

بررسی اثرات بارگذاری حرارتی بر روی شمع زمین گرمایی در خاک های لایه بندی شده

مسعود عامل سخی*^۱، فاطمه شش پری^۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۳۱

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۰

چکیده

شمع انرژی نوعی از فونداسیون است که به طور همزمان دو هدف انتقال بار سازه و تبدیل انرژی را تامین می نماید. این سیستم علاوه بر اینکه بار سازه ای ساختمان را به لایه های زیرین منتقل می کند، به عنوان یک مبدل حرارتی نیز عمل می نماید. در مقاله حاضر برای بررسی اثر خاک و شمع زمین گرمایی بر یکدیگر، مدل سازی عددی به روش المان محدود با استفاده از نرم افزار Comsol صورت گرفته است. هدف اصلی از این مطالعه بررسی پاسخ شمع زمین گرمایی در خاک های دارای لایه بندی و مقایسه آن با شمع زمین گرمایی اجرا شده در خاک همگن می باشد. این مساله با در نظر گرفتن لایه های خاک مختلف که روی سنگ بستر قرار دارند، صورت پذیرفته است و نتایج حاصل از آن با نتایج داده های تجربی شمع زمین گرمایی قرار گرفته در خاک دارای لایه بندی مقایسه شده است. نتایج نشان داد که خصوصیات خاک ها و محل قرارگیری لایه های سست و متراکم در عمق خاک، تاثیر بسزایی در نوع رفتار شمع دارد، به طوریکه تغییر شکلها و تنشهای بدست آمده از تحلیلهای عددی با مقدار مدول الاستیسیته و به عبارت دیگر با سختی خاک در بردارنده شمع تناسب داشته است. به عنوان نمونه، مشخص گردید که مقدار کرنش بدست آمده از تحلیلهای عددی شمع قرار گرفته در خاک چند لایه، بین مقادیر کرنشهای شمع در حالتی که خاک همگن صرفا سست یا متراکم باشد، قرار می گیرد.

کلید واژه ها: زمین گرمایی، شمع، انرژی تجدید پذیر، المان محدود.

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم mamelsakhi@yahoo.com

۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران-ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم F_sheshpari@yahoo.com

۱. مقدمه

باتوجه به افزایش روزافزون جمعیت، تقاضای استفاده از منابع انرژی به سرعت در حال افزایش است. به همین دلیل سوخت-های فسیلی بیش از حد معمول مورد بهره برداری قرار می-گیرند. بنابراین برای کاهش اثر گازهای گلخانه‌ای نیازمند تغییر روند استفاده از انرژی‌های متعارف به منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشیم. انرژی گرمایی بسیاری درون هسته زمین محبوس می‌باشد. اگر این انرژی به شکل موثر مورد بهره برداری قرار بگیرد، برای توسعه پایدار کشور در آینده کفایت خواهد کرد. انرژی زمین گرمایی یکی از منابع انرژی دوستدار محیط زیست می‌باشد. پیشرفت‌های اخیر علم، نرخ بالای انرژی‌ها و مشکلات ناشی از واردات و صادرات سوخت‌های فسیلی باعث شده تا انرژی زمین گرمایی مورد توجه ویژه ای قرار گیرد. مبدل‌های حرارتی از انرژی سطحی زمین گرمایی استفاده می‌کند تا گرما و سرمای ساختمان را تامین کند. با استفاده از این مدل انرژی سبز و تجدیدپذیر، هزینه‌های ساختمان در بلندمدت و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. بیشترین میزان مصرف انرژی درون ساختمان صرف حفظ دمای آسایش می‌گردد. یک طراحی بادوام سازه می‌تواند با ترکیب دو مورد اصلی، این مصرف انرژی را تا حد بسیار زیادی کاهش دهد؛ یکی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تامین اکثر نیازهای انرژی و دیگری یک طرح خوب حرارتی برای تقلیل نیازها با کاهش میزان تبادل حرارت ساختمان و محیط خارجی. از لحاظ اقتصادی استفاده از این روش برای تامین حرارت ساختمان‌ها و اماکن مسکونی نسبت به روش‌هایی که از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند، مقرون به صرفه تر است. بنابراین می‌توان تا حد زیادی از آلودگی‌های ناشی از مصرف دیگر سوخت‌ها که منجر به تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، جلوگیری کرد. فونداسیون‌های انرژی از اساسی ترین المان‌های سازه ای استفاده می‌کنند و آنها را با مکانیزم انتقال انرژی زمین گرمایی ترکیب می‌کنند. شمع‌های زمین گرمایی که به آنها شمع‌های انرژی یا جاذب حرارتی نیز اطلاق می-

گردد نوعی از فونداسیون انرژی هستند که از انرژی زمین گرمایی زیرزمینی برای سرمایش و گرمایش ساختمان بهره می‌برد. اولین شمع‌های زمین گرمایی در اوایل دهه ۱۹۸۰ در اتریش ساخته شد. تفاوت بین شمع‌های متداول و شمع‌های زمین گرمایی لوله‌های پلی اتیلنی با چگالی زیاد (HDPE; High Density Poly Ethylene) است که داخل شمع نصب می‌شود و سیال انتقال دهنده گرما در آنها جریان دارد. سیال به سیستم پمپ حرارتی متصل می‌گردد که داخل ساختمان نصب شده است و برای گرمایش و سرمایش بنا به کار می-رود.

باتوجه به تحقیقات صورت گرفته در اقصی نقاط دنیا، رفتار مکانیکی- حرارتی شمع‌های انرژی توسط آزمایش‌های صحرائی و سانتریفیوژ مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله مطالعات می‌توان به آزمایش لویی و همکاران (Laloui, L., et al., 2006) اشاره کرد که در مقیاس واقعی صورت گرفته است. در این آزمایش مشاهده شد که تنش محوری ناشی از دمای وارد به شمع در مقایسه با تنش حاصل از بارگذاری مکانیکی دارای مقدار بیشتری می‌باشد. مکارتنی و همکارانش (McCartney et al., 2010) یک مدل آزمایش سانتریفیوژ از فونداسیون‌های دمافعال انجام دادند که در آن، فونداسیون موردنظر تا دمای ۶۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شد و پس از آن تا دمای ۲۵ درجه سانتی گراد پایین آورده شد. نتایج نشان دهنده افزایش میزان ظرفیت و مقاومت شمع در طول گرمایش بود. در سال ۲۰۱۱ آنالیزی بر روی اثر همزمان بارگذاری مکانیکی- حرارتی بر روی یک مدل آزمایشگاهی شمع زمین گرمایی توسط ونگ و همکارانش (Wang et al., 2011) صورت گرفت. هدف از این آزمایش بررسی میزان تغییرات ظرفیت باری بود. آنها گزارش کردند که دما یکی از عوامل مهمی است که روی ظرفیت باربری شمع‌ها اثر می-گذارد. بوداس فریتاس (Bodas Freitas et al., 2013) یک مدل عددی متقارن در نرم افزار المان محدود آدینا (ADINA) ایجاد کرد. وی با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای ضریب انبساط حرارتی حجمی بتن به ارزیابی اثر رابطه بین ضریب

اطراف آن صورت گرفت. این مطالعه نشان داد که تنش اصطکاک جانبی در فصل مشترک خاک و شمع در لایه‌های مختلف خاک تغییر می‌کند. این مساله نشان دهنده این است که نیروی جانبی تحت تاثیر خصوصیات خاک می‌باشد. به منظور آنالیز رفتار طولانی مدت شمع انرژی، یک مدل آزمایشگاهی از آن در سال ۲۰۱۷ داخل خاک ماسه خشک ساخته شد و علاوه بر بار مکانیکی تحت سی سیکل از بار حرارتی گرمایشی / سرمایشی قرار گرفت. این آزمایش نشان داد که با افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی میزان نیروی محوری شمع نیز افزایش می‌یابد. در این آزمایش اولین چرخه حرارتی باعث ایجاد بیشترین مقدار نشست شمع گردید درحالیکه با افزایش میزان چرخه‌ها این مقدار به تدریج کاهش یافت. یک مطالعه مروری نیز بر روی رفتار شمع زمین گرمایی و عملکرد مکانیکی - حرارتی آن در سال ۱۳۹۷ انجام شد (شش پری و عامل سخی، ۱۳۹۷). در سال ۲۰۱۸ گائو (Guo et al., 2018) یک مطالعه عددی بر روی عملکرد حرارتی شمع انرژی در درازمدت واقع در خاک چندلایه انجام داد. وی نشان داد که مرزهای حرارتی در درازمدت نسبت به ناهمگنی خاک اثر ویژه‌ای بر روی دما خاک دارد. در سال ۲۰۱۸ سانی (Sani et al., 2018) با هدف بررسی پاسخ خاک‌های غیراشباع به بارگذاری گرمایشی، یک مدل‌سازی دو بعدی المان محدود انجام داد. وی گزارش کرد که هرچه خاک بیشتر اشباع گردد، مقدار دمای خاک به همان نسبت کاهش می‌یابد. شش پری و عامل سخی در سال ۲۰۲۱ یک مطالعه عددی - تحلیلی بر روی شمع انرژی انجام دادند. کرنشهای حاصل از تحلیل ترموالاستیک بوده است و مقدار آن بستگی به خاک اطراف شمع دارد. بار حرارتی، باعث ایجاد تنشهای محوری بزرگتری نسبت به تنش محوری حاصل از بار وزن ساختمان شده است.

باتوجه به اهداف دوگانه ای که در پی ساخت شمع‌های انرژی وجود دارد، این شمع‌ها به طور همزمان تحت دو نوع بارگذاری متفاوت از جمله بار مکانیکی و بار حرارتی قرار دارند و این مساله روی جابجایی و تنش و کرنش‌های حاصله

انبساط حرارتی حجمی خاک و شمع پرداخت. گوود و همکارانش (Goode JC III et al., 2014) یک آزمایش سانتیفیوژ روی شمع انرژی واقع در خاک ماسه انجام دادند. نتیجه ملاحظات آنها مبتنی بر بالآمدگی سر شمع و کرنش محوری حرارتی شمع به دلیل گرم شدن آن بود. دوپری (Dupray, F et al., 2014) برای بررسی رفتار مکانیکی - هیدرولیکی - حرارتی شمع انرژی یک آنالیز مولتی فیزیک المان محدود انجام داد و اظهار داشت که دوره‌های گرمایش - سرمایش اثر مهمی روی تغییرات فشار آب حفره ای در خاک‌های با نفوذپذیری کم دارد. هاستن (Houston) در سال ۲۰۱۵ با انجام مطالعه بر روی نشست‌های ناشی از حرارت شمع‌های انرژی درون خاک غیراشباع نشان داد که مکش خاک، تنش نرمال خالص و دما کلیدی ترین موارد تخمین میزان نشست هستند. ساگو (Saggu) در سال ۲۰۱۵ رفتار شمع اتکایی و اصطکاک را در خاک ماسه ای سست و متراکم تحت سیکل‌های حرارتی متنوع با شبیه سازی در محیط المان محدود مورد بررسی قرار داد. نتایج وی نشان داد که حتی پس از سرد شدن تصاعدی شمع بعد از سیکل‌های مختلف حرارتی، تنش محوری در طول شمع تمایل به زیاد شدن دارد که دلیل اصلی آن، اختلاف اتساع بین شمع و خاک در طول بارگذاری حرارتی می‌باشد. در سال ۲۰۱۶ یک شمع انرژی با قطر ۱ متر و طول ۲۰ متر که در ماسه اشباع قرار داشت با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس مدل سازی شد که در آن اثر چگالی ماسه، قطر و طول شمع روی تغییر تنش افقی شمع انرژی تحلیل شد. پنجاه سیکل حرارتی با چهار دامنه مختلف از چرخه دمایی (بین 5 تا 20 °C) در نظر گرفته شد. تحلیل‌ها نشان داد که اثر چگالی اولیه ماسه در برابر افت نهایی تنش افقی بعد از پنجاه چرخه حرارتی، ناچیز است. همچنین نشان داد که افزایش طول شمع با ثابت ماندن نسبت طول به قطر، همان میزان افت تنش افقی را نتیجه می‌دهد. اما اگر قطر شمع ثابت بماند، افزایش طول شمع منجر به کاهش افت تنش افقی می‌شود. در سال ۲۰۱۷ یک مطالعه عددی و تحلیلی برای آنالیز اندرکنش شمع انرژی و خاک

تأثیر می‌گذارد. در نتیجه اثرات این بارهای مضاعف حرارتی باید در طراحی شمع‌های انرژی در نظر گرفته شود و آن نیازمند شناخت کامل از رفتار مکانیکی-حرارتی شمع‌های مبدل حرارتی می‌باشد.

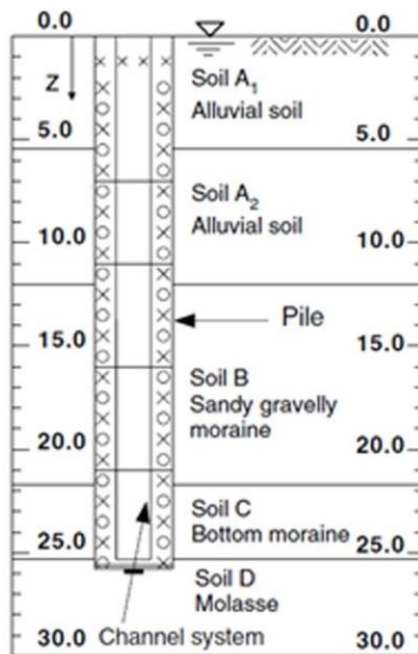
به همین منظور در مطالعه حاضر تمرکز اصلی روی مساله شناخت و بررسی پاسخ حرارتی شمع انرژی درون خاک‌های متفاوت می‌باشد. این مطالعه براساس مجموعه ای از نتایج تجربی می‌باشد که در یک ساختمان چهار طبقه واقع در لوزان سوییس صورت گرفته و گزارش شده است. نمای شماتیک از پروفیل واقعی خاک در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساختار شامل یک خاک چهار لایه است که روی سنگ بستر واقع گردیده است. برای بررسی دقیق تر اثر حرارت روی خاک، هر لایه از آن پروفیل خاک به صورت تکی در مدلسازی لحاظ گردیده است. نتایج عددی محاسبات با نتایج داده‌های آزمایش اصلی مقایسه شده است.

۲. مشخصات تجربی شمع انرژی

بر اساس گزارش لویی آزمایش صورت گرفته در لوزان شامل یک ساختمان چهار طبقه با ۹۷ عدد شمع ۲۶ متری با قطر ۱ متر بود. سطح آب زیرزمینی تقریباً منطبق بر سطح زمین است. شمع زمین گرمایی موردنظر تحت یک سیکل گرمایش و سرمایش قرار گرفته است. در این آزمایش دمای اعمال شده به شمع در تمام طول شمع یکسان در نظر گرفته شده است. مقدار دمای اعمال شده به شمع در زمان‌های مختلف در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱. دمای اعمال شده به شمع

Temperature(°c)	Time(day)
0	0
2	5
21	12
10	15
3	28



شکل ۱. تصویر پروفیل خاک در محل آزمایش در لوزان

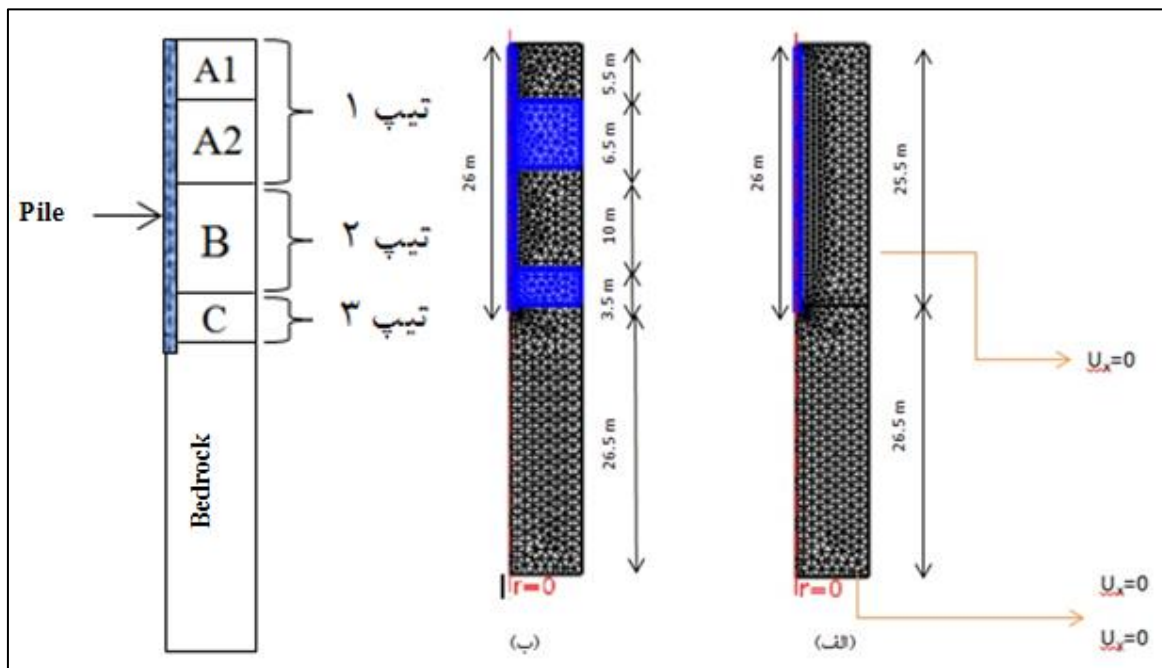
تجربه نشان داده است که این روش نتایج مناسبی را مطابق با نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های فیزیکی ارائه می‌کند. در این مطالعه برای مدلسازی رفتار حرارتی-هیدرولیکی-مکانیکی (THM; Thermo-Hydro-Mechanical) از نرم افزار مولتی

۳. مدل المان محدود

روش المان محدود یکی از راه‌های معمول و قدرتمند برای بررسی رفتار مکانیکی-حرارتی شمع انرژی است. همچنین

شکل ۲ نشان داده شده است شعاع شمع ۰/۵ متر و طول آن ۲۶ متر است و کل ارتفاع مش ۵۲ متر منظور شده است. شکل الف مدل عددی خاک تک لایه و همگن است که روی سنگ بستر قرار دارد و شکل ب حالت خاک چندلایه است که مطابق با مدل صحت سنجی شده می باشد.

فیزیک COMSOL 5.3 استفاده شده است. این نرم افزار علاوه بر اینکه دارای ماژول های مختلف از قبیل مکانیک سازه، انتقال حرارت، جریان سیال و... می باشد و قادر به کوپل کردن آنهاست؛ همچنین به کاربر این اجازه را می دهد تا با وارد کردن متغیرهای مدنظر آن ماژول ها را مطابق با مساله موردنظر ویرایش نماید. هندسه این مدل به دلیل مقطع دایره ای شکل شمع و خصوصیات یکسان چینه شناسی به صورت متقارن محوری در نظر گرفته شده است. همانطور که در



شکل ۲. هندسه مدل، ابعاد آن و شرایط مرزی

شمع وارد شده است. در این حالت به مدل اجازه تبادل حرارت از مرز خارجی داده شده است.

۴. آثار بارگذاری های مختلف وارد بر شمع

پاسخ شمع انرژی به بارگذاری مکانیکی و حرارتی پیچیده است. اگرچه با نگاه اولیه ی جداگانه و اختصاصی به هر مولفه، درک اثر ترکیبی هر دو مکانیزم آسانتر میشود.

در این مدل عددی شرایط مرزی مکانیکی به نحوی است که مرز قائم سمت راست صرفاً آزادی حرکت در جهت عمودی را دارد حال آنکه مرز زیرین قادر به هیچ گونه جابجایی نمی باشد. این مدل از بالا کاملاً آزاد است و مرز سمت چپ نیز به عنوان محور تقارن در نظر گرفته شده است. سطح تماس بین بدنه شمع و خاک کاملاً سخت و ناصاف در نظر گرفته شده است. این موضوع بیانگر این است که هیچ گونه حرکت نسبی بین شمع و خاک وجود ندارد. از مرزهای بالایی و سمت راست نیز اجازه زهکشی داده شده است. بارگذاری حرارتی با اعمال تغییرات دمایی مطابق با آنچه در جدول ۱ ذکر شد، بر

$$P_{Total} = P_M + P_T$$

فرمول زیر جهت محاسبه انتقال حرارت به کار میرود:

(۴)

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (q + q_r) =$$

$$\alpha_p T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p \right) + \tau : \nabla u + Q$$

که در آن؛

ρ چگالی (kg/m³)

C_p ظرفیت حرارتی ویژه (J/kg K)

T دما (K)

u بردار سرعت در حرکت انتقالی (m/s)

q شار حرارت در رسانش (W/m²)

q_r شار حرارت در تابش (W/m²)

α ضریب انبساط حرارتی (1/K)

Q منابع حرارتی اضافه (W/m³)

میباشد.

۴. مشخصات مصالح

خصوصیات مصالحی که در این مدل به صورت ترمو-

الاستیک خطی مدلسازی شده اند مطابق با لویی می باشد [۲].

با استفاده از معادلات (۵) و (۶)، مدول بالک و مدول برشی

به مدول الاستیسیته و نسبت پواسون تبدیل شده اند. ظرفیت

حرارتی برای تمام لایه های خاک برابر $2.4 \times 10^6 \text{ J/m}^3 / ^\circ\text{C}$

و برای سنگ بستر و شمع بتنی برابر $2 \times 10^6 \text{ J/m}^3 / ^\circ\text{C}$

می باشد. این در حالی است که هدایت حرارتی برای خاکها

$1.8 \text{ W/m} / ^\circ\text{C}$ ، برای سنگ بستر $1.1 \text{ W/m} / ^\circ\text{C}$ و

برای شمع انرژی $2.1 \text{ W/m} / ^\circ\text{C}$ در نظر گرفته شده است.

سایر مشخصات در جدول ۲ گزارش شده است.

(۵)

$$E = \frac{9KG}{3K + G}$$

(۶)

الف) صرفا بارگذاری مکانیکی: ابتدا شمع را فقط تحت بار محوری در نظر بگیرد. بار از پنجه شمع یا در امتداد طول آن و یا ترکیبی از هر دو به خاک اطراف منتقل میشود. نحوه توزیع بار بین بدنه یا نوک شمع بسیار متأثر از خصوصیات خاک میباشد. بزرگی و مقدار نیروها بعد از چینه شناسی خاک قابل ارزیابی و برآورد است. بار مکانیکی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه میگردد:

(۱)

$$P_M = E_p A_p \epsilon_M$$

که در آن:

P_M بار مکانیکی

E_p شمع یا ننگ مدول

A_p سطح مقطع شمع

ϵ_M کرنش مکانیکی شمع

میباشد.

ب) صرفا بارگذاری حرارتی: کرنشهای حرارتی مهار شده باعث ظهور تنشها در داخل شمع میشوند. این کرنشها مستقیما وابسته به تغییرات دمایی شمع هستند. اگر شمع مهار شده باشد و تحت تغییرات دمایی مثبت (گرمایش) قرار بگیرد، دچار انبساط میشود و در نتیجه تنشهای فشاری خواهد داشت. به طور مشابه در اثر سرمایش تنش کششی به وجود خواهد آمد. کرنشهای حرارتی مهار شده مطابق رابطه زیر منجر به ایجاد بار حرارتی میگردد:

(۲)

$$P_T = E_p A_p \epsilon_{T-Rstr} = E_p A_p (\Delta T - \epsilon_{T-Obs})$$

که در آن:

ϵ_{T-Obs} کرنش ناشی از بار حرارتی

ϵ_{T-Rstr} کرنش گیرداری

است.

ج) ترکیب بارگذاری مکانیکی حرارتی: اکنون اثر مرکب

هر دو بارگذاری مکانیکی و حرارتی را در نظر بگیرید. اگر

تغییر دما نیز علاوه بر بار محوری بر سرشمع وارد شود، بار

نهایی به صورت زیر تخمین زده میشود:

(۳)

متوسط و خاک تیپ ۳ که همان لایه C می باشد را متراکم قلمداد نمود و نتایج بر این اساس تحلیل گردیده اند.

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1$$

باتوجه به مشخصات داده شده، به صورت نسبی می توان بین خاکهای ارائه شده، خاک همگن تیپ ۱ که شامل A1 و A2 می باشد را خاک سست، خاک تیپ ۲ و یا همان لایه B را

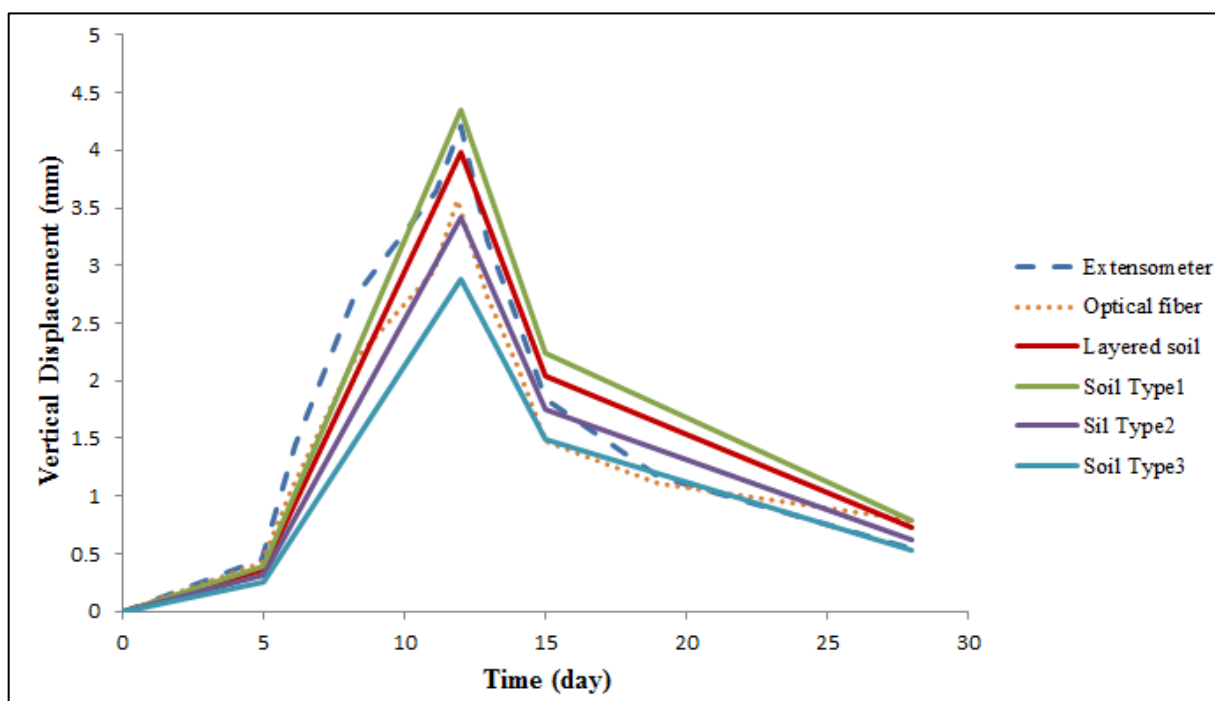
جدول ۲. مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل المان محدود

Porosity	Poisson's ratio	Elasticity Modulus (MPa)	Bulk Modulus (MPa)	Shear Modulus (MPa)	Density (kg/m ³)	Soil
0.1	0.14	259	122	113	2000	A1
0.1	0.14	259	122	113	1950	A2
0.35	0	451	59	1000	2000	B
0.3	0	634	83	1400	2200	C
0	0.16	1273	620	550	2550	Bed rock
0	0.176	33700	17381	14313	2500	Pile

۲۸ روز برای چهار حالت ذکر شده می باشد. همانطور که در جدول ۲ مشخص است لایه اول، مدول برشی کمتری نسبت به دیگر لایه ها دارد. بر همین اساس بیشترین میزان جابجایی را داراست. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود بیشترین بازه از مقادیر حاصل از نتایج فیبر نوری در محدوده بین نتایج عددی خاک چندلایه و خاک تیپ ۳ قرار گرفته است. به طریق مشابه جابجایی به دست آمده برای سیستم خاک چند لایه، بسیار نزدیک به مقدار جابجایی لایه خاک تیپ ۱ می باشد. به طور متوسط با هر ۲ درجه سانتیگراد افزایش حرارت، سرشمع به میزان ۰/۲۶ میلی متر در خاک متراکم جابجا شده است که این مقدار یک هزارم درصد از طول کل شمع می باشد.

۴. تحلیل های عددی

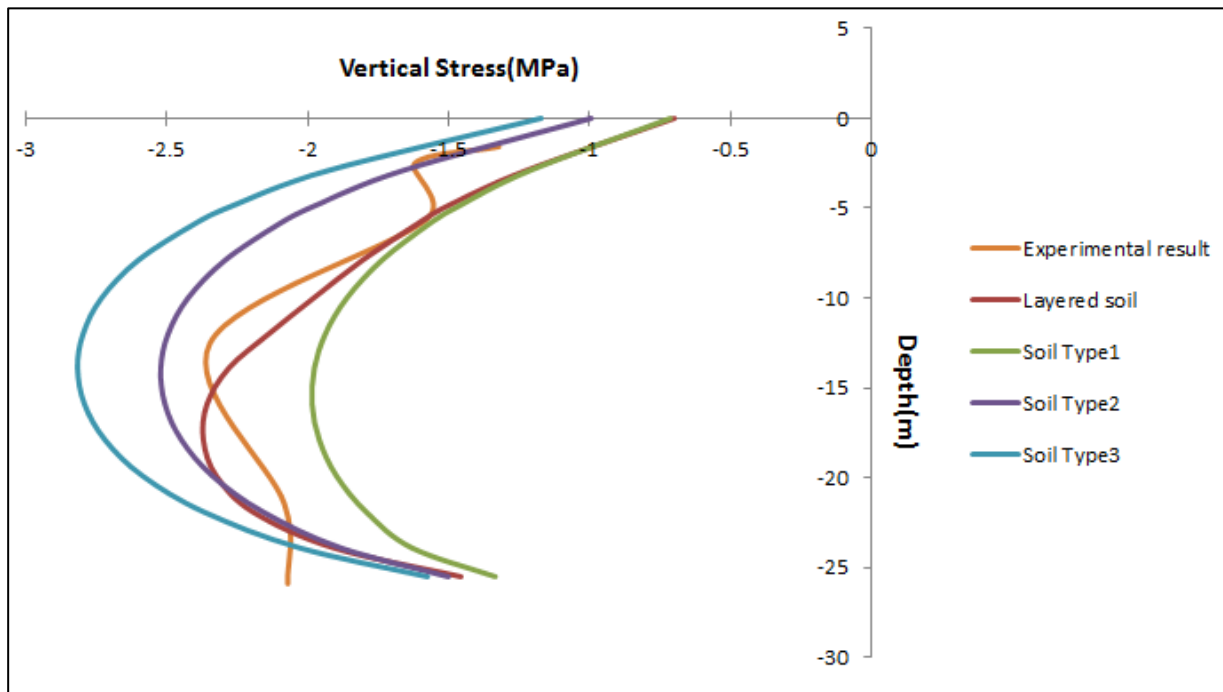
در این بخش نتایج مدل عددی در قالب نمودار ارائه شده است و با مقادیر حاصل از نتایج تجربی مطابقت داده شده است. برای بررسی رفتار حرارتی شمع یک سیکل گرمایش-سرمایش به آن اعمال شد که شامل یک دوره گرمایش ۱۲ روزه و به دنبال آن یک دوره سرمایش ۱۶ روزه بود. نمودارها نشانگر تغییر مکان، کرنش و تنش شمع مبدل حرارتی در اعماق مختلف می باشند. در این شکل ها تغییر مکان قائم مثبت، در جهت رو به بالا نمایش داده شده است و کرنش و تنش کششی مثبت در نظر گرفته شده است. در این مطالعه علاوه بر اینکه آنالیزها برای سه گونه متفاوت لایه های تکی و همگن انجام شده است، دربرگیرنده حالت چندلایه نیز می باشد. شکل ۳ نشان دهنده جابجایی قائم سر شمع در طول



شکل ۳. جابجایی قائم سر شمع در طول زمان

حالات، بیشترین مقدار تنش در بخش میانی شمع (حدوداً بین اعماق ۱۰ متر الی ۲۰ متر) به وجود می‌آید. زمانی که از لایه-بندی‌های مختلف در مدل‌سازی عددی استفاده شده است، این حداکثر تنش قائم به سمت پایین‌تر از وسط شمع متمایل شده است. البته بدیهی است که این مطلب تابع جنس خاکهای در نظر گرفته شده است. مطابق با جدول ۲ لایه خاک تیپ ۳ در میان دیگر لایه‌های خاکی از مقدار مدول الاستیسیته بالاتری برخوردار است، در نتیجه همانطور که در شکل ۴ مشخص است، مقدار تنش آن بیشتر از حالات دیگر می‌باشد.

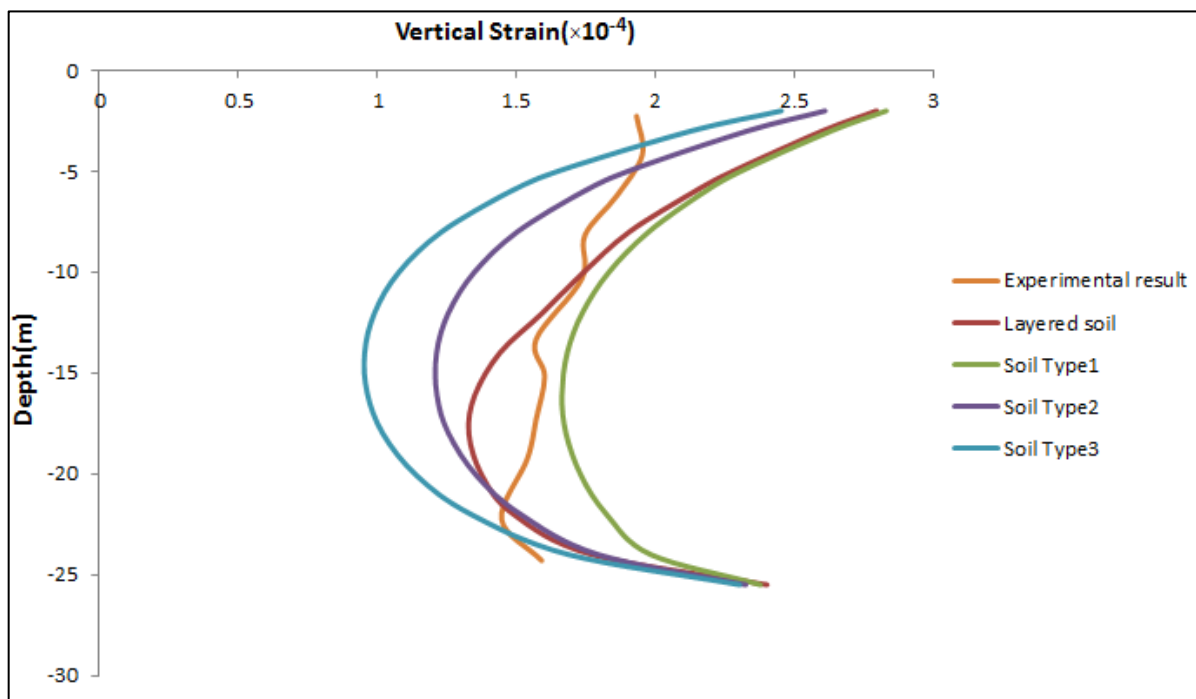
تغییرات تنش قائم شمع در اعماق مختلف در طول دوره گرمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است تنش‌های مدول عددی سیستم خاک چند لایه و خاک تیپ ۱ در بالای شمع و در نزدیکی سطح زمین مطابقت بیشتری با مقادیر نتایج تجربی دارد در حالیکه تنش‌های خاک تیپ ۳ در اعماق پایینی شمع سازگاری بهتری با نتایج تجربی دارد. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌گردد بیشترین مقادیر تنش‌های قائم در بخش میانی شمع (تقریباً وسط شمع) رخ می‌دهد. این مطلب به خصوص در تحلیل‌هایی که خاک به صورت کاملاً همگن می‌باشد، به وضوح خود را نشان می‌دهد. در تمامی



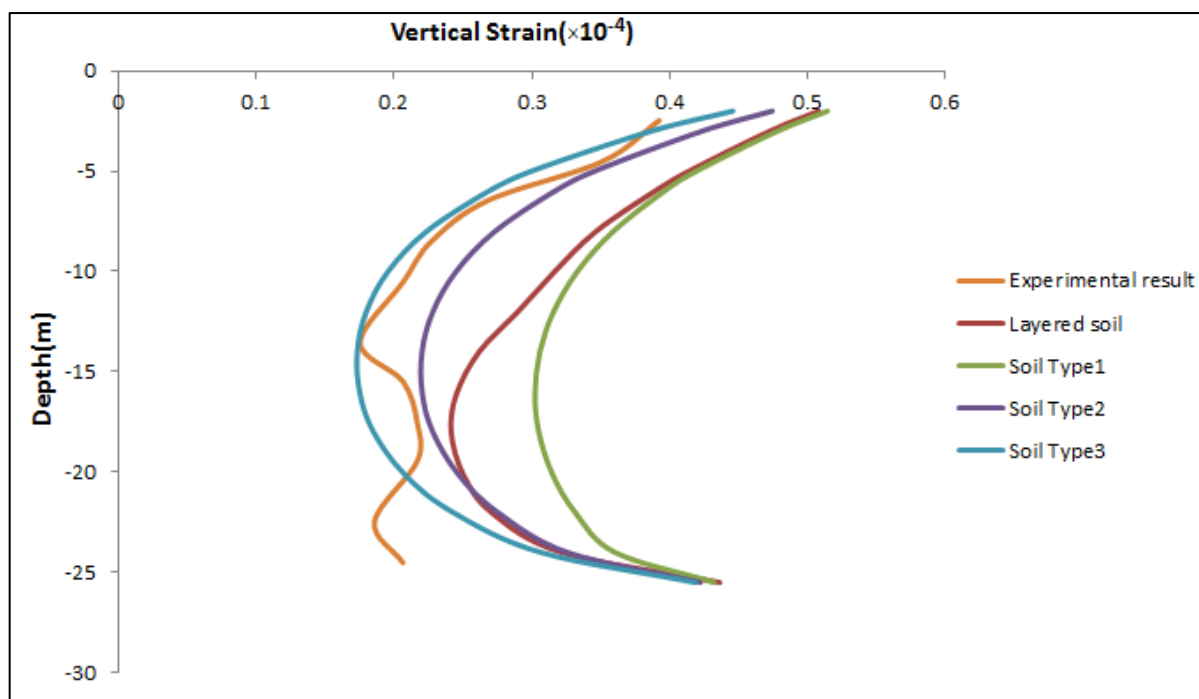
شکل ۴. تنش قائم شمع در طول دوره گرمایش

لایه ای به مقادیر کرنش خاک تیپ ۲ و تیپ ۳ نزدیکتر می-گردد. کرنش مرتبط با نتایج تجربی در اعماق سطحی و بالایی خاک، بیشترین میزان هماهنگی را با نتایج خاک لایه ای دارد. این در حالی است که کرنش حاصل از آزمایش صحرایی در اعماق پایینی، تطابق بهتری با مدل عددی خاک تیپ ۳ دارد.

شکل ۵ تغییرات کرنش قائم درون شمع را در طول دوره اعمال حرارت نشان می دهد. کرنش های مربوط به خاک چند لایه در بخش بالایی شمع بسیار نزدیک به مقادیر مرتبط با خاک تیپ ۱ است. این میزان شباهت موجود بین مقادیر تا مرز بین دو لایه خاک تیپ ۱ و تیپ ۲ ادامه دارد و از آن سطح به بعد فاصله میان آنها افزایش می یابد و به مرور نمودار خاک



شکل ۵. تغییرات کرنش قائم شمع بر حسب عمق در طول دوره گرمایش



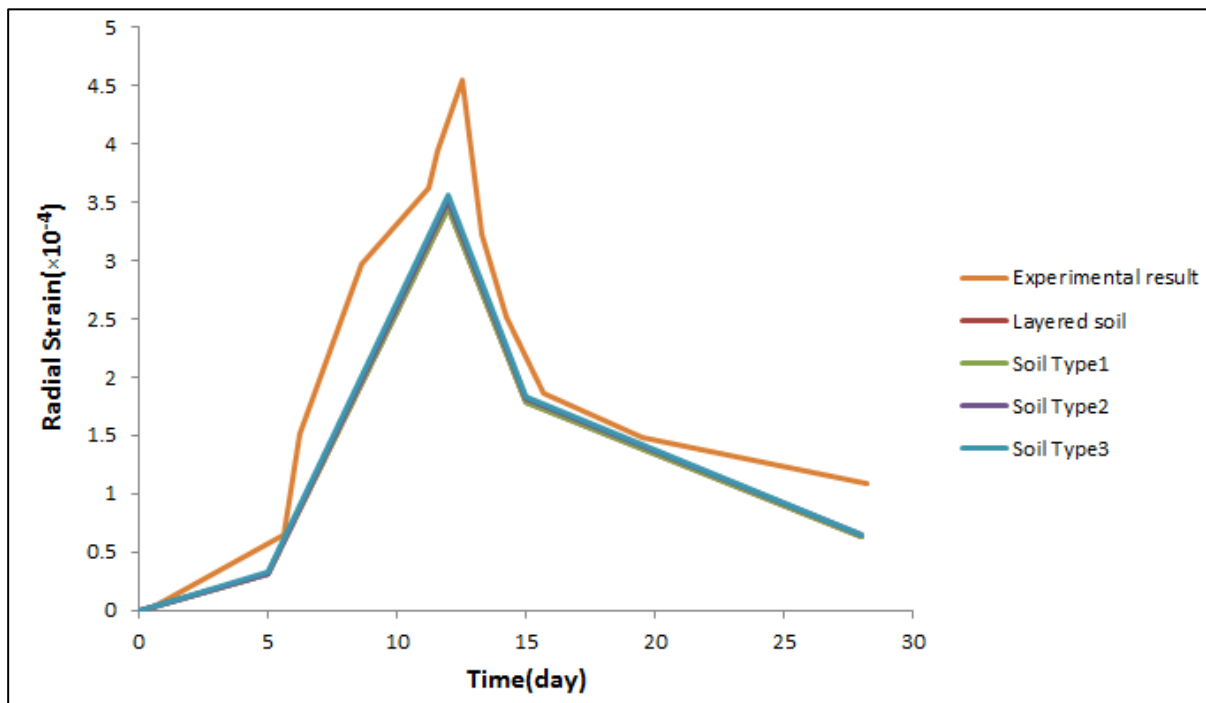
شکل ۶. تغییرات کرنش قائم شمع بر حسب عمق در طول دوره سرمایش

نزدیک به نتایج مدل عددی خاک تیپ ۳ (تقریباً متراکم) است. مقادیر کرنش قائم مرتبط با خاک چند لایه در قسمتهای بالایی مشابه (نزدیک به سطح زمین) با مقادیر مدل عددی

تغییرات کرنش قائم شمع بر حسب عمق در پایان دوره سرمایش در شکل ۶ ارائه شده است. یکی از نکات قابل توجه در این شکل این است که نتایج آزمایش صحرایی

معنادار (حدود ۵۰ درصدی) کرنش قائم در میانه طول شمع در نتایج حاصل از تحلیل در دو حالت خاک همگن تقریباً سست (تیپ ۱) و خاک همگن تقریباً متراکم (تیپ ۳) است. همانطور که انتظار می رود با سست تر شدن خاک (در تحلیلهای خاک همگن)، مقادیر کرنش قائم افزایش می یابند.

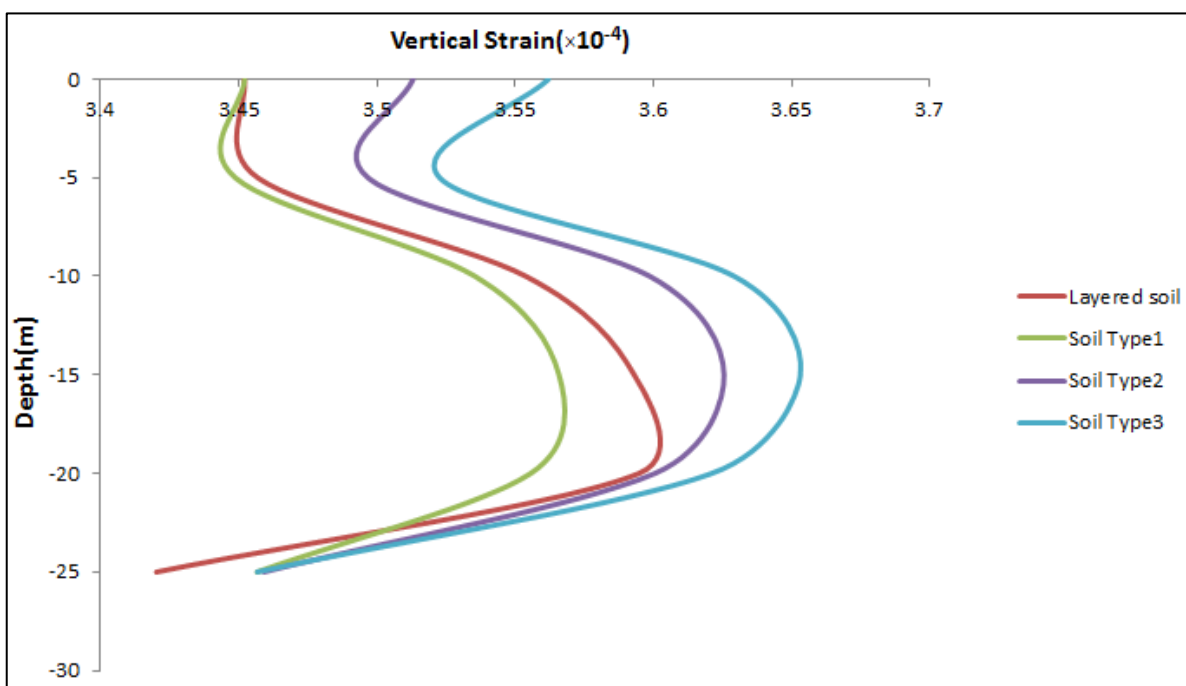
خاک همگن از جنس تیپ ۱ (خاک تقریباً سست) می باشد. همانطور که مشخص است نتایج تجربی بین دو نمودار خاک لایه ای و خاک تیپ ۳ (تقریباً متراکم) قرار گرفته است. در این نمودار مشاهده می شود که در مدل های عددی، مقادیر کرنش های قائم در انتهای شمع به یک مقدار تقریباً ثابت منتهی شده اند. این مطلب با توجه به وجود بسترسنگی قابل تفسیر است. نکته مهم دیگر در خصوص این بخش از نتایج، تفاوت



شکل ۷. تغییرات کرنش شعاعی شمع در عمق ثابت

این مطالعه تماماً منطبق بر هم هستند و تطابق خوبی با مقادیر نتایج تجربی دارند.

شکل ۷ نشان دهنده تغییرات کرنش شعاعی شمع انرژی برای حالات گوناگون در بازه زمانی ۲۸ روز در یک عمق ثابت است. همانطور که مشخص است نتایج عددی انجام شده در



شکل ۸. تغییرات کرنش شعاعی شمع در پایان دوره گرمایش

حرارتی صورت گرفت. لازم به ذکر است که در تمامی تحلیل‌های صورت گرفته با نرم افزار Comsol، انتهای شمعها متکی بر سنگ بستر بوده‌اند. برای بررسی این موضوع، تحلیل‌های مختلف بر پایه دو بخش مختلف صورت گرفتند. در حالت اول، پروفیل واقعی خاک به صورت غیرهمگن و به طور لایه‌بندی شده در نظر گرفته شد که شامل سه تیپ مختلف خاک بر روی سنگ بستر بود. در حالت دوم، محیط خاک صرفاً شامل یک لایه خاک همگن (مشابه با سه تیپ مختلف خاک در نظر گرفته شده در حالت اول) بر روی سنگ بستر مدلسازی شدند. این دو حالت مختلف تحت بارگذاری حرارتی قرار گرفتند و نتایج کرنشها و تنشها با یکدیگر مقایسه شدند. در نتایج حاصل از این تحقیق، اثرات خاک‌ها و لایه بندی‌های مختلف به وضوح در پاسخ شمع انرژی گرمایی اجرا شده در این خاکها مشاهده شد. رفتار شمع حرارتی بستگی به نوع و خصوصیات خاک و میزان بار وارد بر شمع دارد. نتایج حاصل از این تحقیق که به مساله اثرات لایه‌بندی خاک در بردارنده شمع حرارتی می-

در شکل ۸ تغییرات کرنش شعاعی شمع در پایان دوره گرمایش در اعماق مختلف نشان داده شده است. در اعماق سطحی نتایج مدل لایه ای به نتایج خاک تیپ ۱ نزدیک تر است اما در اعماق پایینی شمع، با خاک‌های تیپ ۲ و تیپ ۳ مطابقت بیشتری دارد. باید اشاره نمود که با افزایش مقدار حرارت مقدار کرنشها نیز افزایش می‌یابد. نکته قابل ذکر دیگر در این نمودار این است که زمانی که شمع در خاک همگن تقریباً متراکم (تیپ ۳) قرار گرفته است، در تمام عمق شمع، نسبت به سایر خاکها، کرنش شعاعی بیشتری در شمع ایجاد شده است. به نظر می‌رسد تراکم بالای خاک باعث اتصال بیشتر به شمع شده و این مطلب باعث افزایش کرنش شعاعی در این خاک شده است. این تفسیر از آنجا بیشتر قوت می‌گیرد که در خاک تقریباً سست (تیپ ۱) کمترین شعاع شعاعی در بدنه شمع قابل مشاهده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدلسازی عددی برای بررسی رفتار شمع زمین گرمایی در خاک‌های مختلف تحت بارگذاری

۴۰ درصدی تنش فشاری و کاهش ۷۷ درصدی کرنش قائم شده است. همین تغییر مدول الاستیسیته لایه‌های خاک باعث تغییر در مقادیر تنشها و تنشهای شمع در حالت خاک لایه‌بندی شده گردید. همچنین تغییر ۴۰ درصدی مدول الاستیسیته خاکهای تیپ ۲ و ۳ باعث شده است مقدار جابجایی ۱۷ درصد کاهش یافته و مقدار تنش فشاری و کرنش به ترتیب ۱۱ درصد افزایش و ۲۷ درصد کاهش یابد. نتایج تحلیلهای عددی صورت گرفته نشان دادند که جنس خاک‌ها و نحوه قرارگیری آنها در عمق، تاثیر بسزایی در نوع رفتار شمع زمین گرمایی دارد. از آنجا که در طبیعت آنچه که مشاهده می‌شود، پروفیل خاک لایه‌بندی شده است و کمتر، خاک صرفاً همگن وجود دارد، بر این اساس باید برای تعیین رفتار واقعی چنین خاکهایی و شمعهای زمین گرمایی اجرا شده در آنها به اثر لایه‌بندی و به خصوص حضور لایه سست و نیز محل قرارگیری آن در پروفیل خاک مورد نظر توجه ویژه گردد.

پردازد نشان می‌دهد که حرارت باعث تغییر میزان تنش و کرنش می‌شود به نحوی که با اعمال حرارت، تنش قائم با افزایش عمق افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان داد که پاسخ خاک دارای لایه‌بندی‌های مختلف، در میان پاسخ مدل‌های تک لایه قرار می‌گیرد؛ طوریکه خاک سست در یک سمت آن و خاک متوسط و متراکم در سمت دیگر واقع می‌شوند. به عبارت دیگر، وجود لایه‌بندی‌های مختلف در خاک باعث تغییر در مقادیر کرنش و تنش نسبت به حالتی می‌شود که خاک به صورت همگن باشد. یکی از نکات قابل ذکر در نتایج بدست آمده این است که تنش‌ها و کرنش‌های قائم شمع مذکور قرار گرفته در خاک چند لایه در اعماق سطحی زمین، با تنش‌ها و کرنش‌های قائم شمع قرار گرفته در خاک سست تطابق بهتری دارد. مدول الاستیسیته خاک با تراکم متوسط تیپ ۲ نسبت به مدول الاستیسیته خاک سست در نظر گرفته در تحلیلهای ۷۴ درصد بیشتر بوده است که این مساله منجر به کاهش ۲۷ درصدی جابجایی، افزایش

منابع

- شش پری، ف. و عامل سخی، م.، ۱۳۹۷. آنالیز شمع زمین گرمایی به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر تحت بارگذاری مکانیکی حرارتی. سومین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران.
- Brandl, H. 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 56(2), 81-122.
- Bodas Freitas, T. M., Cruz Silva, F. and Bourne-Webb, P.J. 2013. The response of energy foundations under thermo-mechanical loading, Accepted for publication in the *Proc. 18th ICSMFE*, Paris, 4 pages.
- Dupray, F., Laloui, L., and Kazangba, A. 2014. Numerical analysis of seasonal heat storage in an energy pile foundation. *Computers and Geotechnics*, 55(1), P67-77.
- Goode JC III, Zhang M, McCartney JS 2014. Centrifuge modeling of energy foundations in sand. In: Gaudin C, White D (eds) *Physical Modeling in Geotechnics: proceedings of the 8th international conference on physical modelling in geotechnics*. Perth, Australia, 14–17 January. Taylor and Francis, London, 729–736
- Guo, Y., Zhang, G., Liu, S., Du, Y., & Liu, Z. 2018. Numerical Study on the Long-Term Thermal Performance and Ground Temperature Variation of Energy Pile in Multi-layered Soil. *Energy Geotechnics*, 90–96. doi:10.1007/978-3-319-99670-7_12
- Houston, S. L., Dye, H. B., Lingnau, B., and Houston, W. N. 2015. Thermally-Induced Settlements for Heat Generating Structures on Unsaturated Soils. *Geotech. Geol. Eng.*, 33, 307–319
- Laloui, L., et al. 2006. Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 30(8), 763–781
- Li, Q., Chen, L., Qiao, L. 2017. Thermal Effect on Structural Interaction between Energy Pile and Its Host Soil. *Advances in Materials Science and Engineering*, <https://doi.org/10.1155/2017/7121785>.

- McCartney JS, Rosenberg JE, Sultanova A. 2010. Engineering performance of thermo-active foundation systems. In: Goss CM, Kerrigan JB, Malamo J, McCarron MO, Wiltshire RL (eds) *GeoTrends: the Progress of Geological and Geotechnical Engineering in Colorado at the Cusp of a New Decade (GPP 6)*, 27-42
- Ng, C. W. W., Ma, Q. J., & Gunawan, A. 2016d. Horizontal stress change of energy piles subjected to thermal cycles in sand. *Computers and Geotechnics*, 78,54-61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.05.003>.
- Nguyen, V. T., Tang, A. M., & Pereira, J.-M. 2017. Long-term thermo-mechanical behavior of energy pile in dry sand. *Acta Geotechnica*, 12(4), 729-737. doi:10.1007/s11440-017-0539-z
- Saggu, R & Chakraborty, T. 2015. 'Cyclic thermo-mechanical analysis of energy piles in sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 33, no. 2, pp. 321-342.
- Sani AK, Singh RM. (2018). Response of unsaturated soils to heating of geothermal energy pile. *Renew Energy*.
- Sheshpari, F. and Amelsakhi, M., 2021. Computational modelling of energy pile systems. *Mathematics and Computational Sciences*, 2(1), pp.48-60.
- Wang B, Bouazza A, Haberfield C. 2011. Preliminary observations from laboratory scale model geothermal pile subjected to thermo-mechanical loading. *Geo-Frontiers ASCE*, Dallas, Texas, March 13-16, 430-439