

## تحلیل رفتار مکانیکی - حرارتی شمع‌های مبدل حرارت با مدل‌سازی عددی

محمدرضا جدیری<sup>۱</sup>، امیرحسین رضایی فرعی<sup>۲\*</sup>، حامد فرشباف آقاجانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

دریافت: ۱۴۰۰/۵/۲، بازنگری: ۱۴۰۰/۷/۲۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۸، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۸/۸

### چکیده

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به جای بهره‌گیری از سوخت‌های فسیلی یک راهکار اساسی در کاهش آلودگی‌های محیط زیستی ناشی از گازهای گلخانه‌ای است. شمع‌های انرژی علاوه بر نقش سازه‌ای، زمینه مناسبی را جهت بهره‌برداری از منابع زمین گرمایی فراهم می‌آورد. در این مقاله چالش‌های ژئوتکنیکی شمع انرژی و همچنین رفتار مکانیکی-حرارتی این سیستم با استفاده از نرم‌افزار آباکوس (Abaqus) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به بررسی تغییرات ناشی از اعمال بارگذاری دمایی شمع بر روی تنش محوری، تنش اصطکاکی جداره، جابه‌جایی محوری، کرنش محوری و بار حدی شمع انرژی پرداخته شده و یک دسته تحلیل حساسیت به جهت درک رفتار شمع‌های انرژی در خاک ماسه‌ای با مشخصات حرارتی و فیزیکی متفاوت انجام یافته است. نتایج نشان می‌دهد که در اثر اعمال بارگذاری دمایی، میزان ظرفیت باربری شمع در حدود ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. از طرفی مشخصات حرارتی خاک تأثیر بسزایی در عملکرد ژئوتکنیکی شمع دارد.

**کلیدواژه‌ها:** شمع انرژی، تنش محوری، تنش اصطکاکی جداره، جابه‌جایی و کرنش محوری، نقطه خنثی، بار حدی.



شکل ۱- میلگردهای شمع انرژی و لوله‌های جاذب (Brandl, ۲۰۰۶)

مدار اول زمین است و به‌عنوان منبع تجدیدپذیر انرژی تلقی می‌شود. مدار دوم سیستم شمع بتنی مسلح با لوله‌های U شکل بوده و در نهایت مدار سوم شبکه بسته‌ای از تأسیسات سرمایشی و گرمایشی درون ساختمان می‌باشد. عملکرد شمع‌های مبدل حرارت بدین‌گونه است که در زمستان، گرمای موجود در عمق زمین توسط لوله‌های پلی‌اتیلن دانسیته بالا متصل به قفسه آرماتور

### ۱- مقدمه

تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت‌های صنعتی در دهه‌های اخیر سبب تغییر در رویکرد و مدیریت مصرف انرژی شده است. بر اساس آمار ۹۸ درصد از مصرف انرژی ساختمان‌ها از محصولات نفتی و گازی تأمین می‌شود (MRUD, ۲۰۱۴). در دهه اخیر، سیستم‌های حرارتی زمین گرمایی به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر<sup>۱</sup> و دوستدار محیط زیست، زمینه مناسبی را برای بهره‌برداری از منابع زمین گرمایی فراهم آورده است.

شمع‌های انرژی<sup>۲</sup> به‌واسطه سازگاری با محیط‌زیست و تأمین نیاز مقاومتی سازه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مکانیزم عملکرد شمع‌های انرژی بر پایه انتقال حرارت بین شمع و خاک استوار است. این سیستم بر اساس ظرفیت بالای انباشت گرمایی بتن می‌باشد. شکل (۱) طریقه نصب لوله‌های جاذب در درون شبکه آرماتوربندی را به‌وضوح نشان می‌دهد. این سیستم از سه مدار تشکیل شده است (Suryatriyastuti و همکاران، ۲۰۱۲).

تاکنون تحقیقات مختلفی بر روی جنبه‌های مختلف عملکرد شمع‌های بتنی معمول در خاک‌های ماسه‌ای انجام گرفته است (مکارچیان و همکاران، ۱۴۰۰؛ شوش‌پاشا و سعیدی، ۱۳۹۵). در خصوص شمع‌های انرژی تمرکز بخش عمده مطالعات انجام شده بر عملکرد و راندمان حرارتی این شمع‌ها بوده است (Qi و همکاران، ۲۰۲۰) و رفتار این شمع‌ها تحت بارگذاری هم‌زمان حرارتی و مکانیکی، عوامل مؤثر بر آن و همچنین عملکرد ژئوتکنیکی این شمع‌ها هنوز به‌طور کامل شناخته شده نیست (Peron و همکاران، ۲۰۱۱). از مهم‌ترین مطالعات انجام یافته در مورد رفتار مکانیکی-حرارتی شمع‌های انرژی و پارامترهای مؤثر بر آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

Laloui و همکاران (۲۰۰۶) مطالعاتی را بر روی شمع‌های مبدل حرارت اتکایی انجام دادند و نتایج حاصل را با آزمایشات محلی مقایسه کردند. نتایج حاکی از آن بود که در اثر اعمال بارگذاری حرارتی، میزان تنش محوری در نوک شمع بیشتر از حالت مکانیکی است. Gray (۲۰۱۳) به تحلیل شمع‌های حرارتی تحت بارگذاری ترکیبی نیروی محوری و لنگر خمشی و عملکرد سازه‌ای این شمع‌ها پرداخت.

Gashti و همکاران (۲۰۱۴) به ارزیابی رفتار مکانیکی-حرارتی شمع‌های انرژی طی عملکرد سرمایه‌ی و گرمایشی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که انبساط و انقباض ناشی از تغییرات دمایی بر روی اندرکنش شمع و خاک تأثیر بسزایی دارد.

Loria و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی مدل عددی شمع‌های انرژی در خاک ماسه‌ای اشباع تحت بارگذاری مکانیکی و حرارتی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که برای بارهای مکانیکی و حرارتی قابل توجه، کرنش پلاستیک در جداره شمع و خاک رخ می‌دهد و همین عامل در نهایت اصطکاک بسیج شده بین شمع و خاک را تحت‌الشعاع قرار خواهد داد.

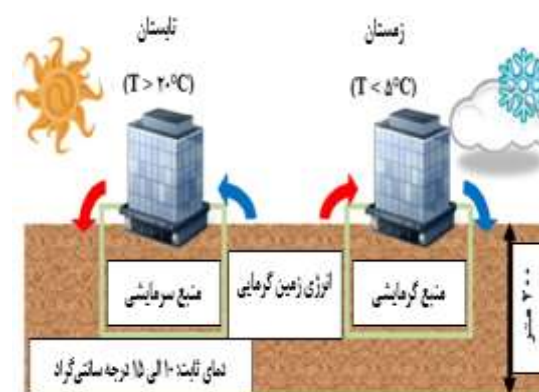
Batini و همکاران (۲۰۱۵) با انجام مدل‌سازی عددی به‌وسیله نرم‌افزار آباکوس به مطالعه پاسخ ترمومکانیکی شمع‌های انرژی پرداخته و با انجام تحلیل حساسیت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نسبت ابعادی شمع و مشخصات و نرخ جریان سیال حرارتی را بر رفتار حرارتی و ژئوتکنیکی این شمع‌ها بررسی کردند که نتایج بیانگر تأثیر قابل توجه نسبت ابعادی بر رفتار ژئوتکنیکی بود. به-منظور بررسی رفتار شمع انرژی در شرایط دوگانه بارهای مکانیکی و چرخه‌های دمایی Li و Wang (۲۰۲۱) با انجام آزمایش‌های صحرایی و ایزراندی شمع‌های انرژی اجرا شده از جنس بتن پیش‌تنیده با مقاومت بالا، کرنش، تنش و جابه‌جایی‌های ایجاد شده در اثر سیکل‌های حرارتی را مطالعه کردند. نتایج حاصل نشان داد که در

شمع بتنی جذب می‌شود. قطر تیوب‌های مبدل عمدتاً بین ۲۵ تا ۴۰ میلی‌متر است. جذب این گرما از طریق سیال جاذب حرارت موجود در داخل این لوله‌ها صورت می‌گیرد که به‌دلیل خاصیت ضدیخ‌زدگی اغلب مخلوطی از آب و نمک و یا آب و اتانول است. سپس این گرما از طریق یک پمپ حرارتی<sup>۳</sup> مستقر در بیرون به داخل سازه هدایت می‌شود. در تابستان این چرخه معکوس عمل می‌کند و گرمای داخل سازه به‌وسیله پمپ حرارتی برای شارژ مجدد و سرمایه‌ی سازه به داخل زمین تزریق می‌شود. با بررسی منحنی تغییرات دمای هوا و دمای زمین در اعماق مشاهده می‌شود که هرچه عمق زمین بیشتر شود، دمای زمین در طول سال دارای تغییرات کمتری خواهد بود، به‌طوری‌که از حدود عمق ۳ تا ۴ متری از سطح زمین تغییرات دما و نوسانات آن در طول یک سال بسیار ناچیز می‌باشد.

این در حالی است که میزان تغییرات دمای هوا دارای نوسانات بسیار زیادی می‌باشد. شکل (۲) فرآیند بهره‌برداری از منابع انرژی زمین گرمایی را به‌خوبی نشان داده است. در ناحیه سطحی زمین دما با زمان و عمق مطابق رابطه  $T(z, t)$  تغییر می‌کند که در آن  $T(t)$  معرف بارهای چرخه‌ای حرارتی دمای خارجی سالانه و  $T(z)$  بیانگر امواج حرارتی منتشر شده در عمق زمین است. این منطقه بحرانی‌ترین عمقی است که بایستی در طراحی شمع‌های حرارتی مدنظر قرار بگیرد. تابع  $T(z, t)$  مطابق رابطه (۱) معرف یک موج سینوسی می‌باشد (Akrouch, ۲۰۱۴):

$$T(z, t) = T_{ave} + A_0 e^{-\frac{z}{a}} \left( \sin \left( \omega t - \frac{z}{a} \right) \right) \quad (1)$$

که در آن  $t$  زمان،  $T_{ave}$  متوسط دمای سالیانه خاک،  $A_0$  بیشترین دامنه تغییرات سالیانه دما،  $z$  عمقی که دمای آن مورد بررسی قرار گرفته است و  $\omega$  فرکانس شعاعی سالیانه می‌باشد.



شکل ۲- عملکرد سیستم زمین گرمایی کم‌عمق (Lee, ۲۰۰۹)

سایر موارد از جمله خواص خاک بر ظرفیت باربری شمع‌های انرژی دارند.

رمخواه شریبانی (۱۳۹۵) با مدل‌سازی عددی به وسیله نرم-افزار فلک سه‌بعدی به بررسی رفتار حرارتی- مکانیکی شمع‌های تکی و گروه شمع پرداخته و نتیجه گرفته است استفاده از شمع-های حرارتی و غیرحرارتی در یک گروه باعث به وجود آمدن نشست نامتقارن و همین‌طور تنش‌های ناهماهنگ در شمع‌ها و سرشمع (در صورت وجود) می‌شود.

با جمع‌بندی مطالعات قبلی مشاهده می‌شود که بررسی شمع‌های انرژی در طی اعمال بارگذاری ثابت دمایی صورت گرفته است، ولی در خصوص تأثیر سیکل‌های حرارتی بر عملکرد ژئوتکنیکی این شمع‌ها مطالعات نسبتاً کمی صورت گرفته است. این در حالی است که شمع انرژی در طی عملکرد سالیانه خود به صورت پیوسته‌ای سیکل‌های گرمایشی و سرمایشی را تجربه می‌کند. از این رو در مقاله حاضر علاوه بر بررسی رفتار در دماهای ثابت، عملکرد شمع انرژی در اثر اعمال بارگذاری سیکلی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه حاضر تأثیر اعمال بارگذاری حرارتی و برودتی شمع بر روی تنش محوری، تنش اصطکاکی جداره، جابه‌جایی و کرنش محوری و بار حدی در طی عملکرد شمع انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین یک دسته تحلیل حساسیت به جهت درک رفتار شمع انرژی در خاک ماسه‌ای با مشخصات حرارتی و فیزیکی متفاوت انجام یافته است.

### ۱-۱- تحلیل رفتار شمع انرژی

علی‌رغم پیشرفت‌های اخیر در ارائه روش‌های علمی در طراحی شمع‌ها، تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها به دلیل لزوم لحاظ کردن اندرکنش خاک و سازه در روش‌های علمی، همچنان به روابط تجربی وابسته است (احمدی و کشمیری، ۱۳۹۵). در شمع‌های تحت بارگذاری محوری، بار از طریق نوک شمع، جداره شمع و یا ترکیبی از هر دو مکانیزم به خاک اطراف منتقل می‌شود. در صورتی که نوک شمع به لایه متراکم و سخت برسد، مکانیزم عملکرد شمع به صورت اتکایی خواهد بود و مقاومت نوک شمع از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q_p = A_p q_p = A_p q N_q \quad (2)$$

در رابطه فوق  $A_p$ ،  $q_p$ ،  $N_q$  و  $q$  به ترتیب سطح مقطع شمع، ظرفیت باربری خاک در نوک شمع، ضریب ظرفیت باربری شمع و تنش مؤثر قائم در نوک شمع می‌باشد. تنش مقاوم جانبی از طرف خاک و روبه بالا به شمع وارد می‌شود. نیروی حاصل از این تنش‌های مقاوم حداکثر مقاومت اصطکاکی نامیده می‌شود که با  $Q_s$  نشان می‌دهند (Bowles، ۱۹۹۹):

سیکل‌های گرمایش و سرمایش تنش‌های فشاری و کششی در شمع‌ها ایجاد می‌شوند.

Assuncao (۲۰۱۴) مدل عددی پیشرفته‌ای را برای بررسی تأثیر ضرایب انبساط حرارتی شمع و خاک با استفاده از نرم‌افزار ADINA ارائه کرد و به این نتیجه رسید که تغییر در ضرایب انبساط حرارتی شمع و خاک تأثیر بسزایی در ایجاد تنش‌های حرارتی در شمع دارد. با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی شمع‌های انرژی از جنس آلومینیوم، Huang و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر مشخصات حرارتی و جنس تشکیل‌دهنده شمع‌ها را تحت سیکل-های مختلف حرارتی و شرایط بارگذاری متفاوت بررسی کردند. در یک مطالعه اخیر نیز Yang و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تأثیر مشخصات حرارتی شمع و خاک پیرامون آن بر رفتار ترمومکانیکی شمع‌های انتقال‌دهنده حرارت پرداختند. نتایج مطالعات حاکی از تأثیر قابل توجه ویژگی‌های حرارتی، هم شمع و هم زمین پیرامون، بر عملکرد شمع‌های حرارتی می‌باشد.

با مروری بر ادبیات فنی موجود مشخص می‌شود که علی‌رغم گسترش روزافزون، هنوز روش و روابط مشخصی برای طراحی ژئوتکنیکی شمع‌های انرژی موجود نبوده و رویه معمول، طراحی این شمع‌ها مشابه شمع‌های عادی و با اعمال ضرایب اطمینان بزرگ می‌باشد (Peron و همکاران، ۲۰۱۱). این امر ضرورت مطالعه بیشتر در این مورد را آشکار می‌سازد. تأثیر پارامترهای زیاد از جمله ویژگی‌های مکانیکی و مشخصات حرارتی شمع و خاک پیرامون، ابعاد هندسی شمع، نوع بارگذاری مکانیکی، تعداد و بازه دمایی سیکل‌های حرارتی، مشخصات سطح تماس شمع و خاک و مهمتر از همه نوع باربری شمع (مقاومت نوک یا اصطکاک جداره) ارائه راهکار واحد را با چالش مواجه کرده و برخی از محققین انجام تحلیل موردی ویژه هر پروژه را پیشنهاد داده‌اند (Knellwolf و همکاران، ۲۰۱۱).

از جمله مطالعات در این خصوص Kumar و Dubey (۲۰۱۷) به ارزیابی رفتار تنش-کرنش شمع‌های انرژی در خاک ماسه‌ای پرداخته و به این نتیجه رسیدند که در بارهای مکانیکی کم، تنش محوری شمع به‌طور عمده تحت تأثیر بارگذاری دمایی قرار می‌گیرد.

Chakraborty و Saggi (۲۰۱۵) به تحلیل سیکلی شمع‌های انرژی در خاک ماسه‌ای شل و متراکم با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداخته و به این نتیجه رسیدند که سیکل دمایی تأثیر چندانی بر میزان مقاومت جداره حدی ندارد. Wang و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از یک آزمایش برش مستقیم اصلاح شده، یک مدل شبیه-سازی المان محدود برای بررسی رفتار مکانیکی-حرارتی شمع‌های مبدل انرژی زمین گرمایی را بسط دادند. نتایج نشان داد که نیروی تماسی و اصطکاک بین شمع و خاک تأثیر قابل توجهی نسبت به

همچنین مطابق با شکل (۴) با کاهش دما، شمع منقبض شده و قسمت بالایی به سمت پایین و قسمت پایینی به سمت بالا جابه‌جا خواهد شد. مطالعات مختلفی برای تعیین محل نقطه خنثی انجام گرفته است که می‌توان به Wang و Li (۲۰۲۱) اشاره کرد که بر اساس نتایج مطالعه صحرایی محل نقطه خنثی را در حدود ۲/۳ طول شمع اندازه‌گیری کرده‌اند. همچنین Wang و همکاران (۲۰۱۹) یک روش ساده شده برای تعیین نقطه خنثی ارائه نموده‌اند. مقدار مقاومت اصطکاکی بسیج شده بستگی به موقعیت نقطه خنثی داشته و محاسبات بر پایه معادلات (۴) انجام می‌گیرد (Laloui و Mimouni، ۲۰۱۴):

$$\begin{aligned} Q_{mob} &= Q_{mob,up} + Q_{mob,bot} \\ Q_{mob,up} &= Q_{s,mob,up} \\ Q_{mob,bot} &= Q_{b,mob} + Q_{s,mob,bot} \end{aligned} \quad (۴)$$

با فرض  $ZNP$  و  $L$  به ترتیب به‌عنوان عمق نقطه خنثی و طول شمع،  $Q_{s,mob,up}$  و  $Q_{s,mob,bot}$  با استفاده از معادله (۵) محاسبه می‌شود (Laloui و Mimouni، ۲۰۱۴):

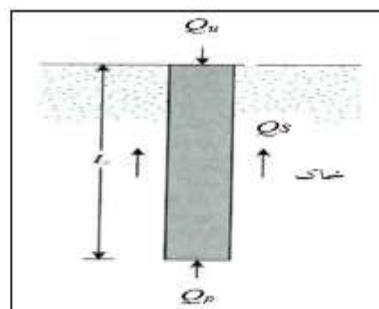
$$\begin{aligned} Q_{s,mob,up} &= \pi D \int_0^{ZNP} t \cdot dz \\ Q_{s,mob,bot} &= \pi D \int_{ZNP}^L t \cdot dz \end{aligned} \quad (۵)$$

## ۲- مدل‌سازی عددی

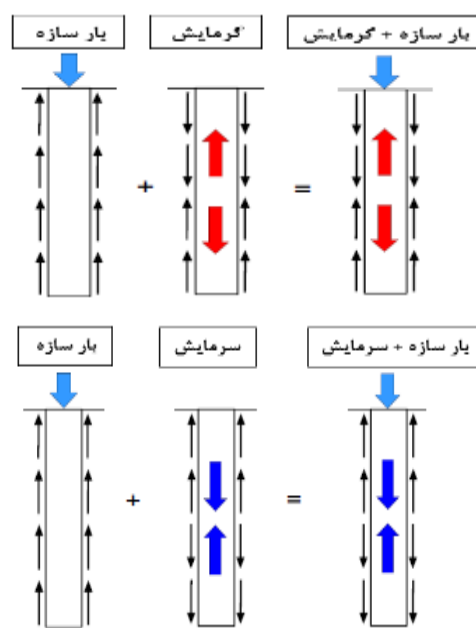
در سال‌های اخیر پیشرفت شگرفی در زمینه مدل‌سازی انواع پدیده‌های فیزیکی پدید آمده است. نرم‌افزار ABAQUS از جمله نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه مدل‌سازی مسائل ژئوتکنیکی است که علاوه بر قابلیت تحلیل مدل‌های خطی ساده، قادر به مدل‌سازی و تحلیل مسائل پیچیده غیرخطی است. در این مقاله برای مدل‌سازی شمع انرژی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. در مقاله حاضر به دلیل تقارن مدل شمع و خاک، به‌منظور کاهش زمان تحلیل، از تحلیل المان محدود تقارن محور برای مدل‌سازی شمع و خاک استفاده شده است. در مطالعه حاضر با توجه به این که کوپل تنش و حرارت مورد تحلیل قرار خواهد گرفت و با در نظر گرفتن ماهیت غیردینامیکی مسئله، از حالت تحلیل Standard که مبتنی بر روش حل ضمنی (Implicit) می‌باشد استفاده شده که معمولاً نتایج این روش نسبت به روش صریح، تطابق بهتری با واقعیت نیز دارند. هندسه شمع و خاک به‌صورت جداگانه با استفاده از نرم‌افزار مدل شده است. برای انتخاب ابعاد مدل، یک سری تحلیل حساسیت حرارتی انجام یافته است. با توجه به کانتورهای انتقال حرارت<sup>۵</sup> در سیکل سی‌ام بارگذاری حرارتی مطابق شکل (۵) و نمودار مربوطه در شکل (۶)، ملاحظه می‌شود که تغییرات دمایی در سطح خاک و همچنین در عمقی برابر با

$$Q_s = \int f_s(z) P(z) dz \quad (۳)$$

که در آن  $f_s(z)$  حداکثر تنش مقاوم جانبی و  $P(z)$  محیط بدنه شمع در عمق  $Z$  می‌باشد. شکل (۳) مکانیزم عملکرد شمع‌های اصطکاکی را نشان می‌دهد. در شمع‌های انرژی افزایش و کاهش دما سبب انقباض و انقباض شمع خواهد شد. انقباض شمع سبب ایجاد مقاومت اصطکاکی بسیج شده در شمع خواهد شد. در اثر اعمال بارگذاری دمایی، جابه‌جایی‌های رو به بالا و پایین حول نقطه خنثی<sup>۴</sup> روی خواهد داد. طبق تعریف، نقطه خنثی مکانی از شمع است که در اثر بارگذاری دمایی، دارای تغییر مکان صفر باشد. به عبارتی شمع انرژی به‌لحاظ جابه‌جایی به دو قسمت فوقانی و تحتانی تقسیم‌بندی می‌شود. با توجه به شکل (۴) در اثر افزایش حرارت، شمع منبسط شده و قسمت بالایی به سمت بالا و قسمت پایینی به سمت پایین جابه‌جا می‌شود.



شکل ۳- مکانیزم عملکرد شمع اصطکاکی (Bowles، ۱۹۹۹)

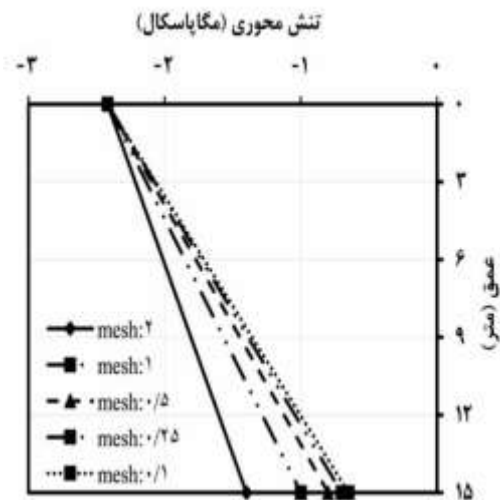


شکل ۴- دیاگرام آزاد بارگذاری مکانیکی و دمایی شمع (Olgun، ۲۰۱۳)

مدل رفتاری موهر کولمب برای مدل سازی خاک اطراف شمع، قابلیت مناسبی جهت ارائه رفتار واقعی خاک دارد (Saggu و Chakraborty، ۲۰۱۵). در مدل موهر کولمب، گسیختگی زمانی اتفاق می افتد که تنش مماسی در یک نقطه به یک میزان حدی برسد. فرم کلاسیک این مدل مطابق با معادله زیر به دست می آید:

$$\tau_n = \sigma_n \tan(\varphi) + C \quad (۶)$$

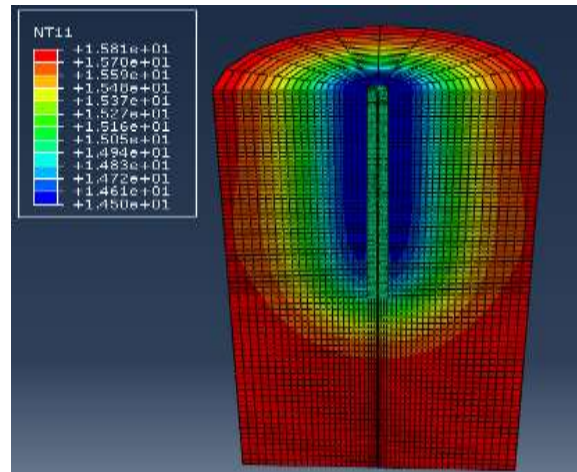
که در آن تنش برشی خاک با نماد  $\tau_n$ ، تنش قائم با  $\sigma_n$ ، زاویه اصطکاک داخلی خاک با  $\varphi$  و چسبندگی با  $C$  نشان داده شده است. خواص سطوح تماس: به جهت درک بهتر رفتار واقعی اندرکنش شمع- خاک- شمع، از المان تماس اصطکاکی برای مدل سازی سطح تماس خاک و شمع استفاده شده است. در تماس اصطکاکی که از قانون اصطکاک کولمب تبعیت می کند، از روش پنالتی با ضریب اصطکاک ۰/۷ که این مقدار متناسب با  $\tan(\varphi)$  است، استفاده شده است (Saggu و Chakraborty، ۲۰۱۵). برای انتقال حرارت در خاک از اندرکنش هدایت حرارتی و همچنین نوع تحلیل در این مطالعه، آنالیز هم زمان کوپل حرارت- جابه جایی<sup>۶</sup> می باشد. برای انتخاب بعد چشمه مش بندی یک دسته تحلیل حساسیت تنش محوری با ابعاد مختلف مش بندی صورت گرفته است. پارامتر انتخابی برای تحلیل حساسیت مش، میزان تغییرات تنش محوری شمع در عمق است. به عبارت دیگر با اعمال یک بار محوری مشخص بر سطح فوقانی شمع، توزیع تنش محوری در عمق های مختلف در مدل های با اندازه مش های متفاوت و مقایسه آن با مقادیر تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطابق با شکل (۷) در اندازه مش کوچکتر از ۰/۲۵ متر تغییر قابل توجهی در توزیع تنش محوری شمع در عمق های مختلف مشاهده نمی شود.



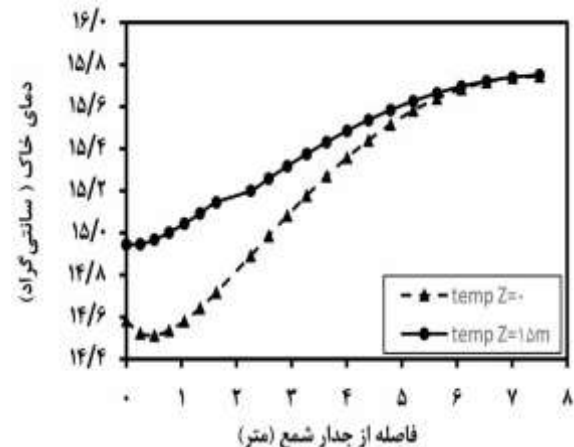
شکل ۷- تنش محوری شمع برای اندازه های مش مختلف

طول شمع، به تعادل دمایی رسیده است. نتایج حاکی از آن است که مرز قائم خاک به فاصله ۱۵ برابر قطر شمع از محور تقارن مدل و مرز زیرین خاک در فاصله ای معادل با دو برابر عمق شمع از سطح زمین، دارای مناسب ترین حالت برای مدل سازی می باشد. به عبارت دیگر افزایش فاصله مرزهای افقی و قائم، تاثیری در نتایج ایجاد نمی کند. در نتیجه ابعاد مدل خاک ۸×۳۰ متر و ابعاد شمع ۱×۱۵ متر انتخاب شده است.

از لحاظ شرایط مرزی، مطابق توصیه محققین پیشین (از جمله Batini و همکاران، ۲۰۱۵؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۹)، مرز قائم خاک در راستای X توسط تکیه گاه غلتکی و مرز افقی زیرین در دو راستای X و Y با استفاده از تکیه گاه مفصلی مقید شده تا امکان حرکت خاک و شمع در راستای قائم مدل فراهم شود.



شکل ۵- پروفیل سه بعدی انتقال حرارت بین شمع و خاک در سیکل ۱۳۰ام بارگذاری دمایی



شکل ۶- انتقال حرارت در مدل برای سیکل ۱۳۰ام بارگذاری دمایی

توجه به اطلاعات اقلیمی مربوط به میانگین دمای هوای سالیانه سطح زمین شهر اهواز در استان خوزستان است که طی یک بازه زمانی ۱۰ ساله، از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ از پرتال سازمان هواشناسی کشور اخذ شده است (www.irimo.ir).

## ۲-۱- مشخصات مصالح

در تحقیق حاضر خاک به صورت همگن و الاستوپلاستیک با مدل رفتاری موهر کولمب با جریان غیرهمراه در نظر گرفته شده است. مدل مور- کولمب نیاز به دو پارامتر الاستیک ضریب پواسون و مدول الاستیسیته و سه پارامتر معرفی کننده رفتار پلاستیک یعنی زاویه اصطکاک، زاویه اتساع و چسبندگی دارد.

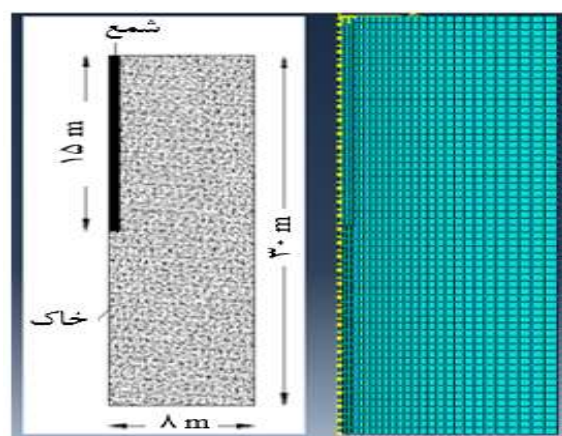
در جدول (۱) مشخصات مکانیکی و حرارتی خاک ماسه‌ای و پارامترهای مورد نیاز برای مدل رفتاری موهر- کولمب و رفتار الاستیک بتن آورده شده است. لازم به ذکر است به منظور ارائه یک الگوی بهتر و کامل‌تر از رفتار مصالح بتن، مدل رفتاری انتخاب شده برای بتن از نوع بتن آسیب دیده پلاستیک<sup>۲</sup> است که بر مبنای آسیب و بازیابی سختی می‌باشد. به عبارت دیگر در این مدل رفتاری تأثیر ترک خوردگی‌های مویی در اثر تنش‌های کششی و بسته شدن مجدد این ترک‌ها تحت تنش‌های فشاری در نظر گرفته شده است. برای تعریف رفتار بتن، سخت‌شدگی حین تنش فشاری، نرم‌شدگی تحت تنش کششی و مشخصات آسیب تحت کشش از مطالعات پیشین انتخاب شده است (Tiwary و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین با توجه به لزوم صحت‌سنجی مدل‌سازی انجام یافته با نتایج معتبر، مشابه رویه معمول مدل‌سازی شمع‌های انرژی (Saggu و Chakraborty، ۲۰۱۵) شمع متشکل از بتن بدون مسلح کننده در نظر گرفته شده و شمع‌ها به صورت درجا ریز مدل‌سازی شده‌اند.

## ۲-۲- صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی

نتایج حاصل از مدل‌ها در تصمیم‌گیری و ارائه پیشنهادها تأثیر مستقیم دارد. در این مقاله برای حصول اطمینان از صحت نتایج به دست آمده، یک سری صحت‌سنجی با تکیه بر یک مقاله معتبر انجام گرفته است. در این مطالعه برای اعتبارسنجی مدل از نتایج مطالعات Saggu و Chakraborty (۲۰۱۵) که مطالعه کاملی را بر روی تحلیل سیکلی مکانیکی- حرارتی شمع‌های انرژی در خاک ماسه‌ای با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام دادند استفاده شده است.

Saggu و Chakraborty پارامترهایی نظیر مقاومت جداره حدی، تنش محوری شمع و کرنش شعاعی شمع را در طی سیکل اول و سیکل پنجاهم بررسی کردند. در شکل (۹) فاکتور تنش

به عبارتی مدل برای مش‌های با اندازه کوچکتر از ۰/۲۵ متر حساس نیست. به جهت این‌که در مدل‌سازی شمع و خاک در نواحی نزدیک به جداره شمع بایستی اندازه مش‌بندی را برای حصول نتایج با دقت بالا کاهش داد، به همین دلیل در مدل انتخابی در نواحی دور، از اندازه مش ۰/۵ متر و در سطح تماس شمع و خاک از اندازه ۰/۲۵ متر استفاده شده است. همچنین با توجه به ماهیت مدل، المان انتخابی برای مش‌بندی بایستی از نوع المان‌های مستطیلی ۴ گره‌ای با درجه آزادی دما باشد، به همین دلیل المان‌های مش‌بندی از نوع CAX4T است. شکل (۸) نشان‌دهنده ابعاد مدل و مش‌بندی مورد استفاده در تحلیل است.



شکل ۸- مش‌بندی و ابعاد مدل شمع و خاک

برای تعیین تنش در سیستم شمع- خاک در شرایط برجا، استفاده از شرایط بارگذاری اولیه قبل از اعمال بار استاتیکی به مدل الزامی است. این تنش‌ها در راستای قائم همان تنش ژئواستاتیک می‌باشند که با اعمال نیروی شتاب ثقل در جهت پایین برای ایجاد حالت تنش فزاینده با عمق به مدل اعمال می‌شوند. برای تحلیل مدل شمع و خاک در نرم‌افزار آباکوس از دو گام تحلیل استفاده شده است. در گام اول که موسوم به گام ژئواستاتیک است، تنش‌های برجای خاک و شمع به نرم‌افزار داده شده است. در گام دوم به صورت هم‌زمان بار استاتیکی وارده از سازه و نیز بار حرارتی ناشی از تبادل حرارتی شمع انرژی و خاک به مدل اعمال شده است.

در فرآیند مدل‌سازی برای فاز گرمایشی، میزان دمای شمع از ۱۵ به ۳۲ درجه سانتی‌گراد و همچنین در فاز سرمایشی از ۱۵ به ۲ درجه سانتی‌گراد رسانده می‌شود. نظر به این‌که در طی سال، در سه ماهه اول و سه ماهه سوم نیاز حرارتی و برودتی چندانی در سازه احساس نمی‌شود، لذا عملکرد شمع انرژی در سه ماهه دوم و چهارم سال، مورد بررسی قرار گرفته است. بارگذاری دمایی با

اصطکاکی جداره، جابه‌جایی محوری، کرنش محوری و بار حدی شمع مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. همچنین یک سری تحلیل حساسیت برای درک بهتر رفتار شمع انرژی در شرایط مختلف اعم از بررسی تغییرات تنش محوری و تنش اصطکاکی جداره شمع در شرایط دمایی مختلف و تغییرات ضریب انبساط حرارتی خاک انجام یافته که نتایج حاصل به صورت زیر ارائه می‌گردد. در نتایج ارائه شده علائم اختصاری استفاده شده در نمودارها به شرح جدول (۲) هستند.

جدول ۲- علائم اختصاری نمودارها

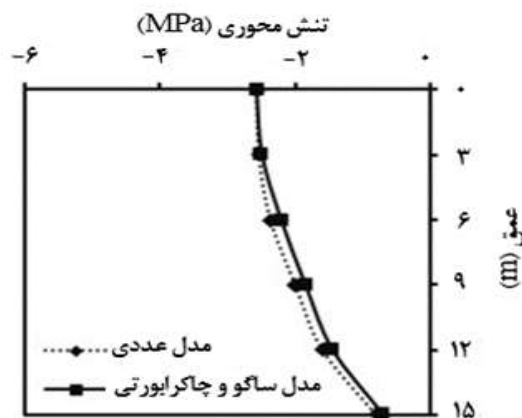
علامت اختصاری	مفهوم
$M$	فاز مکانیکی
$T_{15} \rightarrow 2$	فاز سرمایشی با کاهش دما از ۱۵ به ۲ درجه سانتی‌گراد
$T_{15} \rightarrow 32$	فاز گرمایشی با افزایش دما از ۱۵ به ۳۲ درجه سانتی‌گراد
$TM_{15} \rightarrow 2$	فاز مکانیکی- حرارتی با کاهش دما از ۱۵ به ۲ درجه سانتی‌گراد
$TM_{15} \rightarrow 32$	فاز مکانیکی- حرارتی با افزایش دما از ۱۵ به ۳۲ درجه سانتی‌گراد

### ۳-۱- تنش محوری

شکل (۱۰) نمودار تنش محوری شمع مدفون در خاک ماسه‌ای را برای فاز گرمایشی و سرمایشی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۰-الف) در فاز مکانیکی تنش فشاری  $2/42$ - کیلوپاسکال معادل با بار مجاز به دست آمده از روابط ظرفیت باربری به صورت بار گسترده به سرشمع اعمال شده است. میزان تنش محوری در سر شمع  $2/42$ - مگاپاسکال است که با افزایش عمق کاهش یافته و به  $0/6$ - مگاپاسکال در نوک شمع رسیده است. در فاز حرارتی که صرفاً شامل بارگذاری دمایی است، میزان تنش محوری در سرشمع تقریباً صفر است و با افزایش عمق، میزان تنش محوری شمع افزایش یافته و در عمق ۱۲ متری، دارای ماکزیمم مقدار خود به میزان  $0/43$ - مگاپاسکال است. در فاز مکانیکی- حرارتی میزان تنش محوری در سرشمع تقریباً  $2/42$ - مگاپاسکال است که این مقدار با افزایش عمق کاهش یافته و به میزان  $0/7$ - مگاپاسکال در نوک شمع رسیده است. با توجه به شکل (۱۰-الف) ملاحظه می‌شود که با افزایش دمای شمع از ۱۵ به ۳۲ در اثر ایجاد انبساط حرارتی، تنش محوری در فاز مکانیکی- حرارتی بیشتر از فاز مکانیکی است.

با توجه به شکل (۱۰)، بیشترین میزان افزایش تنش محوری نسبت به فاز مکانیکی در حدود  $9/4$  درصد است. با توجه به شکل (۱۰-ب) در فاز سرمایشی نتایج به صورت دیگری رقم خورده است. در فاز سرمایشی با کاهش دمای شمع از ۱۵ به ۲ درجه، در اثر

محوری شمع در عمق‌های مختلف برای مقاله Chakraborty-Saggu و مدل عددی حاضر ارائه شده است. مشاهده می‌شود که میزان خطای مدل عددی  $3/7$  درصد بوده که در محدوده قابل قبولی قرار دارد.



شکل ۹- مقایسه خطای مدل عددی با مدل Saggu-Chakraborty

جدول ۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل سازی Jeong و همکاران، (۲۰۱۴)

پارامتر	ماسه	بتن
دانسیته ( $\frac{KN}{m^3}$ )	۲۰	۲۵
مدول الاستیسیته (MPa)	۵۰	۳۰۰۰۰
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۲۰
چسبندگی (kPa)	۰/۱	۰
زاویه اصطکاک ( $^{\circ}$ )	۳۵	-
زاویه اتساع ( $^{\circ}$ )	۵	۳۶
ضریب انبساط حرارتی ( $1/^{\circ}C$ )	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱
هدایت حرارتی ( $W/m^{\circ}C$ )	۲/۵	۲/۱
گرمای ویژه ( $I/^{\circ}C$ )	۱۲۰۰	۸۸۰

خطای مدل به روش تفاضل حداقل مربعات به فرم معادله (۷) محاسبه شده است:

$$E_r = \frac{\sum_i^n (x_{mi} - x_{vi})^2}{n} \times 100 \quad (7)$$

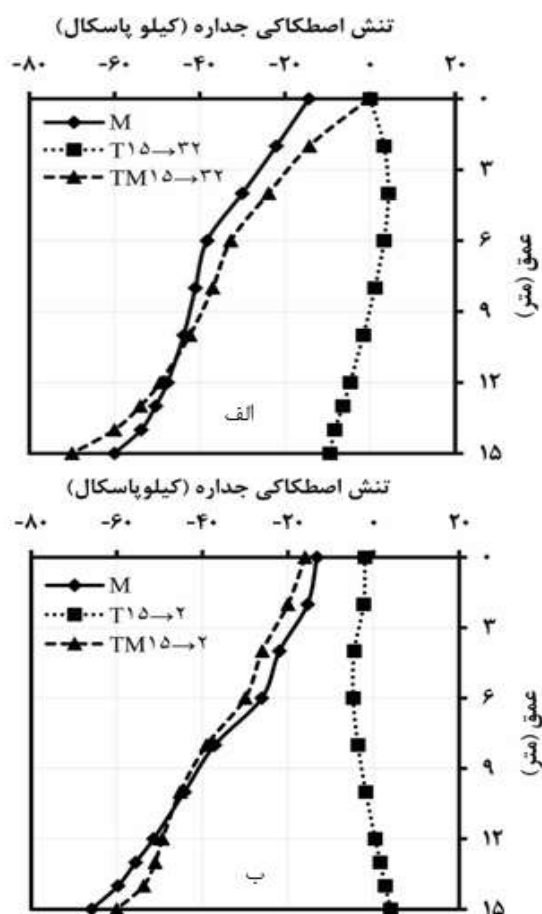
که در آن  $E_r$  میزان خطای مدل،  $x_{vi}$  و  $x_{mi}$  نماینده مقادیر تنش محوری در عمق معین برای مدل عددی و مدل Chakraborty-Saggu است.

### ۳- نتایج

در این مطالعه، رفتار مکانیکی- حرارتی شمع انرژی در خاک ماسه‌ای در طی عملکرد گرمایشی و سرمایشی شمع با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بررسی شده و پارامترهای تنش محوری، تنش

در فاز مکانیکی در اثر بارگذاری مکانیکی، در سرشمع تنش اصطکاکی ۱۴/۳۵- کیلوپاسکال است که این مقدار با افزایش عمق افزایش یافته و به مقدار ۶۰- کیلوپاسکال در نوک شمع می‌رسد. با اعمال هم‌زمان بارگذاری مکانیکی و حرارتی، شمع در فاز مکانیکی- حرارتی قرار می‌گیرد که با توجه به شکل (۱۱-الف)، میزان تنش اصطکاکی جداره برای سرشمع در حدود ۰/۳۵- کیلوپاسکال است و با افزایش عمق بر میزان این تنش افزوده شده و در نوک شمع به مقدار ۷۰- کیلوپاسکال رسیده است.

تنش اصطکاکی در فاز مکانیکی- حرارتی تا عمق ۱۱ متری کمتر از فاز مکانیکی است و از عمق بیشتر از ۱۱ متر این مسأله برعکس شده است. همچنین با توجه به شکل (۱۱-ب) در فاز سرمایشی با کاهش دمای شمع از ۱۵ به ۲ درجه سانتی‌گراد در فاز سرمایشی تا عمق ۱۱ متری تنش اصطکاکی منفی به وجود آمده است و در عمق‌های بیشتر از ۱۱ متر، تنش اصطکاکی منفی ایجاد شده است. بیشترین تنش اصطکاکی منفی در عمق ۶ متری با میزان ۴/۷- کیلوپاسکال و بیشترین تنش اصطکاکی مثبت در عمق ۱۵ متری است و مقدار ۴+ کیلوپاسکال است.

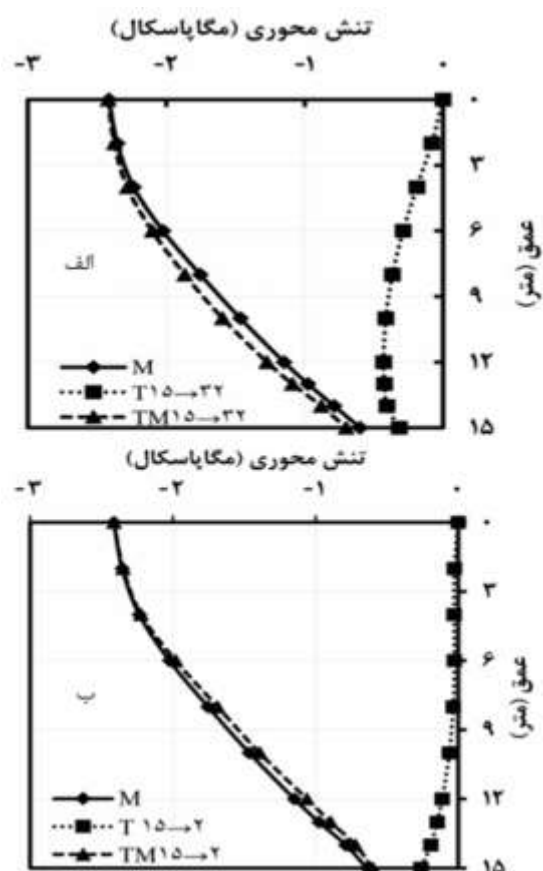


شکل ۱۱- تنش اصطکاکی جداره شمع انرژی در طول شمع:  
(الف) فاز گرمایشی، (ب) فاز سرمایشی

انقباض شمع، تنش‌های کششی در شمع به وجود می‌آید. ملاحظه می‌شود در فاز سرمایشی میزان تنش محوری در سرشمع صفر است که این مقدار با افزایش عمق، افزایش یافته و در نوک شمع به میزان ۰/۲۶- مگاپاسکال رسیده است. با اعمال هم‌زمان بار مکانیکی و دمایی، از تنش محوری شمع کاسته شده و در نوک شمع به مقدار ۰/۶- مگاپاسکال رسیده که در مقایسه با فاز مکانیکی، میزان تنش محوری کمتری در شمع مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج حاصل، با اعمال هم‌زمان بار مکانیکی و کاهش دمای شمع از ۱۵ به ۲ درجه سانتی‌گراد، تنش محوری نسبت به حالت مکانیکی ۶ درصد کاهش یافته است.

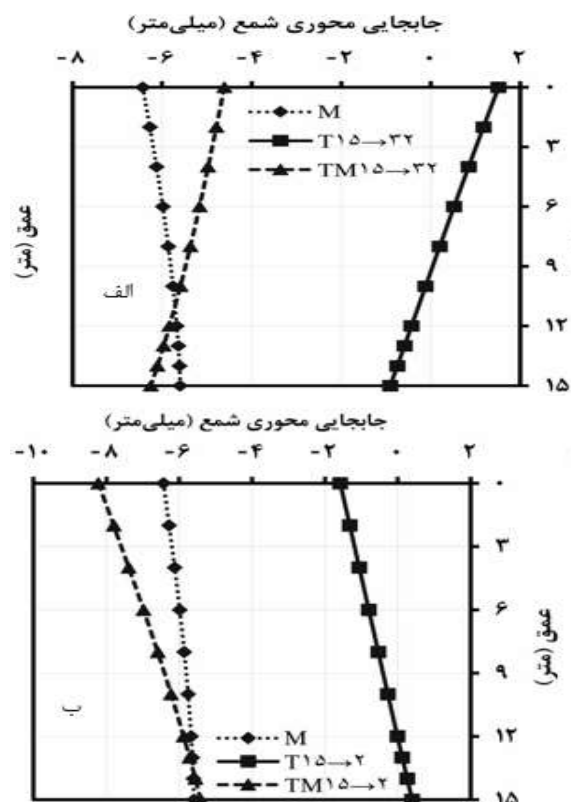
### ۲-۳- تنش اصطکاکی جداره

شکل (۱۱) نمودارهای تنش اصطکاکی جداره شمع انرژی را برای فاز گرمایشی و سرمایشی نشان می‌دهد. در شکل (۱۱-الف) که مبین فاز گرمایشی است، در فاز حرارتی تا عمق ۸ متری شمع، تنش اصطکاکی مثبت به وجود می‌آید و دلیل آن انبساط قسمت فوقانی شمع در اثر افزایش درجه حرارت است که ماکزیمم مقدار آن در عمق ۴ متری بوده و مقدار آن ۴/۳۱+ کیلوپاسکال است.



شکل ۱۰- تنش محوری شمع انرژی در طول شمع:  
(الف) فاز گرمایشی، (ب) فاز سرمایشی





شکل ۱۲- جابه‌جایی محوری شمع انرژی در طول شمع:  
(الف) فاز گرمایشی، (ب) فاز سرمایشی

#### ۴-۳- کرنش محوری شمع انرژی

شکل (۱۳) کرنش محوری شمع انرژی را برای فازهای گرمایشی و سرمایشی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۳-الف) در فاز گرمایشی، کرنش محوری در سرشمع  $17 \times 10^{-5}$  بوده و با افزایش عمق در طول شمع کاهش یافته و به مقدار  $15/7 \times 10^{-5}$  در نوک شمع رسیده است. در فاز مکانیکی، کرنش محوری در سرشمع  $8/77 \times 10^{-5}$  است که با افزایش عمق کاهش یافته و به مقدار  $3/53 \times 10^{-5}$  در نوک شمع رسیده است. در فاز گرمایشی به واسطه افزایش حرارت شمع، کرنش محوری درازای مقادیر مثبتی است. در فاز مکانیکی- حرارتی، کرنش محوری در سرشمع دارای مقدار  $9/01 \times 10^{-5}$  است که این مقدار با افزایش عمق افزایش یافته و به  $12/8 \times 10^{-5}$  در نوک شمع رسیده است. همچنین با توجه به شکل (۱۳-ب) در فاز سرمایشی، میزان کرنش محوری در سرشمع  $13 \times 10^{-5}$  است که این مقدار با افزایش عمق کاهش یافته و به مقدار  $13/5 \times 10^{-5}$  در نوک شمع رسیده است. در فاز مکانیکی مقادیر کرنش محوری در طول شمع نسبت به فاز گرمایشی تغییری نداشته است که این مورد کاملاً بدیهی است. در نهایت در فاز مکانیکی- حرارتی میزان کرنش محوری در سرشمع  $20/9 \times 10^{-5}$  است که این مقدار با افزایش عمق شمع کاهش یافته و به مقدار  $16/9 \times 10^{-5}$  در نوک شمع رسیده است.

با اعمال هم‌زمان بارگذاری دمایی و مکانیکی ملاحظه می‌گردد که در فاز مکانیکی- حرارتی تنش اصطکاکی در سرشمع و نوک شمع به ترتیب ۱۶- و ۶۰- کیلوپاسکال است. با مقایسه نمودارهای فاز سرمایشی ملاحظه می‌شود که در فاز مکانیکی- حرارتی، میزان تنش اصطکاکی تا عمق ۱۱ متری بیشتر از فاز مکانیکی است.

#### ۳-۳- جابه‌جایی محوری شمع انرژی

شکل (۱۲) نمودار جابه‌جایی محوری شمع انرژی را برای فازهای گرمایشی و سرمایشی نشان می‌دهد. شمع در اثر تغییرات دمایی دچار جابه‌جایی در طول بدنه خواهد شد. موقعیت نقطه خنثی تأثیری بسزایی در رفتار اندرکنشی شمع دارد. نقطه خنثی، نقطه‌ای از بدنه شمع است که در اثر بارگذاری دمایی، دارای تغییر مکان صفر است. موقعیت نقطه خنثی در فاز گرمایشی و سرمایشی متفاوت است. به طوری که در فاز گرمایشی این نقطه در عمق ۹ و در فاز سرمایشی در عمق ۱۲/۵ متری قرار دارد. در فاز گرمایشی برای فاز مکانیکی در اثر اعمال بارگذاری مکانیکی، میزان جابه‌جایی در سرشمع  $6/43$ - میلی‌متر است که با افزایش عمق کاهش یافته و به مقدار  $5/6$ - میلی‌متر در نوک شمع رسیده است. با اعمال بار حرارتی خالص به شمع، در اثر انبساط طولی، نقاطی که در عمق کمتری نسبت به نقطه خنثی قرار دارند دارای تغییر مکان مثبت رو به بالا هستند.

همچنین نقاط با عمق بیشتر از نقطه خنثی دارای تغییر مکان منفی و رو به پایین هستند. در فاز حرارتی تغییر مکان سرشمع  $1/52$ + میلی‌متر است که این مقدار در نوک شمع  $0/9$ - میلی‌متر است. در فاز مکانیکی- حرارتی با اعمال هم‌زمان بارگذاری مکانیکی و حرارتی، جابه‌جایی محوری سرشمع و نوک شمع به ترتیب  $4/61$ - و  $6/25$ - میلی‌متر است. با اندکی دقت در نمودار فاز سرمایشی مشاهده می‌شود که میزان جابه‌جایی محوری در فاز مکانیکی- حرارتی تا عمق  $13/5$  متری شمع بیشتر از فاز مکانیکی است. به طور کلی بیشترین جابه‌جایی در فاز گرمایشی مربوط به نوک شمع و در فاز سرمایشی مربوط به سرشمع است. جمع‌بندی موارد بالا حاکی از برقراری اصل سن‌ونان در جابه‌جایی محوری شمع انرژی دارد. به عبارت بهتر می‌توان نتیجه گرفت که شمع انرژی در خصوص جابه‌جایی محوری از اصل سن‌ونان تبعیت می‌کند. هرگاه مقطعی تحت بارگذاری قرار گیرد، توزیع تنش‌ها در فاصله‌ای برابر یا بزرگتر از عرض عضو، همواره یکسان خواهد بود. به عبارت دیگر، به جز در مجاورت نقاط اعمال بارها، توزیع تنش را می‌توان مستقل از مد واقعی اعمال بارها فرض کرد.

به عبارتی با افزایش درجه حرارت شمع، از ظرفیت باربری شمع کاسته شده است. در طی بارگذاری حرارتی شمع منبسط شده و این امر اندرکنش شمع و خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد بارگذاری حرارتی تأثیر بسزایی بر روی تنش محوری و اصطکاک بسیج شده در طول شمع می‌گذارد و از این رو سبب کاهش ظرفیت باربری می‌شود. مقدار این کاهش بستگی به میزان شدت بارگذاری دمایی دارد. در مطالعه حاضر با توجه به نمودار بار-نشست، این کاهش ظرفیت باربری به حدود ۱۱ درصد محدود شده است.

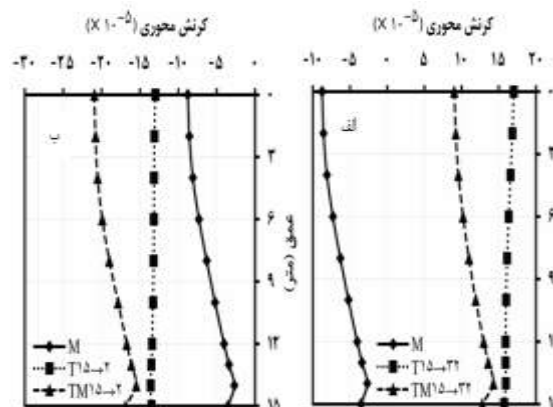
#### ۴- تحلیل حساسیت شمع انرژی

در تحلیل حساسیت به دنبال آن هستیم تا بدانیم تغییر در متغیرهای مستقل در یک محدوده مشخص چگونه می‌تواند بر روی متغیرهای وابسته تأثیر بگذارد. البته ممکن است حالت‌هایی پیش آید که با وجود عدم قطعیت زیاد در یک متغیر، خروجی نهایی تصمیم ما تغییر چندانی نکند. اصطلاحاً در این حالت تصمیم نهایی به آن متغیر حساس نیست. در این بخش تأثیر تغییرات دمای شمع و ضریب انبساط حرارتی خاک بر روی مقادیر تنش محوری و تنش اصطکاکی جداره شمع انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۱- تغییرات دمای شمع

تغییرات دمایی در شمع‌های انرژی سبب بروز انقباض و انبساط حرارتی در شمع می‌شود. در شکل (۱۵) نمودار تنش محوری شمع مدفون در خاک ماسه‌ای طی چهار بازه دمایی مختلف نشان داده شده است. شکل (۱۵-الف) نمودار تنش محوری شمع در خاک ماسه‌ای برای فاز مکانیکی-حرارتی نشان می‌دهد. با توجه خروجی‌های به دست آمده از نرم‌افزار، میانگین بیشترین تغییرات تنش محوری به ازای تغییر دمایی ۵ درجه، در حدود ۳/۸ درصد است.

در شکل (۱۵-ب) بیشترین تغییر تنش محوری در اثر تغییر دمای شمع از ۲۰ به ۲۵ درجه، ۱۸ درصد و از ۳۰ به ۳۵ درجه، ۱۴ درصد است که به‌طور میانگین می‌توان ۱۶ درصد در نظر گرفت. مشاهده می‌شود که افزایش ۱۸ درصدی تنش محوری در فاز مکانیکی مبین این نکته نیست که در فاز مکانیکی-حرارتی نیز همین میزان افزایش را شاهد باشیم. دلیل این مسئله را می‌توان در عملکرد اصطکاکی شمع مورد مطالعه دانست که به دلیل عملکرد اصطکاکی، سهمی از افزایش تنش محوری را به‌دوش می‌کشد.

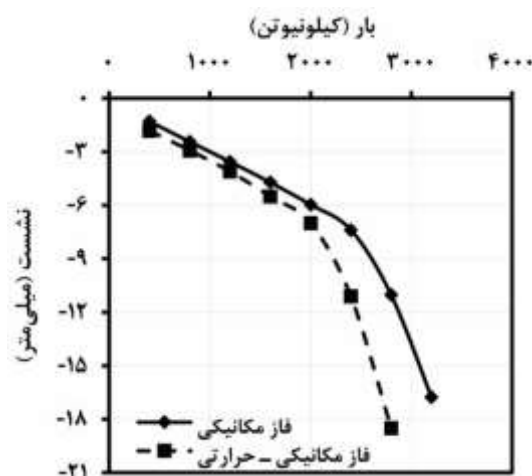


شکل ۱۳- گرنش محوری شمع انرژی در طول شمع (الف) فاز گرمایشی، (ب) فاز سرمایشی

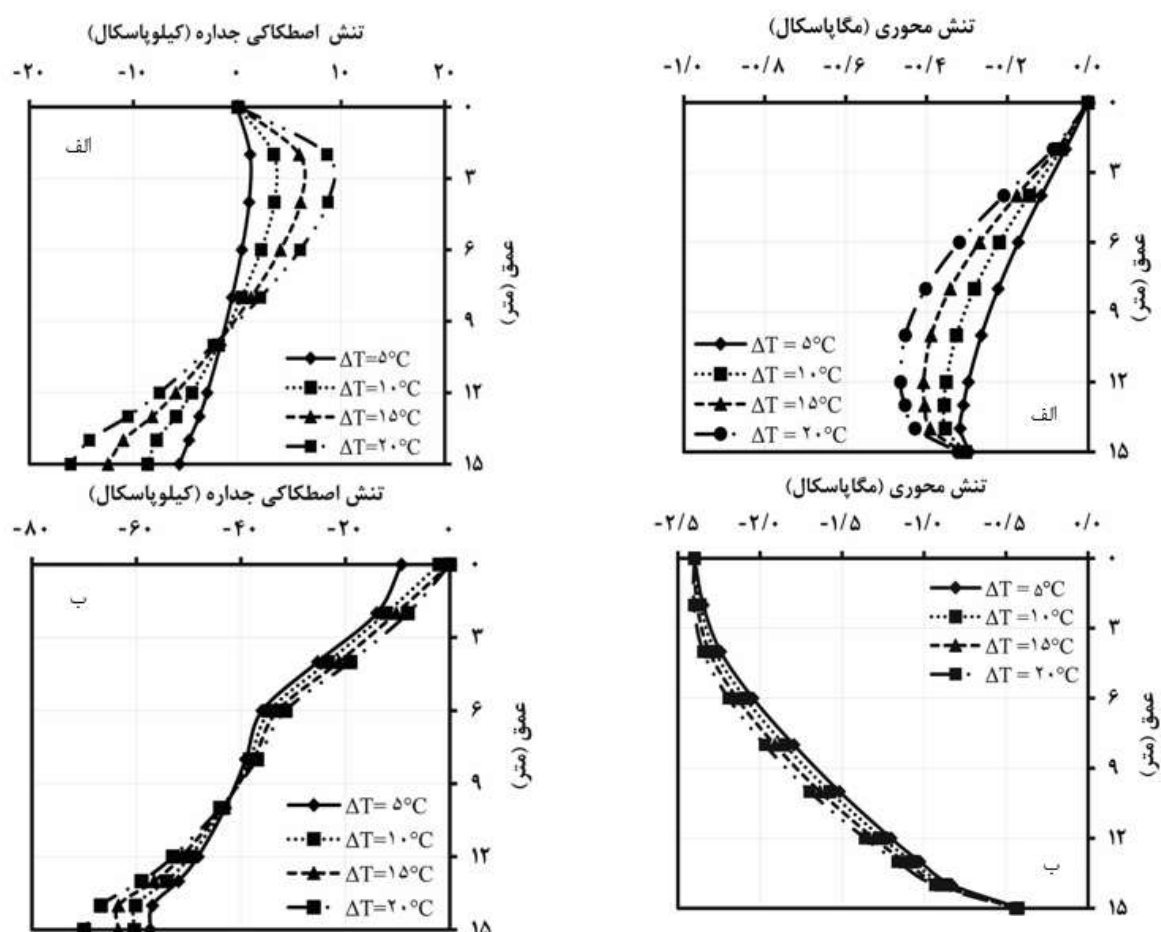
با توجه به کاهش دمای شمع، گرنش محوری در فاز سرمایشی دارای علامت منفی می‌باشد. با جمع‌بندی نتایج حاصل از نمودارهای شکل (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به اثرات یکسان بارگذاری مکانیکی و سرمایشی، فاز سرمایشی به لحاظ بزرگی گرنش محوری دارای حالت بحرانی‌تری است. همچنین در مورد گرنش محوری نیز اصل جمع آثار قوا به وضوح قابل مشاهده است، به طوری که میزان گرنش محوری در فاز مکانیکی-حرارتی با مجموع گرنش‌ها در فاز مکانیکی و فاز حرارتی برابر است. با توجه به نمودار ملاحظه می‌شود که به ازای یک بار مشخص، میزان نشست در شمع انرژی بیشتر از شمع معمولی است.

#### ۳-۵- بار حدی شمع

شکل (۱۴) نمودار بار-نشست شمع را در فاز مکانیکی و مکانیکی-حرارتی نشان می‌دهد. در این نمودار میزان دمای شمع در فاز مکانیکی-حرارتی از ۱۵ به ۳۲ درجه رسانده شده است.



شکل ۱۴- نمودار بار-نشست شمع تحت بارگذاری مکانیکی و حرارتی



شکل ۱۵- تغییرات تنش محوری شمع انرژی دماهای متفاوت:

الف) فاز حرارتی، ب) فاز مکانیکی - حرارتی

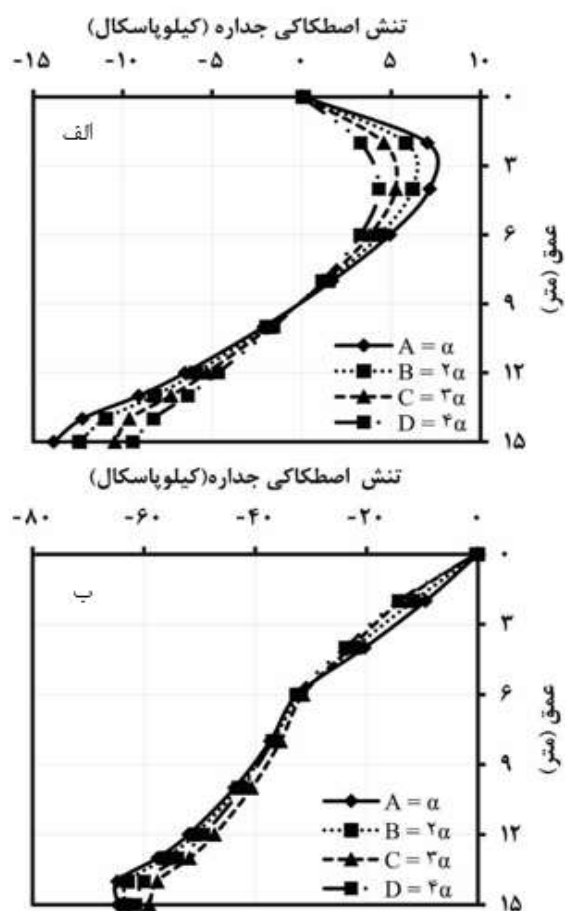
شکل ۱۶- تغییرات تنش اصطکاکی جداره شمع انرژی در دماهای متفاوت: الف) فاز حرارتی، ب) فاز مکانیکی - حرارتی

#### ۴-۲- تغییرات ضریب انبساط حرارتی خاک

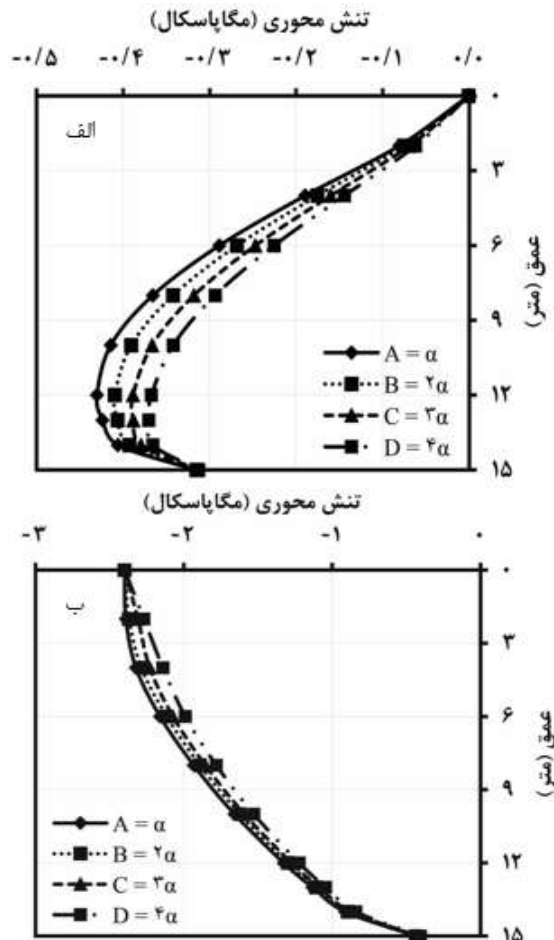
شکل (۱۷) نمودارهای تنش محوری شمع انرژی را در خاک با چهار ضریب انبساط حرارتی مختلف در فازهای حرارتی و مکانیکی - حرارتی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۷-الف) در فاز حرارتی برای یک عمق ثابت ۱۲ متری، میزان تنش محوری در خاک با ضریب انبساط حرارتی  $\alpha$  و  $\alpha_2$  به ترتیب  $+۰/۴۳$  و  $+۰/۳۶۷$  - مگاپاسکال است. به عبارتی با افزایش دو برابری ضریب انبساط حرارتی خاک،  $۱۴/۶۵$  درصد از میزان تنش محوری کاسته خواهد شد. همچنین با توجه به شکل (۱۷-ب)، با افزایش دو برابری ضریب انبساط حرارتی خاک، در همان عمق ۱۲ متری، تنش محوری به میزان  $۲/۲۵$  درصد از میزان تنش محوری شمع کاسته خواهد شد. و در بیان دلیل آن می‌توان گفت که با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک، پتانسیل خاک برای منبسط شدن افزایش می‌یابد. این مسأله بدین معنی است که درگیری شمع و خاک افزایش یافته و سبب افزایش اصطکاک بسیج شده می‌شود و در نهایت از میزان تنش محوری شمع کاسته خواهد شد.

درخصوص تنش اصطکاکی جداره شمع (۱۶) نمودار تنش اصطکاکی جداره شمع انرژی را در چهار دمای مختلف نشان می‌دهد. دمای اولیه شمع ۱۵ درجه سانتی‌گراد است. تحلیل مدل برای فاز حرارتی در دماهای ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه انجام گرفته است. ماکزیمم تنش اصطکاکی جداره شمع برای شمع با دمای ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه به ترتیب  $+۱/۲۵$ ،  $+۳/۵۹$ ،  $+۷/۱۱$  و  $+۹/۷۳$  کیلوپاسکال است.

این در حالی است که بیشترین تنش اصطکاکی جداره منفی مربوط به قسمت انتهایی شمع است که به ترتیب  $-۵/۵۶$ ،  $-۸/۶۲$ ،  $-۱۲/۴$  و  $-۱۶$  کیلوپاسکال است. با بررسی موارد فوق در فاز مکانیکی - حرارتی (شکل ۱۶-ب)) ملاحظه می‌شود که با افزایش دمای شمع از میزان تنش اصطکاکی جداره شمع انرژی در قسمت فوقانی شمع کاسته و در قسمت تحتانی شمع افزایش یافته است منتهی این افزایش تنش چندان زیاد نبوده و ۸ درصد به‌ازای افزایش دمای ۵ درجه‌ای می‌باشد. البته قابل ذکر است که اختلاف تنش اصطکاکی جداره شمع انرژی در قسمت فوقانی شمع در دمای ۲۰ و ۳۵ به‌اندازه ۲۴/۵ درصد است.



شکل ۱۸- تغییرات تنش محوری شمع انرژی در خاک‌های با ضریب انبساط حرارتی متفاوت: الف) فاز حرارتی، ب) فاز مکانیکی - حرارتی



شکل ۱۷- تغییرات تنش محوری شمع انرژی در خاک‌های با ضریب انبساط حرارتی متفاوت: الف) فاز حرارتی، ب) فاز مکانیکی - حرارتی

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل تقارن محور شمع انرژی در خاک ماسه‌ای برای فازهای گرمایشی و سرمایشی توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی گردید. بارگذاری حرارتی برای فاز گرمایشی در بازه زمانی سه ماه از ۱۵ به ۳۲ و برای فاز سرمایشی در همان بازه زمانی از ۱۵ به ۲ درجه سانتی‌گراد اعمال شده و پارامترهای تنش محوری، تنش اصطکاکی، جابه‌جایی محوری، کرنش محوری و بار حادی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تعداد بسیار زیاد پارامترهای دخیل در موضوع، هدف عمده از تحقیق حاضر ارائه یک ارزیابی از میزان کاهش ظرفیت باربری برای شرایط مورد مطالعه بوده است که این امر به یک طراحی اقتصادی و ایمن منجر خواهد شد؛ چرا که از انجام طراحی ژئوتکنیکی شمع‌های انرژی با رویه معمول (طراحی این شمع‌ها مشابه شمع‌های عادی و با اعمال ضرایب اطمینان بزرگ) جلوگیری می‌نماید. مهم‌ترین نتایج حاصل از مطالعه حاضر به شرح ذیل قابل بیان است:

شکل (۱۸) نمودارهای مربوط به تنش اصطکاکی جداره شمع انرژی در خاک با ۴ ضریب انبساط حرارتی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۸-الف)، در فاز حرارتی با افزایش ضریب انبساط حرارتی خاک، تا عمق ۹ متری شمع، به میزان تنش اصطکاکی جداره افزوده شده است. این در حالی است که در عمق‌های بیشتر از ۹ متری تنش اصطکاکی جداره روبه کاهش است. میزان افزایش و کاهش تنش اصطکاکی جداره در قسمت فوقانی و تحتانی شمع یکنواخت نبوده و در بیشترین حالت ۱۳/۴ و ۱۱/۳ درصد است. در فاز مکانیکی - حرارتی، تغییرات مربوط به تنش اصطکاکی جداره چندان زیاد نیست و به حدود ۵ درصد محدود شده است. علت بروز چنین پدیده‌ای را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که در لایه‌های بالایی خاک که وزن لایه‌های خاک کم است، امکان انبساط خاک وجود دارد، لیکن با افزایش عمق، وزن لایه‌های سربار به قدری زیاد است که مانع از انبساط حجمی خاک می‌شود و لذا در قسمت فوقانی شاهد افزایش تنش اصطکاکی و در قسمت تحتانی، کاهش تنش اصطکاکی جداره هستیم.

- L, "Energy and geotechnical behavior of energy piles for different design solutions", *Applied Thermal Engineering*, 2015, 86, 199-213. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.050>.
- Brandl H, "Energy foundations and other thermo-active ground structures", *Geotechnique*, 2006, 56 (2), 81-122. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>.
- Bowles JE, "Foundation analysis and design", McGraw-Hill Co, 4th Edn, New York, USA, 1999.
- Dubey AA, Kumar S, "Assessment of stress-strain behavior of energy piles installed in sand", *International Journal*, 2017, 12 (31), 112-120. <http://dx.doi.org/10.21660/2017.31.6538>
- Gashti EHN, Malaska M, Kujala K, "Evaluation of thermo-mechanical behaviour of composite energy piles during heating/cooling operations", *engineering structures*, 2014, 75, 363-373. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.018>.
- Gray M, "Analysis of geothermal pile foundations under combined axial and moment loading", Doctoral dissertation, Washington State University, 2013. <https://www.irimo.ir>
- Huang X, Wu Y, Peng H, Hao Y, Lu C, "Thermomechanical behavior of energy pile embedded in sandy soil", *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, Volume 2018, Article ID 5341642, 11 pages, <https://doi.org/10.1155/2018/5341642>.
- Jeong S, Lim H, Lee JK, Kim, J, "Thermally induced mechanical response of energy piles in axially loaded pile groups", *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71 (1), 608-615. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.007>.
- Knellwolf C, Peron H, Laloui L, "Geotechnical analysis of heat exchanger piles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137, 890-902. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000513](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000513).
- Laloui L, Nuth M, Vulliet L, "Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, 30 (8), 763-781. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100191-2.00016-2>.
- Lee S, "Energy Piles-Piles as heat exchangers", Presentation Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, 11th December, 2009.
- Loria AFR, Gunawan A, Shi C, Laloui L, Ng CW, "Numerical modelling of energy piles in saturated sand subjected to thermo-mechanical loads", *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2015, 1,1-15. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2015.03.002>.
- Mimouni T, Laloui L, "Towards a secure basis for the design of geothermal piles", *Acta Geotechnica*, 2014, 9 (3), 355-366. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0245-4>.
- Ministry of Roads and Urban Development, "The role of new cities in optimizing the country's fuel consumption (housing and energy saving)", New Towns Organization, Housing Development Office, 2014.
- الف) در شمع اصطکاکی با افزایش دمای شمع انرژی از ۱۵ به ۳۲ درجه، تنش محوری شمع به‌طور میانگین ۱۱ درصد افزایش می‌یابد. در اثر اعمال بارگذاری دمایی، میزان ظرفیت باربری شمع در حدود ۱۱ درصد کاهش می‌یابد.
- ب) شمع‌های انرژی در طی بارگذاری حرارتی دچار تغییراتی در میزان تنش اصطکاکی جداره شمع می‌شود. در بارگذاری گرمایشی از تراز صفر تا نقطه خنثی شاهد کاهش تنش و در عمق‌های بیشتر از نقطه خنثی، افزایش آن هستیم.
- پ) جابه‌جایی و کرنش محوری شمع انرژی از اصل جمع آثار قوا تبعیت می‌کند.
- ت) با توجه به نتایج به‌دست آمده از نمودار بار-نشست شمع در خاک می‌توان نتیجه گرفت که ظرفیت باربری شمع انرژی با افزایش دما، کاهش می‌یابد.
- ث) شمع‌های انرژی در خاک‌های با ضریب انبساط حرارتی بالاتر، عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهند.
- ج) افزایش و کاهش تنش اصطکاکی جداره شمع انرژی بستگی به موقعیت نقطه خنثی دارد. در عمق‌های کمتر از نقطه خنثی، میزان تنش اصطکاکی جداره با افزایش دما کاهش و در عمق‌های بیشتر افزایش می‌یابد.

## ۷- مراجع

- احمدی م م، کشمیری ا، "مقایسه آیین‌نامه‌های مختلف برای تعیین ظرفیت باربری محوری شمع‌ها"، *مهندسی عمران شریف*، ۱۳۹۵، ۳۲ (۲)، ۱۳۱-۱۳۸.
- رزم‌خواه شربیانی ط، "آنالیز عددی حرارتی- مکانیکی شمع‌های حرارتی به‌صورت تکی و در گروه شمع"، *پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف*، ۱۳۹۵.
- شوش‌پاشا ع، سعیدی ب، "ارزیابی مقاومت اصطکاکی شمع و پارامترهای مؤثر بر آن در خاک ماسه‌ای با استفاده از آزمایش بارگذاری"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز*، ۱۳۹۵، ۴۶ (۳)، ۳۹-۵۰. <https://doi.org/10.22034/JCEE.2019.9256>
- مکارچیان م، متینی ع، قلی‌پور س، "بررسی آزمایشگاهی رفتار بار- تغییر مکان شمع‌های پافیلی تحت بارهای کششی مایل در خاک ماسه‌ای"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز*، ۱۴۰۰، ۵۱ (۱)، ۹۹-۱۰۹. <https://doi.org/10.22034/JCEE.2019.9253>
- Akrouh GA, "Energy piles in cooling dominated climates", Ph.D. Thesis, Texas A&M University, USA 2014.
- Assuncao RM, "Thermal and thermal-mechanical analysis of thermo-active pile foundations", PhD diss, MSc thesis, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Lisbon, Portugal, 2014.
- Batini N, Rotta Loria A, Conti P, Testi D, Grassi W, Laloui

- Olgun CG, "Energy piles: background and geotechnical engineering concepts", In Proceedings of the 16th Annual George F. Sowers Symposium, Atlanta, GA, USA, vol. 7, 2013.
- Peron H, Knellwolf C, Laloui L, "A method for the geotechnical design of heat exchanger piles", Geotechnical Special Publication, ASCE, Geo-Frontiers, 2011, 470-479. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)49](https://doi.org/10.1061/41165(397)49).
- Qi H, Zhou Y, Zhang ZH, Wang B, Zhang Y, Cui H, Wang X, "Heat transfer performance in energy piles in urban areas: case studies for lambeth college and shell centre UK", Appl. Sci., 2020, 10, 5974, <https://doi.org/10.3390/app10175974>.
- Saggu R, Chakraborty T, "Cyclic thermo-mechanical analysis of energy piles in sand", Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33 (2), 321-342. <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9798-8>.
- Suryatriyastuti ME, Mroueh H, Burlon S, "Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16 (5), 3344-3354. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.062>.
- Tiwari R, Jain S, Chakraborty T, Matsagar V, "Dynamic response of reinforced concrete sacrificial walls under blast loading", In: Proceedings of the 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2012), São Paulo, Brazil, July 8-13, 2012.
- Yang W, Yang B, Wang F, Jing N, "Numerical evaluations on the effects of thermal properties on the thermo-mechanical behaviour of a phase change concrete energy pile", Energy and Built Environment, Available online 9 June 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.05.008>.
- Wang D, Lu L, Cui P, "Simulation of thermo-mechanical performance of pile geothermal heat exchanger (PGHE) considering temperature-depend interface behavior", Applied Thermal Engineering, 2018, 139, 356-366. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.02.020>.
- Wang J, Li Z, "Experimental study of thermal response of vertically loaded energy pipe pile", Sustainability, 2021, 13, 7411. <https://doi.org/10.3390/su13137411>.
- Wang Z, Fang P, Wang K, Zhang R, Li F, "Interactions between energy piles caused by temperature", Geotechnical Research, 2019, 6 (3), 218-226. <https://doi.org/10.1680/jgere.18.00042>.

## EXTENDED ABSTRACT

# Thermo-Mechanical Behavior Analysis of Heat Exchanger Piles by Numerical Modelling

Mohammad Reza Jodairi, Amir Hassan Rezaei-farei<sup>\*</sup>, Hamed Farshbaf

Faculty of Engineering, Shahid Madani University of Azerbaijan, Tabriz 5375171379, Iran

**Received:** 24 July 2021; **Review:** 13 October 2021; **Accepted:** 30 October 2021

---

### Keywords:

Energy pile, Axial stress, Skin frictional stress, Axial displacement and strain, Limit load.

---

## 1. Introduction

Using renewable energy sources instead of fossil fuels is a fundamental way to reduce environmental pollution caused by greenhouse gases. Geothermal energy is available all over the world and has an important role in the supply of renewable energy. In order to collect geothermal energy various heat exchanger systems have been developed in recent years that thermal activated piles (energy piles) are one most of them. Reinforced concrete piles have been widely used as a geothermal heat exchanger to access the relatively constant temperature of the ground for efficient heating and cooling of buildings. Energy piles are heat capacity systems that have been increasingly exploited to provide both supplies of energy and structural support to civil structures (Batini et al., 2015). Concrete has a good thermal conductivity and thermal storage capacity, which makes it an ideal medium as an energy absorber (heat exchanger). To use these properties for energy foundations, high-density polyethylene plastic pipes have to be installed within the concrete. The plastic piping can be fixed to the reinforcement cages of the energy foundation in a plant or on the site (Fig. 1).



**Fig. 1.** Absorber pipes fitted to the reinforcement cage of a large-diameter bored energy pile (Brandl, 2006)

---

<sup>\*</sup> Corresponding Author

*E-mail addresses:* jodairi@azaruniv.ac.ir (Mohammad Reza Jodairi), rezaei.ah@azaruniv.ac.ir (Amir Hassan Rezaei-farei), h.farshbaf@azaruniv.ac.ir (Hamed Farshbaf).

## 2. Methodology

There are three major ways to analyze the behavior of geothermal piles, as following: Full scale In-situ tests; Laboratory scale and centrifuge modelling; and Numerical Simulation and Analysis (Dubey and Kumar, 2017). In this paper, the geotechnical challenges of the energy pile and the thermo mechanical behavior of this system were investigated using the finite element software ABAQUS (V.6.14). Fig. 2 displays geometry of pile and soil and the Finite Element mesh for present simulation. The resulting soil-structure interaction is investigated through these analyses. The stress-strain response of sand is simulated herein using the Mohr-Coulomb constitutive model. Mechanical behavior of energy piles is simulated using the concrete damage plasticity model. This study focuses on investigating the impact that different magnitudes and combinations of thermal and axial mechanical loads have on the mechanical behavior of energy piles in dry sand. The thermal load was applied on the pile as a temperature change of  $15^{\circ}\text{--}32^{\circ}(\Delta T=17^{\circ}\text{C})$ .

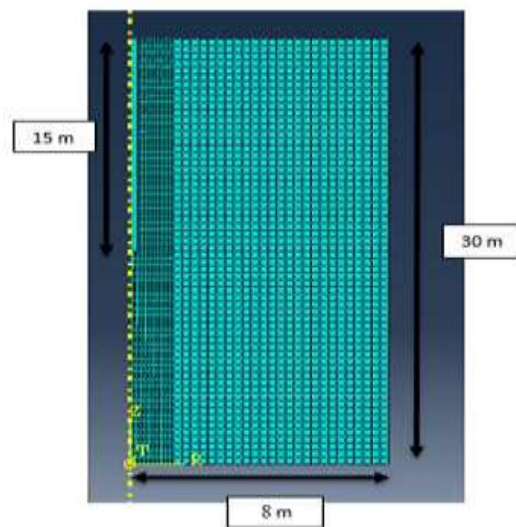


Fig. 2. Geometry of the pile and soil domain and the used finite element mesh

## 3. Results and discussion

Due to the application of the pile's thermal loading, the pile's resistance parameters are changed. In this paper, the effects of temperature changes on the axial stress, shaft friction stress, axial displacement, axial strain, and the limit load of energy piles are carried out and sensitivity analysis for understanding the behavior of energy piles in the different thermal and physical characteristics of sand were carried out. The results of numerical modeling show that, due to the application of temperature loading, the amount of bearing capacity of the pile is reduced by about 11%. In addition, the thermal properties of the soil have a profound effect on thermal and geotechnical performance.

## 4. References

- Batini N, Rotta Loria A, Conti P, Testi D, Grassi W, Laloui L, "Energy and geotechnical behavior of energy piles for different design solutions", *Applied Thermal Engineering*, 2015, 86, 199-213. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.050>.
- Brandl H, "Energy foundations and other thermo-active ground structures", *Geotechnique*, 2006, 56 (2), 81-122. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>.
- Dubey AA, Kumar S, "Assessment of stress-strain behavior of energy piles installed in sand", *International Journal of Geomate*, 2017, 12 (31), 112-120. DOI: <http://dx.doi.org/10.21660/2017.31.6538>.