک تغییری نمی‌کند.

۸- افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک باعث افزایش جابه‌جایی شمع در بالای نقطه‌ی خنثی و کاهش جابه‌جایی در زیر نقطه‌ی خنثی تحت بارگذاری حرارتی گرمایشی می‌شود؛ لازم به ذکر است که با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک از  $1 \mu/K$  به  $5 \mu/K$  و از  $1 \mu/K$  به  $10 \mu/K$ ، مقدار بالا آمدگی سر شمع در زمان گرمایش به ترتیب ۵٪ و ۱۱٪ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک در زمان گرمایش، نقطه‌ی خنثی به انتهای شمع انرژی

London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles, *Géotechnique*, 59(3) (2009) 237-248.

- [8] G. Jiang, C. Lin, D. Shao, M. Huang, H. Lu, G. Chen, C. Zong, Thermo-mechanical behavior of driven energy piles from full-scale load tests, *Energy and Buildings*, 233 (2021) 110668.
- [9] Z. Chen, Y. Sun, H. Xiao, Q. Ma, L. Zhang, In-situ thermomechanical response test of an energy pile under temperature loading, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(11) (2021) 10355-10364.
- [10] D. Salciarini, F. Ronchi, C. Tamagnini, Thermo-hydro-mechanical response of a large piled raft equipped with energy piles: a parametric study, *Acta Geotechnica*, 12(4) (2017) 703-728.
- [11] C. Sung, S. Park, S. Lee, K. Oh, H. Choi, Thermo-mechanical behavior of cast-in-place energy piles, *Energy*, 161 (2018) 920-938.
- [12] W. Yang, L. Zhang, H. Zhang, F. Wang, X. Li, Numerical investigations of the effects of different factors on the displacement of energy pile under the thermo-mechanical loads, *Case Studies in Thermal Engineering*, 21 (2020) 100711.
- [13] B. Asadi, M.A. Kiani Fordoei, M. Oliaei, Numerical Investigation of Temperature Effect on Interface Strength in Energy Piles, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 37.2(2.2) (2021) 25-33, (in Persian).
- [14] D. Wu, H. Liu, G. Kong, C. Li, Thermo-mechanical behavior of energy pile under different climatic conditions, *Acta Geotechnica*, 14(5) (2019) 1495-1508.
- [15] A. Rotta Loria, A. Gunawan, S. Chao, L. Laloui, C.W.W. Ng, Numerical modelling of energy piles in saturated sand subjected to thermo-mechanical loads, *Geomechanics for Energy and the Environment*, 1 (2015) 1-15.
- [16] N.V. Tri, W. Nanwangzi, G. Yixiang, P. Jean-Michel, T.A. Minh, Long-term thermo-mechanical behaviour of energy piles in clay, *Environmental Geotechnics*, 7(4) (2020) 237-248.
- [17] W. Yang, L. Ju, L. Zhang, F. Wang, Experimental

کرنش حرارتی محدود شده  $\varepsilon_{T-Rstr}$

نسبت حجمی سیال منفذی به دانه‌های جامد  $\theta_f$

ضریب رسانایی حرارتی موثر،  $W/m \cdot K$   $\lambda_{eff}$

ضریب رسانایی سیال منفذی،  $W/m \cdot K$   $\lambda_f$

ضریب رسانایی حرارتی دانه‌های جامد،  $W/m \cdot K$   $\lambda_s$

ضریب پواسون  $\nu$

چگالی،  $kg/m^3$   $\rho$

چگالی سیال منفذی،  $kg/m^3$   $\rho_f$

چگالی دانه‌های جامد،  $kg/m^3$   $\rho_s$

تنش محوری، kPa  $\sigma_a$

تنش حرارتی، kPa  $\sigma_T$

تانسور تنش، kPa  $\sigma_{ij}$

## منابع

- [1] L. Laloui, M. Nuth, L. Vulliet, Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(8) (2006) 763-781.
- [2] L. Laloui, A.F. Rotta Loria, Analysis and design of energy geostructures: theoretical essentials and practical application, Academic Press, an imprint of Elsevier, London, United Kingdom ; San Diego, CA, 2020.
- [3] Y. Yuan, X. Cao, L. Sun, B. Lei, N. Yu, Ground source heat pump system: A review of simulation in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9) (2012) 6814-6822.
- [4] W. Zhong-jin, Z. Ri-hong, F. Peng-fei, W. Wen-jun, W. Heng-yu, Analysis of an energy pile enduring cyclic temperature loads, *Geotechnical Research*, 6(3) (2019) 227-233.
- [5] A.D. Donna, M. Barla, T. Amis, Energy Geostructures: Analysis from research and systems installed around the World, in: DFI 42nd Annual Conference on Deep Foundations, 2017.
- [6] L. Laloui, A. Di Donna, Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering, Wiley, 2013.
- [7] P.J. Bourne-Webb, B. Amatya, K. Soga, T. Amis, C. Davidson, P. Payne, Energy pile test at Lambeth College,

- Sustainable Energy Reviews, 4(3) (2000) 213-265.
- [23] A. Moradshahi, M. Faizal, A. Bouazza, J.S. McCartney, Cross-sectional thermo-mechanical responses of energy piles, *Computers and Geotechnics*, 138 (2021) 104320.
- [24] G.q. Kong, T. Cao, Y.h. Hao, Y. Zhou, L.w. Ren, Thermomechanical properties of an energy micro pile-raft foundation in silty clay, *Underground Space*, 6(1) (2021) 76-84.
- [25] A.F. Bower, *Applied Mechanics of Solids*, 1 ed., CRC Press, Boca Raton, 2009.
- [26] F.Cecinato, F.Loveridge, A.Gajo, W.Powrie, A new modelling approach for piled and other ground heat exchanger applications, in: *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, 2015, pp. 2517-2522.
- [27] The Ministry of Road and Urban Development of the Islamic Republic of Iran, *Pile Construction Specification (Driven and Cast in Place)*, Rule NO. 386, 2015, (in Persian).
- [28] S.H. Kosmatka, W.C. Panarese, B. Kerkhoff, *Design and control of concrete mixtures*, Portland Cement Association Skokie, IL, 2002.
- investigations of the thermo-mechanical behaviour of an energy pile with groundwater seepage, *Sustainable Cities and Society*, 77 (2022) 103588.
- [18] B.L. Amatya, K. Soga, P.J. Bourne-Webb, T. Amis, L. Laloui, Thermo-mechanical behaviour of energy piles, *Géotechnique*, 62(6) (2012) 503-519.
- [19] T. Amis, P. Bourne-Webb, C. Davidson, B. Amatya, K. Soga, The effects of heating and cooling energy piles under working load at Lambeth College, UK, in: *33rd Annual and 11th Intl. Conf. of the Deep Foundations Institute*, New York, 2008.
- [20] C. Han, X. Yu, Analyses of the thermo-hydro-mechanical responses of energy pile subjected to non-isothermal heat exchange condition, *Renewable Energy*, 157 (2020) 150-163.
- [21] T. Razmkhah, F. Jafarzadeh, O. Ghasemi-Fare, Numerical Investigation of the Thermo-Mechanical Response of Single Energy Pile, in: *IFCEE 2018*, 2018, pp. 664-674.
- [22] S.W. Rees, M.H. Adjali, Z. Zhou, M. Davies, H.R. Thomas, Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures, *Renewable and*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Sadeghzadeh, M. M. Ahmadi, *Numerical investigation of the effects of thermal expansion coefficient of pile and soil on the mechanical response of energy pile*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(2) (2023) 279-300.

DOI: [10.22060/ceej.2022.21718.7807](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21718.7807)

