

**مطالعه‌ی عددی عملکرد شمع‌های حرارتی با استفاده از مدل‌های رفتاری ترمومکانیکی و مکانیکی\***مهدی خداپرست<sup>(۱)</sup> علی جمالو<sup>(۲)</sup> سیدعلی قریشیان امیری<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در سال‌های اخیر مدل‌های رفتاری متعددی برای پیش‌بینی رفتار خاک تحت اثر بارهای ترمومکانیکی ارائه شده‌است. از سوی دیگر بررسی رفتار شمع‌های حرارتی و خاک مجاور آن تحت بارهای ترمومکانیکی و با استفاده از مدل‌های رفتاری که در آنها تغییر رفتار خاک در اثر تغییرات دما در نظر گرفته می‌شود، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق یک مدل رفتاری ترمومکانیکی به نرم‌افزار المان محدود آباکوس اضافه شده است تا از آن برای بررسی عملکرد شمع‌های حرارتی، استفاده شود. نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی آزمایش سه‌محوری نشان می‌دهد که کد نوشته شده برای مدل رفتاری مورد نظر توانایی پیش‌بینی رفتار خاک در شرایط ترمومکانیکی را دارد. همچنین نتایج به دست آمده از تحلیل شمع حرارتی با استفاده از مدل‌های رفتاری مکانیکی دراکر-پراگر، کم‌کلی اصلاح شده و ترمومکانیکی تورچی بیانگر آن است که با وجود تأثیر قابل توجه انتخاب مدل رفتاری بر نتایج در تحلیل شمع حرارتی، تفاوتی میان انتخاب مدل رفتاری مکانیکی و ترمومکانیکی برای خاک کنار آن وجود ندارد.

**واژه‌های کلیدی** شمع حرارتی، مدل رفتاری خاک، ترمومکانیک، اثر دما بر خاک، آباکوس.

### The Numerical Study of Energy Piles Performance by Using of Thermo-Mechanical and Mechanical Constitutive Models

M. Khodaparast S. A. Ghoreishian Amiri A. Jamaloo

**Abstract** In recent years, several constitutive models have been proposed to predict soil behavior under thermomechanical loads. On the other hand, it is important to study the behavior of energy piles and their adjacent soils under thermomechanical loads and by using constitutive models in which soil behavior changes due to temperature changes are considered. In this study, a thermomechanical constitutive model was added to the Abaqus finite element software to be used to evaluate the performance of energy piles. Results obtained from numerical modeling of Triaxial test show that the code written for the given constitutive model is capable of predicting soil behavior under thermomechanical conditions. Also, the results obtained from the analysis of energy pile using mechanical constitutive models of Drucker-Prager, MCC and thermo-mechanical constitutive model Tourchi show that in the analysis of energy pile, although the choice of constitutive model has a significant impact on the results, but there is no difference between choosing a mechanical or thermomechanical constitutive model for the adjacent soil.

**Key Word** Energy pile, Constitutive model of soil, Thermomechanic, Temperature effect on soil, Abaqus.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۷/۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۸/۳ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم.

(۳) پژوهشگر ارشد گروه مهندسی ژئوتکنیک دانشکده مهندسی، دانشگاه علم و صنعت نروژ.

### مقدمه

در سال‌های اخیر در مناطق مختلف جهان ساخت ساختمان‌های مسکونی و تجاری با رویکرد بهینه‌سازی مصرف انرژی با استفاده از شمع‌های حرارتی تبدیل به یک فناوری نوظهور شده است [1]، لذا توجه به تحقیقات حوزه‌ی ژئوتکنیک در این خصوص که به بررسی تغییرات مقاومت و تغییر شکل خاک ناشی از تغییرات دما پرداخته‌است، بیش از گذشته مورد توجه قرار گرفته است [2].

مطالعات گذشته در این زمینه به دو دسته مطالعات رفتار خاک تحت اثر دما و مطالعات عملکرد شمع‌های حرارتی قابل تقسیم است. براساس تحقیقات انجام شده در دسته‌ی اول، افزایش دمای خاک منجر به کاهش تنش پیش‌تحکیمی و شیب خط حالت بحرانی خاک می‌شود [3,4]. هم‌چنین محققان دیگری اثر دما بر مقاومت برشی را بررسی کرده و نتایج متفاوت و متضادی از جمله افزایش مقاومت برشی [5-7] و کاهش مقاومت برشی [5,8,9] را گزارش کرده‌اند. هم‌چنین گزارش‌های برخی از مطالعات گذشته تأثیر ناچیز دما بر مقاومت برشی را نشان داده است [6,10].

از طرفی در سه دهه‌ی اخیر مدل‌های رفتاری ترمومکانیکی متعددی برای خاک‌های مختلف ارائه شده است که برای رس‌ها، مدل‌های رفتاری برمبنای کم‌کلی اصلاح‌شده سهم قابل توجهی از آنها را دربر گرفته است [4,11-15]. عملکرد چند مدل رفتاری ارائه شده برای خاک‌های رس اشباع تا سال ۲۰۱۳ توسط هانگ و همکاران [16] مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های وی نشان‌دهنده این است که تمامی مدل‌ها پیش‌بینی معقولی از رفتار ترمومکانیکی خاک رس اشباع داشته‌اند. با این حال هر مدل رفتاری دارای محدودیت‌ها و فرضیاتی در تئوری خود هستند که در نتایج مؤثر بوده است. هانگ و همکاران [17] مدل ارائه شده توسط کوی و همکاران [4] را گسترش دادند و دو مکانیسم پلاستیک TY و LY را به ترتیب برای انقباض و انبساط

حرارتی در نسبت پیش‌تحکیمی بالا و اثر دما بر فشار پیش‌تحکیمی معرفی کردند. در نهایت به منظور بررسی عملکرد مدل رفتاری ارائه شده، نتایج آزمایشگاهی یک آزمایش سه‌محوری زهکشی شده بر روی خاک رس بوم با نتایج به دست آمده از مدل رفتاری مقایسه شد.

شیونگ و همکاران [2] نیز براساس مدل رفتاری کم‌کلی اصلاح شده یک مدل رفتاری ترمومکانیکی برای خاک ارائه داده‌اند که با قرار دادن مقدار OCR برابر یک در آن، مدل با مدل رفتاری کم‌کلی اصلاح شده برابر می‌شود. طبق بررسی‌های انجام شده توسط این محققان رفتار ترمومکانیکی خاک وابسته به تأثیر تغییرات دما بر دو پارامتر تنش پیش‌تحکیمی و نسبت تنش بحرانی است و بررسی تعادل بین اثر تغییرات دما بر این دو پارامتر امکان تعیین رفتار سخت شونده یا نرم شونده‌ی حرارتی را ممکن می‌کند. هم‌چنین مطالعات گسترده‌ای در زمینه‌ی بررسی عملکرد شمع‌های حرارتی به صورت تک [18-21] و گروه [1,22-24] انجام شده است. لالویی و همکاران [۱۸] در یک مطالعه‌ی عددی و صحرایی به بررسی عملکرد شمع‌های حرارتی پرداخته‌اند که در مدل‌سازی عددی آنها از یک مدل رفتاری ترموالاستوپلاستیک برمبنای مدل رفتاری دراکر-پراگر استفاده شده است. طبق تحقیقات ایشان تنش محوری ناشی از بارگذاری حرارتی و بارگذاری ترمومکانیکی بزرگ‌تر از تنش محوری ناشی از بار مکانیکی می‌باشد و افزایش دما به میزان یک درجه‌ی سانتی‌گراد، ۱۰۰ کیلونیوتن بار محوری را افزایش می‌دهد.

آماتیا و همکاران [25] مکانیسم ارائه شده را در دو حالت گیرداری کامل و آزاد بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که تنش ناشی از بار حرارتی درحالتی که دو سر شمع به طور کامل گیردار باشد از سایر حالات بیشتر است. مشاهدات ایشان نشان‌دهنده افزایش نشست در بارگذاری ترمومکانیکی نسبت به بارگذاری مکانیکی نیز می‌باشد. آکروچ و همکاران [26] یک آزمایش کشش شمع بر روی شمع حرارتی در خاک با پلاستیسیته‌ی بالا

این مقایسه قابل مشاهده است. جزئیات فرمولاسیون مدل رفتاری آنها در بخش بعد به طور کامل آمده است.

در این مقاله عملکرد شمع حرارتی در خاک رس اشباع تحت بارگذاری حرارتی و مکانیکی با استفاده از سه مدل رفتاری متفاوت بررسی شده است. در مطالعات عددی گذشته عمدتاً از مدل‌های رفتاری مکانیکی و ترمومکانیکی متفاوتی برای توصیف رفتار خاک مجاور شمع حرارتی استفاده شده است. بر این اساس هدف از مطالعه‌ی حاضر، تعیین میزان تأثیر مدل رفتاری خاک بر نتایج به دست آمده از مدل‌سازی شمع‌های حرارتی بوده است. برای این منظور ابتدا یک سابروتین یومت برای مدل رفتاری تورچی [28] که برای پیش‌بینی رفتار ترمومکانیکی خاک رس اشباع ارائه شده است، نوشته شد. سپس برای صحت‌سنجی کد مذکور از یک مدل سه‌بعدی آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته‌ی زهکشی شده CD استفاده گردید و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی مقایسه شد. در نهایت نیز یک مدل سه‌بعدی المان محدود برای تحلیل عملکرد شمع حرارتی با استفاده از مدل رفتاری تورچی [28] و مدل رفتاری دراگر-پراگر و کم‌کلی اصلاح شده برای شبیه‌سازی رفتار خاک در آباکوس ۲۰۱۷ ساخته شد. هم‌چنین نتایج به دست آمده از این دو تحلیل با نتایج عددی و آزمایشگاهی گزارش شده توسط لالویی و همکاران [18] مقایسه گردیده است.

## مدل رفتاری و مدل‌سازی عددی

### مدل رفتاری

در این تحقیق برای توصیف رفتار ترمومکانیکی خاک از سابروتین یومت مدل رفتاری تورچی [28] که در طی این مطالعه نوشته شد، استفاده گردیده است. این مدل رفتاری با گسترش مدل حمیدی و خزایی [15] به یک مدل ترموالاستوپلاستیک تبدیل شده است و در آن در نظر گرفتن اثرات حرارت بر رفتار خاک بر اساس ایده‌ی تفاوت میان منحنی تحکیم ایزوتروپ در دمای

انجام دادند. نتایج آزمایش‌های آنها بیان می‌کند که افزایش دمای خاک منجر به افزایش نرخ خزش می‌شود به طوری که با توجه منحنی بار-جاب‌جایی، نشست شمع حرارتی در طولانی مدت (۵۰ سال) حدود ۲,۳۵ برابر نشست شمع عادی در همین شرایط می‌باشد.

خداپرست و همکاران [20] به مطالعه‌ی عددی اثر دما بر ظرفیت باربری و نشست تحکیمی شمع‌های حرارتی در خاک‌های ریزدانه‌ی اشباع پرداختند و مدل رفتاری دراگر-پراگر را برای پیش‌بینی منحنی تنش و کرنش خاک در نظر گرفتند. تحقیقات ایشان نشان داد که افزایش مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و نسبت تخلخل تحت بارگذاری حرارتی موجب میزان کاهش بیشتر در تنش مؤثر قائم در مقایسه با شرایط ژئواستاتیکی می‌شود.

نگویان و همکاران [27] به بررسی رفتار بلندمدت شمع‌های حرارتی با استفاده از یک مدل فیزیکی پرداختند. در تحقیق آنها بارهای مکانیکی مختلفی (از ۰ تا ۶۰ درصد مقاومت شمع) بر آن وارد شد و هم‌زمان با آن ۳۰ سیکل حرارتی نیز به شمع اعمال گردید. بررسی‌های آنها نشان داد که اعمال سیکل‌های حرارتی و اعمال بار ثابت منتهی به نشست پلاستیک (برگشت‌ناپذیر) در سر شمع می‌شود. تورچی [28] یک مدل رفتاری ترمومکانیکی بر اساس مدل رفتاری کم‌کلی اصلاح شده و نظریه‌ی حالت بحرانی، برای خاک رس در شرایط اشباع ارائه داده است که در آن کرنش‌های الاستیک ناشی از افزایش دما، اثر دما بر شیب حالت بحرانی و تأثیر نسبت پیش‌تحکیمی در مدول برشی، در نظر گرفته شده است. پارامترهای اضافه شده به مدل کم‌کلی اصلاح شده در تحقیق آنها با استفاده از آزمایش سه‌محوری به آسانی قابل دست‌یابی بوده است. آنها برای صحت‌سنجی، نتایج مدل رفتاری خود را با ۵ سری داده‌های آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی گذشته مقایسه کرده‌اند که توانایی مناسب مدل رفتاری آنها در پیش‌بینی رفتار ترمومکانیکی خاک‌های رسی اشباع در

$$\eta = \frac{q}{p'} \quad (10)$$

در روابط (۹) و (۱۰)  $M_T$  شیب خط حالت بحرانی و  $v$  حجم مخصوص می‌باشد. هم‌چنین در این مدل رفتاری رابطه‌ای برای تبدیل  $p'_c$  تنش پیش‌تحکیمی در دمای محیط به  $p'_{cT}$  تنش پیش‌تحکیمی در دمای بالا ارائه شده‌است.

$$p'_{cT} = p'_c \exp(-3\rho^p H_0 \Delta T) \quad (11)$$

با در نظر گرفتن قانون جریان همراه، با استفاده از رابطه‌ی (۱۲) کرنش برشی پلاستیک محاسبه شده‌است.

$$d\varepsilon_s^p = \frac{d\varepsilon_v^p}{\psi} \quad (12)$$

$$\psi = \frac{\alpha[M^2(\beta-1)-\eta^2]}{2\theta\eta} \quad (13)$$

معادله‌ی سطح تسلیم نیز با اضافه شدن پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\theta$  به معادله‌ی سطح تسلیم مدل کم‌کلی اصلاح شده، به صورت رابطه‌ی (۱۴) بازنویسی شده‌است:

$$q = M_T p' \left\{ \frac{\alpha^2(\beta-1)}{2\theta-1} \left[ \left( \frac{p'_{cT}}{p'} \right)^{\frac{1}{\Omega}} - 1 \right] \right\}^{0.5} \quad (14)$$

$$\Omega = \frac{\theta}{2\theta-1} \quad (15)$$

برای نوشتن سابروتین یومت برای مدل رفتاری مذکور، ابتدا ماتریس الاستیک و الاستوپلاستیک آن به دست آمده‌است که براین اساس برای تشکیل ماتریس الاستیک رابطه‌ی (۱۶) و برای تشکیل ماتریس الاستوپلاستیک مدل رفتاری از رابطه‌ی (۱۷) استفاده شده‌است [29].

$$[D^e] = 2G[I] + \left( K - \frac{2G}{3} \right) \cdot \{\delta\} \cdot \{\delta\}^T \quad (16)$$

$$D^{ep} = D^e - \frac{D^e \left( \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right) \left( \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T D^e}{\left( \frac{\partial F}{\partial \varepsilon^p} \right)^T \left( \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right) + \left( \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T D^e \left( \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right)} \quad (17)$$

پس از تشکیل ماتریس‌ها، تابع تسلیم تعریف شده و شرط استفاده از هر کدام از ماتریس‌ها طبق تابع تسلیم برقرار شده‌است.

مرجع و دمای بالا می‌باشد. هم‌چنین در مدل تورچی [28] تأثیر تغییرات دما بر شیب خط حالت بحرانی، سطح تسلیم و نسبت پیش‌تحکیمی اضافه شده‌است که در مدل حمیدی و خزایی [15] در نظر گرفته نشده‌بود. روابط مدل ارائه شده در فضای تنش سه‌محوری از دو قسمت الاستیک و پلاستیک تشکیل شده که در قسمت الاستیک برای محاسبه‌ی کرنش‌های حجمی از روابط (۱) و (۲) و (۳) استفاده شده‌است.

$$d\varepsilon_v^e = d\varepsilon_{vT}^e + d\varepsilon_{vp}^e \quad (1)$$

$$d\varepsilon_{vT}^e = 3\alpha_e dT \quad (2)$$

$$d\varepsilon_{vp}^e = \frac{1}{K} dp' \quad (3)$$

در روابط بالا  $\alpha_e$  ضریب انبساط حرارتی حجمی و  $K$  مدول بالک است و از رابطه‌ی (۴) به دست می‌آید:

$$K = \frac{v_0 p'_0}{\kappa_T} \left( \frac{p'}{p'_0} \right)^a \quad (4)$$

که در آن  $v_0$  حجم مخصوص اولیه و  $a$  و  $b$  پارامترهای مدل می‌باشد.

هم‌چنین برای محاسبه‌ی کرنش برشی فقط از مؤلفه‌ی کرنش برشی مکانیکی استفاده شده و از کرنش برشی حرارتی صرف نظر شده‌است.

$$d\varepsilon_s^e = d\varepsilon_{sT}^e + d\varepsilon_{sp}^e \quad (5)$$

$$d\varepsilon_{sp}^e = d\varepsilon_{sp}^e = \frac{dq}{G_T(\sigma_c)} \quad (6)$$

که در روابط (۵) و (۶) و (۷)  $D$  پارامتر مدل،  $G_{T0}$  مدول برشی در دمای اولیه و  $G_T$  مدول برشی در دمای ثانویه می‌باشد.

در قسمت پلاستیک نیز با توجه به این که پارامتر سخت‌شو ندگی تنش پیش‌تحکیمی در نظر گرفته شده‌است، نمو کرنش حجمی با استفاده از رابطه‌ی (۸) محاسبه شده‌است:

$$d\varepsilon_v^p = \frac{1}{H_L} \frac{dp'_{cT}}{p'_{cT}} \quad (8)$$

$$H_L = \frac{v}{\lambda - \kappa_T - (N\delta\varepsilon_T) \left( \frac{M_T}{M_T - \eta} \right)} \quad (9)$$

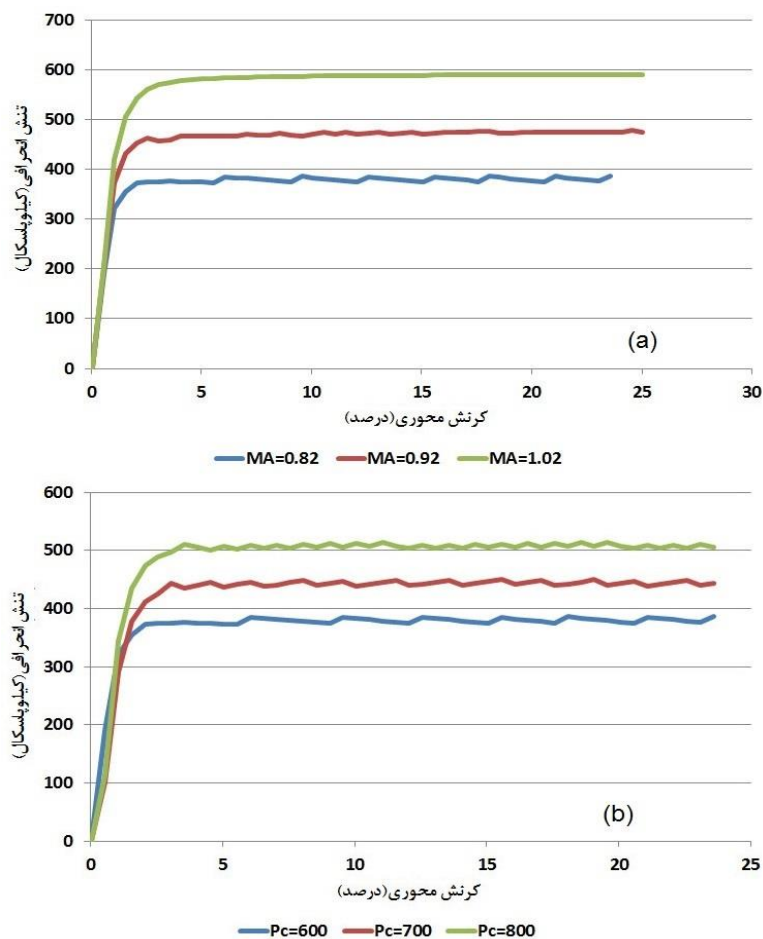
### مطالعه‌ی پارامتری مدل رفتاری

رابطه‌ی تنش تسلیم با دما، نسبت پیش‌تحکیمی و شیب خط حالت بحرانی به‌صورت مستقیم است و کاهش هریک از آنها به کاهش مقاومت برشی منجر شده‌است (شکل ۱).

در این قسمت به‌منظور بررسی بیشتر مدل رفتاری تورچی [28] نمودار تنش کرنش به‌دست‌آمده با تغییر برخی از پارامترهای موجود در آن ارائه شده‌است که برنامه‌ی این مطالعه‌ی پارامتری در جدول (۱) آمده‌است.

جدول ۱ برنامه‌ی مطالعه‌ی پارامتری مدل رفتاری تورچی [28] با استفاده از مدل عددی آزمایش سه‌محوری

مطالعه‌ی پارامتری										
شماره‌ی مدل	دما	تابع تسلیم					قسمت الاستیک			
	T	A	$\theta$	B	MA	Pc(kPa)	C	D	$\kappa A$	(a,b)
1	22	0.8	1	1.75	0.82	600	0.14	5	0.028	2.5
2	40	0.85	1.2	1.85	0.92	700	0.24	10	0.04	5
3	60	0.9	1.4	1.95	1.02	800	0.34	15	0.05	7.5

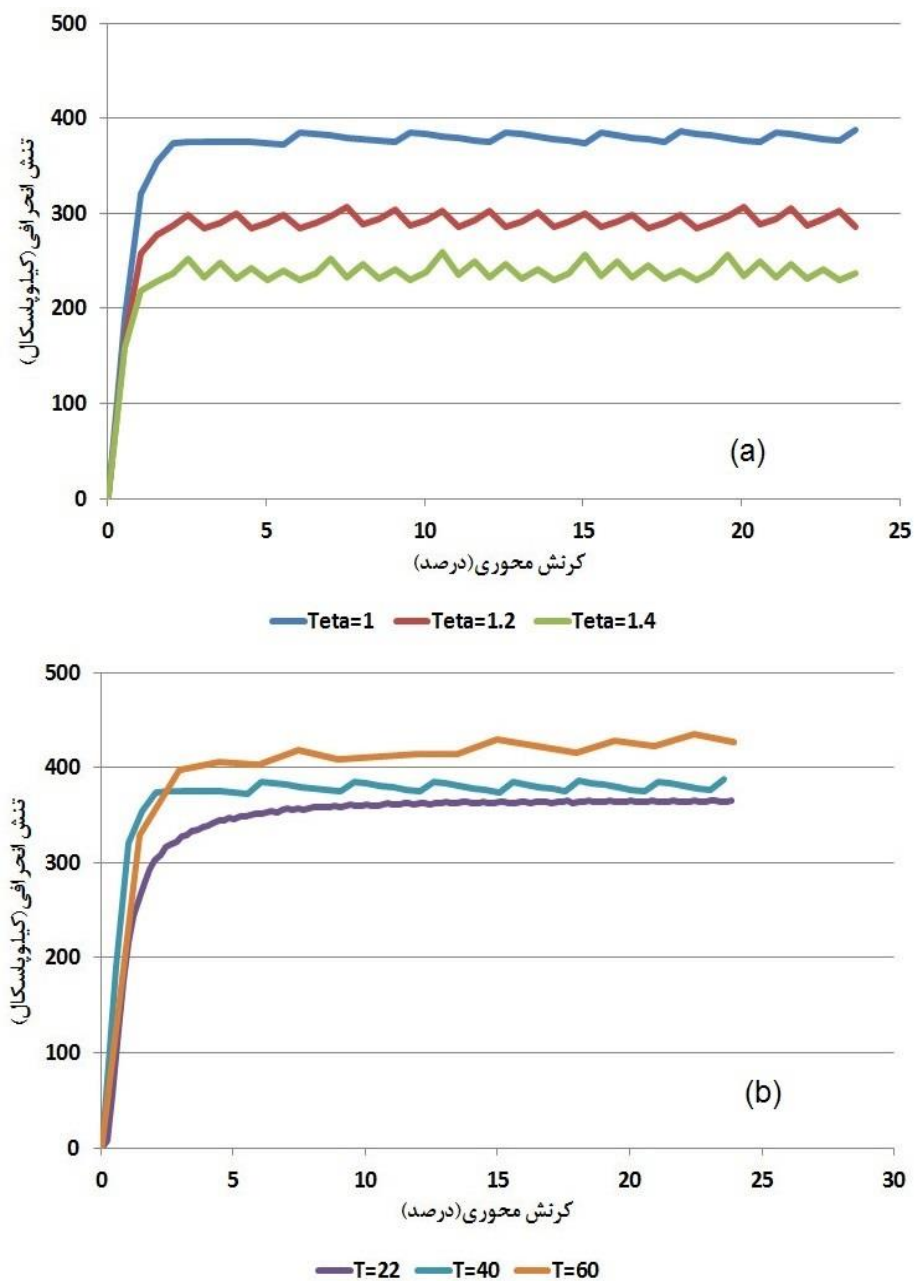


شکل ۱ اثر تنش پیش‌تحکیمی و شیب خط حالت بحرانی بر نمودار تنش - کرنش خاک در دمای ۴۰ درجه: الف) شیب خط حالت بحرانی، ب) تنش پیش‌تحکیمی

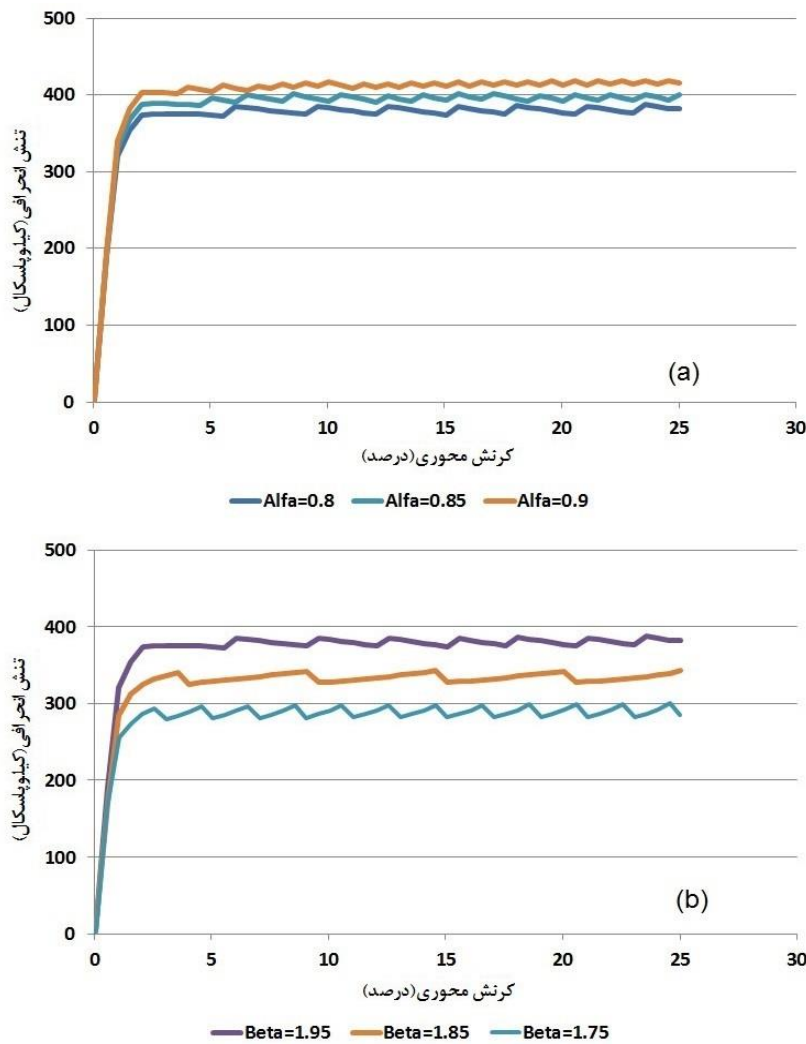
شده است و بر خلاف آنها برای افزایش مقاومت برشی کاهش  $\theta$  مورد نیاز است. از سه پارامتر اضافه شده به رابطه‌ی تنش تسلیم دو پارامتر  $\theta$  و  $\beta$  مؤثرتر از پارامتر  $\alpha$  بوده است.

تأثیر دما و پارامترهای موجود در رابطه‌ی تابع تسلیم بر نمودار تنش- کرنش نیز در شکل (۲) مشاهده می‌شود.

باتوجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که افزایش پارامترهای  $\beta$  و  $\alpha$  باعث افزایش مقاومت برشی خاک



شکل ۲ اثر پارامتر  $\theta$  و دما بر نمودار تنش- کرنش خاک: الف) پارامتر  $\theta$ ، ب) دما



شکل ۳ اثر پارامترهای تابع تسلیم بر نمودار تنش- کرنش خاک در دمای ۴۰ درجه: الف) پارامتر  $\alpha$ ، ب) پارامتر  $\beta$

جدول ۲ مشخصات نمونه خاک براساس مدل رفتاری تورچی [28] در مدل آزمایش سه محوری

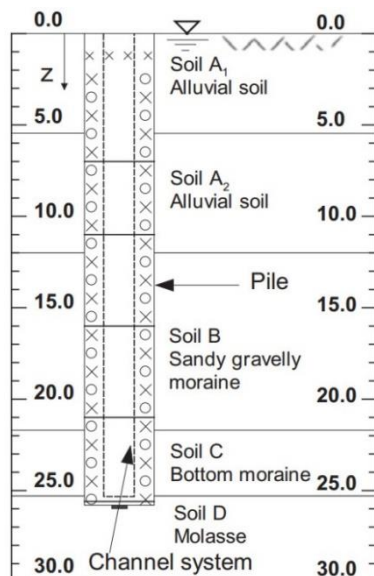
داده‌های آزمایشگاهی	M	$\lambda$	$\kappa A$	GA/p'0	$\zeta$	$\eta$	C	D	c
چکرواک و لالویی [7]	0.82	0.102	0.028	88	0.25	0	0.14	5	1.8

\* پارامتر M شیب خط حالت بحرانی، پارامتر  $\lambda$  شیب خط تحکیم عادی، پارامتر  $\kappa A$  شیب خط باربرداری و پنج پارامتر  $\zeta$ ، C، D، c و  $\eta$  پارامترهای مدل هستند.

### مدل سازی عددی آزمایش سه محوری CD

برای شبیه سازی رفتار خاک از سابروتین یومت استفاده شده و مشخصات خاک نمونه با توجه به کد ارائه شده در جدول (۲) آمده است. در این مدل تحلیل با دو گام مختلف انجام شده است که در گام اول تحکیم خاک با تنش اولیه

در مرحله اول برای بررسی عملکرد سابروتین یومت در مدلی با یک المان، مدل آزمایش سه محوری که هندسه‌ی نمونه‌ی مورد آزمایش در آن یک استوانه به قطر ۵,۵ سانتی متر و ارتفاع ۱۱ سانتی متر می باشد، ساخته شده است.



شکل ۵ لایه بندی خاک در مدل شمع حرارتی [18]

برای معرفی رفتار مکانیکی خاک لایه‌ی B علاوه بر مدل رفتاری دراکر- پراگر از مدل رفتاری تورچی [28] نیز استفاده شده که مشخصات آن در جدول (۴) آمده است. این مشخصات با توجه به وجود نتایج صحرایی با استفاده از روش کالیبراسیون حاصل شده است. پارامترهای جدول (۴) نیز مانند پارامترهای جدول (۲) تعریف می‌شوند. هم‌چنین برای معرفی مدل رفتاری کم‌کلی اصلاح شده تغییرات در سابروتین یومت مدل رفتاری تورچی [28] ایجاد شده است. با توجه به شرایط اشباع خاک برای تحلیل شمع حرارتی از دو تحلیل مجزا استفاده شده است. در تحلیل اول برای تعریف اندرکنش حرارتی بین شمع و خاک از دو نوع اندرکنش Thermal Conductance و Heat Generation استفاده شده است و در تحلیل دوم برای تماس مکانیکی بین شمع و خاک نیز از یک رفتار تانژانتی از نوع پنالتی با ضریب اصطکاک ۰,۷ استفاده شده است. بارگذاری به سه صورت آزمون ۱ و ۲ و ۳ انجام شده که در آزمون ۱ فقط بار مکانیکی به اندازه‌ی ۱۳۰۰ کیلو نیوتن به شمع وارد شده است. آزمون ۲ بارگذاری مکانیکی ندارد و فقط بار حرارتی به میزان ۱۳,۶ درجه‌ی سانتی‌گراد و فرآیند تحکیم خاک در نظر گرفته می‌شود و در نهایت در آزمون ۳ بار مکانیکی و حرارتی و فرآیند تحکیم به صورت هم‌زمان اعمال

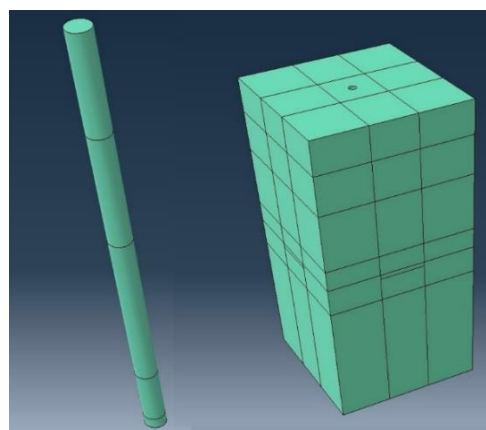
صورت گرفته و در گام دوم برای شبیه‌سازی فرآیند زهکشی، بارگذاری به صورت کنترل جابه‌جایی با سرعت تقریبی ۰,۴ میلی‌متر بر ساعت صورت گرفته است. برای مش‌بندی خاک نیز از المان هشت‌گره‌ی خطی (C3D8P) که از گروه فشار آب حفره‌ای- تنش می‌باشد، استفاده شده است.

تنش پیش‌تحکیمی خاک مورد بررسی ۶۰۰ کیلو پاسکال است که با فرض نسبت پیش‌تحکیمی ۲ و ۳، تنش اولیه‌ی خاک به ترتیب برابر ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال بوده است. هم‌چنین دمای اولیه ۲۲ درجه و دمای ثانویه ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد فرض شده است.

### مدل‌سازی عددی شمع حرارتی

برای شبیه‌سازی رفتار شمع حرارتی، هندسه‌ی شمع به صورت یک استوانه به قطر یک متر و ارتفاع ۲۶ متر (شکل ۴) و هندسه‌ی خاک اطراف آن به صورت یک توده‌ی خاک چند لایه به طول و عرض ۲۰ متر و ارتفاع ۵۲ متر در نظر گرفته شده است. ضخامت و نام‌گذاری لایه‌های خاک مطابق شکل (۵) می‌باشد.

مشخصات مکانیکی، حرارتی و هیدرولیکی لایه‌های مختلف خاک و هم‌چنین مشخصات مکانیکی و حرارتی بتن در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل ۴ هندسه‌ی مدل شمع حرارتی و خاک



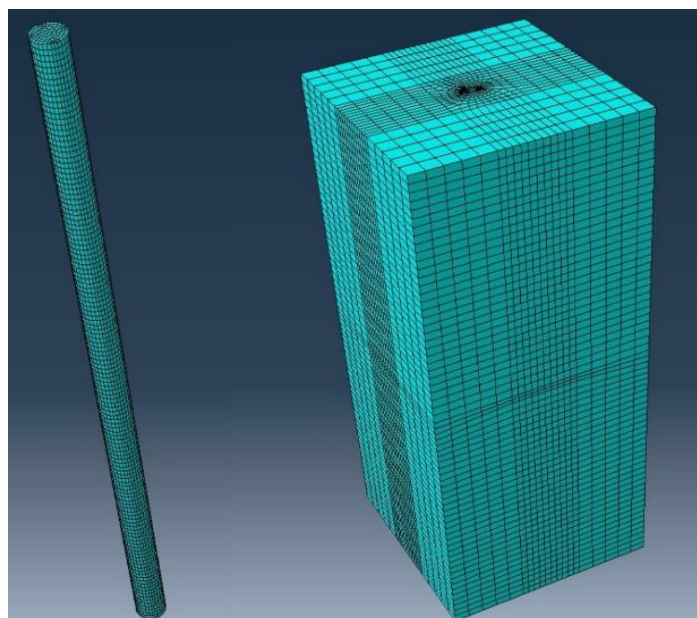
شده‌است. دمای اولیه‌ی خاک نیز ۱۳,۶ درجه درنظر گرفته شده‌است. برای مش‌بندی شمع از المان‌های هشت‌گرمی خطی از گروه فشار آب حفره‌ای، تنش (C3D8P) تشکیل شده‌است (شکل ۶).

جدول ۳ مشخصات شمع و لایه‌های خاک براساس مدل رفتاری دراگر- پراگر در مدل شمع حرارتی [18]

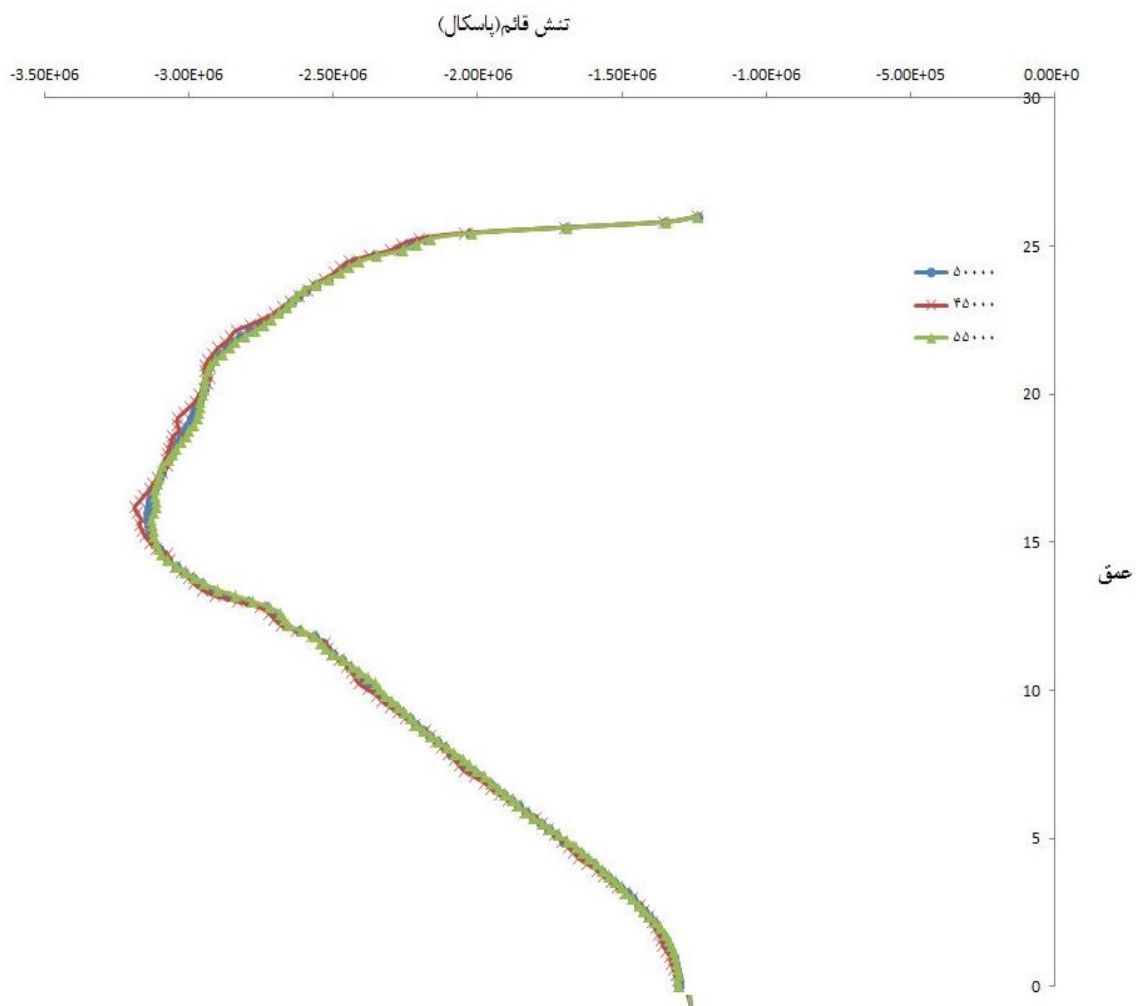
ضریب انبساط حرارتی	ظرفیت گرمایی	رسانایی حرارتی	چسبندگی	زاویه اصطکاک	مدول برشی	مدول بالک	نفوذپذیری	تخلخل	وزن مخصوص	لایه‌های خاک
$\beta'_s$	$\rho_c$	$\lambda$	c	$\phi$	G	K	$K^*$	$\eta$	$\rho$	خاک
$^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\text{J}/\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}}$	kPa	( $^{\circ}$ )	MPa	MPa	$\frac{\text{m}}{\text{sec}}$		$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
$10^{-5}$	$2.4 \times 10^6$	1.8	5	30	113	122	$2 \times 10^{-6}$	0.1	2000	A1
$10^{-5}$	$2.4 \times 10^6$	1.8	3	27	113	122	$7 \times 10^{-7}$	0.1	1950	A2
$10^{-4}$	$2.4 \times 10^6$	1.8	6	23	1000	59	$1 \times 10^{-6}$	0.35	2000	B
$10^{-4}$	$2.4 \times 10^6$	1.8	20	27	1400	83	$1 \times 10^{-6}$	0.3	2200	C
$10^{-6}$	$2 \times 10^6$	1.1	-	-	550-2800	620-3300	-	-	2550	D
$10^{-5}$	$2 \times 10^6$	2.1	-	-	14313	17381	-	-	2500	شمع

جدول ۴ مشخصات لایه‌ی سوم خاک براساس مدل رفتاری تورچی [28] در مدل شمع حرارتی

c	D	C	n	$\chi$	$GA/p'0$	$\kappa A$	$\lambda$	M	لایه‌ی خاک
0.82	5	0.14	0	0.25	100	0.05	0.102	0.82	لایه‌ی B



شکل ۶ مش‌بندی مدل شمع حرارتی و خاک



شکل ۷ نمودار مربوط به آنالیز حساسیت تأثیر ابعاد مش، برای سه حالت مختلف (با تعداد المان‌های ۴۵۰۰۰، ۵۰۰۰۰ و ۵۵۰۰۰) بر مقدار تنش قائم

به دست آمده از آنها با داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی موجود در تحقیقات گذشته مقایسه شده است که جزئیات هر کدام در دو قسمت آورده شده است.

### آزمایش سه محوری CD

برای صحت‌سنجی سابروتین یومت نوشته شده‌ی نمودارهای تنش- کرنش و کرنش حجمی- کرنش محوری به دست آمده از مدل آزمایش سه محوری CD در شرایط ۲۲ درجه و ۹۰ درجه با نسبت پیش‌تحکیمی ۲ و ۳، با داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط چکرواک و لالویی [7] مقایسه شده است که در ادامه نتایج مربوط

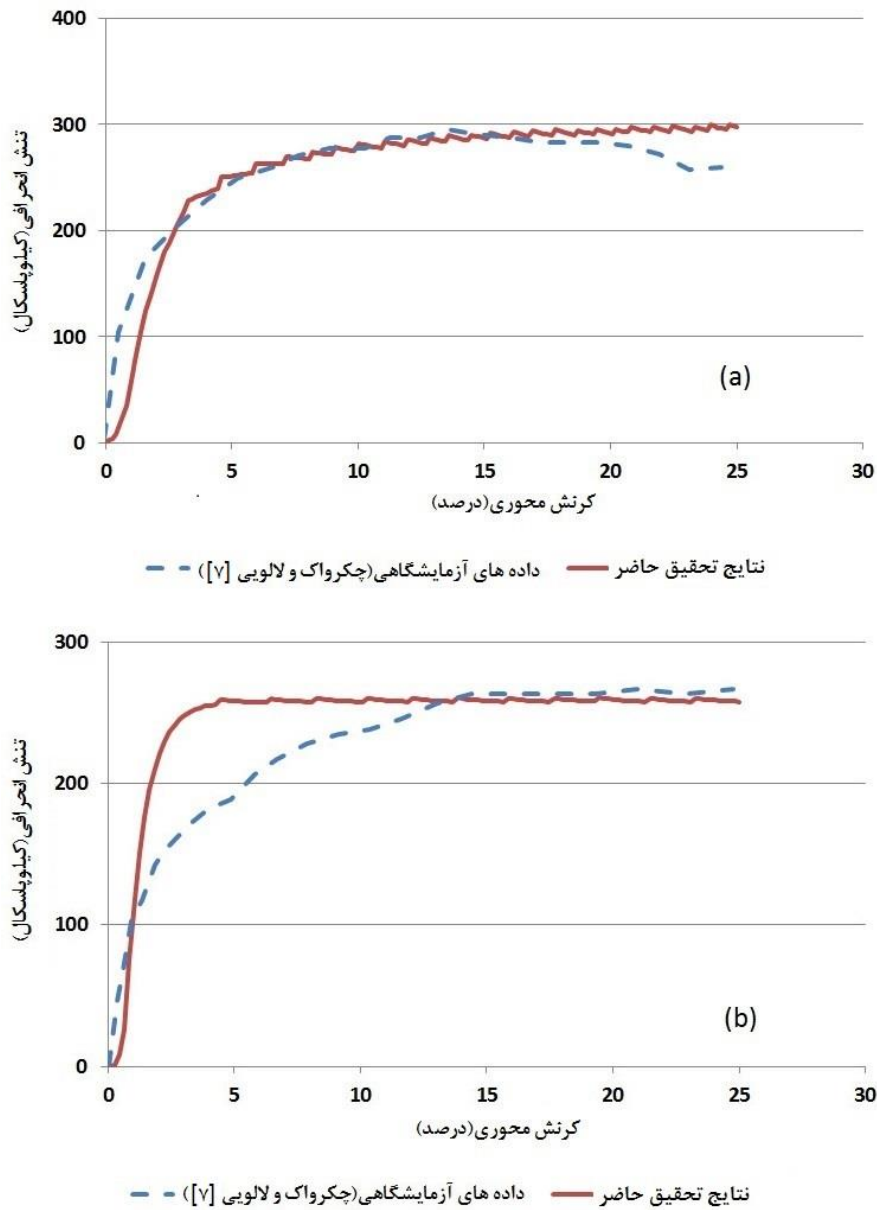
همچنین در شکل (۷) نتایج آنالیز حساسیت تأثیر ابعاد مش، برای سه حالت مختلف (با تعداد المان‌های ۴۵۰۰۰، ۵۰۰۰۰ و ۵۵۰۰۰) بر مقدار تنش قائم آمده است (تعداد المان‌ها رند شده است). همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر سائز مش‌بندی تغییری در مسئله و روند آن ایجاد نمی‌کند. البته بدیهی است تغییرات قابل توجه در اندازه‌ی مش‌ها می‌تواند باعث عدم هم‌گرایی و ناپایداری در حل مسئله گردد.

### صحت‌سنجی

به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی‌های انجام شده نتایج

حاضر توانسته در دمای ۲۲ درجه و ۹۰ درجه میزان مقاومت برشی خاک را به خوبی پیش بینی کند، اما در دمای ۲۲ درجه در قسمت سخت‌شوندگی نمودار ضعف‌هایی مشاهده می‌شود.

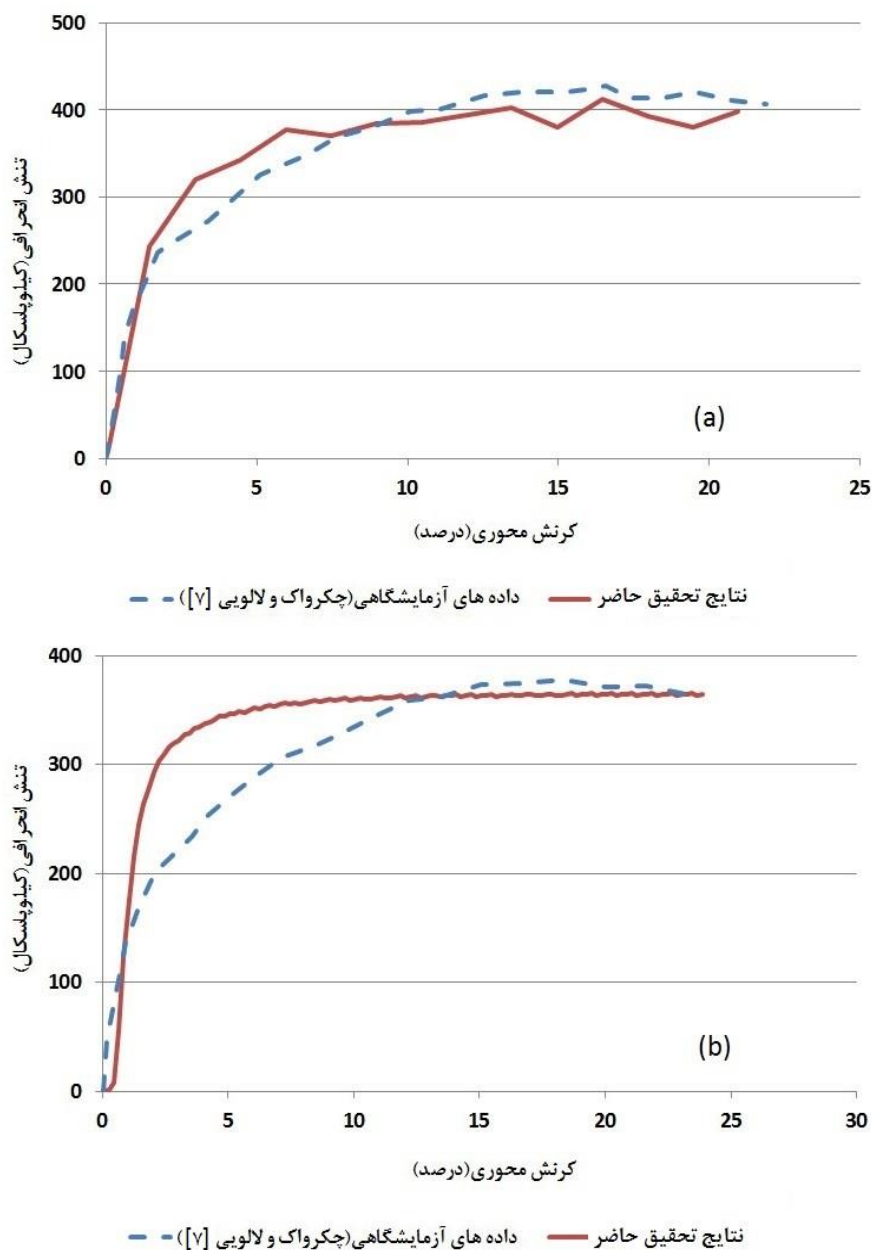
به نمودارهای تنش- کرنش ارائه شده است. در شکل (۸) نتایج با نسبت پیش‌تحکیمی ۳ در دمای ۲۲ و ۹۰ درجه نشان داده شده است. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی حاضر نشان می‌دهد که مدل رفتاری استفاده‌شده در تحقیق



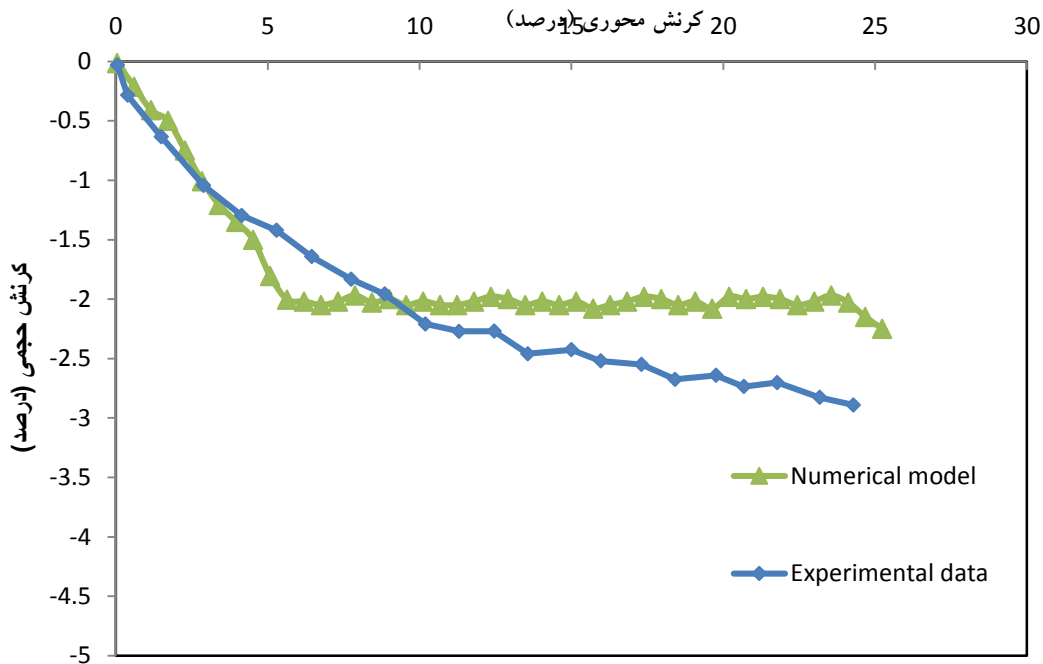
شکل ۸ نمودار تنش- کرنش مدل عددی حاضر برای خاک با نسبت پیش‌تحکیمی ۳: (a) دمای ۹۰ درجه، (b) دمای ۲۲ درجه

حجمی - کرنش محوری به منظور صحت‌سنجی مدل عددی حاضر برای خاک با نسبت پیش‌تحکیمی ۲ و در دمای ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در شکل (۱۰) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مجموع نتیجه‌ی به‌دست‌آمده رضایت‌بخش می‌باشد.

نمودار تنش - کرنش خاک در دمای ۲۲ و ۹۰ درجه با نسبت پیش‌تحکیمی ۲ در شکل (۹) آمده است. با توجه به شکل (۹) می‌توان دریافت که سایرترین نوشته‌شده دارای توانایی مناسب برای پیش‌بینی رفتار ترمومکانیکی خاک رس اشباع در نسبت پیش‌تحکیمی و دمای متفاوت بوده است. هم‌چنین نمودار کرنش



شکل ۹ نمودار تنش - کرنش مدل عددی حاضر برای خاک با نسبت پیش‌تحکیمی ۲: (a) دمای ۹۰ درجه، (b) دمای ۲۲ درجه



شکل ۱۰ نمودار کرنش حجمی - کرنش محوری به منظور صحت‌سنجی مدل عددی حاضر برای خاک با نسبت پیش‌تحکیمی ۲ و در دمای ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد

### صحت‌سنجی در تحلیل شمع حرارتی

به منظور صحت‌سنجی عملکرد سابروتین نوشته شده در تحلیل شمع حرارتی، نتایج با داده‌های عددی و صحرایی گزارش شده توسط لالویی و همکاران [18] مقایسه شده است.

در شکل (۱۱) مقادیر تنش قائم در طول شمع تحت بار مکانیکی ۱۳۰۰ کیلونیوتن براساس نتایج صحرایی و عددی گزارش شده توسط لالویی و همکاران [18] و همچنین نتایج به دست آمده از مدل حاضر با استفاده از سه مدل رفتاری دراکر-پراگر، کم‌کلی اصلاح شده و تورچی [28] آورده شده است.

همان‌طور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود هنگامی که شمع حرارتی تحت بار مکانیکی خالص قرار گرفته است، مقایسه‌ی نتایج عددی و صحرایی نشان می‌دهد که در لایه‌ی B استفاده از مدل رفتاری ترمومکانیکی تورچی [28] و کم‌کلی اصلاح شده نتایج بهتری نسبت به مدل رفتاری مکانیکی دراکر-پراگر

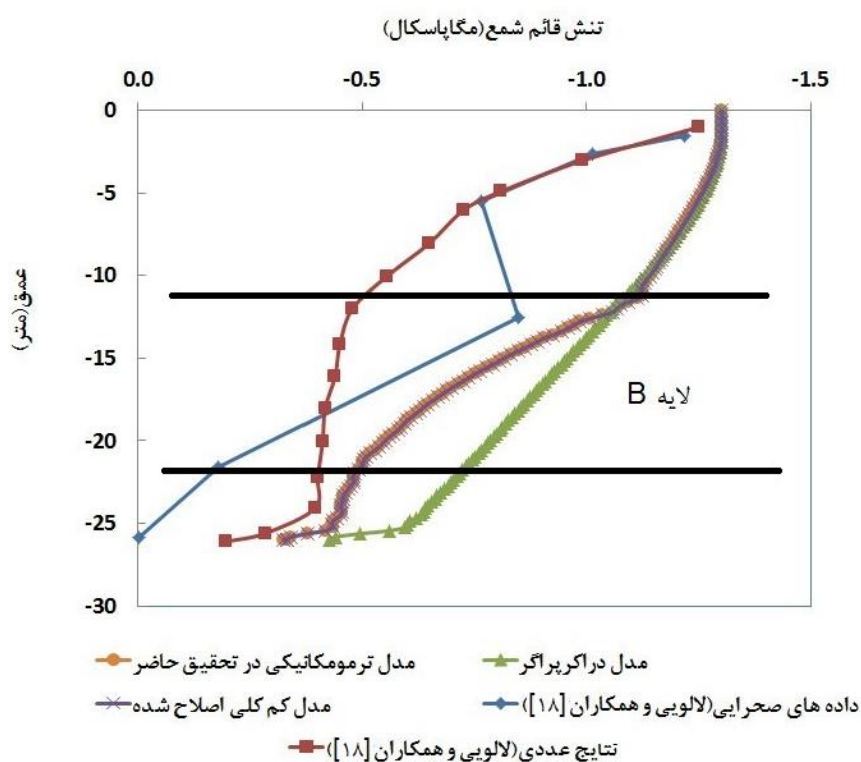
داشته است.

شکل (۱۲) تنش قائم ایجاد شده در طول شمع در پایان فاز گرمایش یک تحکیم ۲۸ روزه تحت بار حرارتی ۱۳ درجه را طبق مطالعات لالویی و همکاران [18] و نتایج مدل‌سازی حاضر نشان داده است.

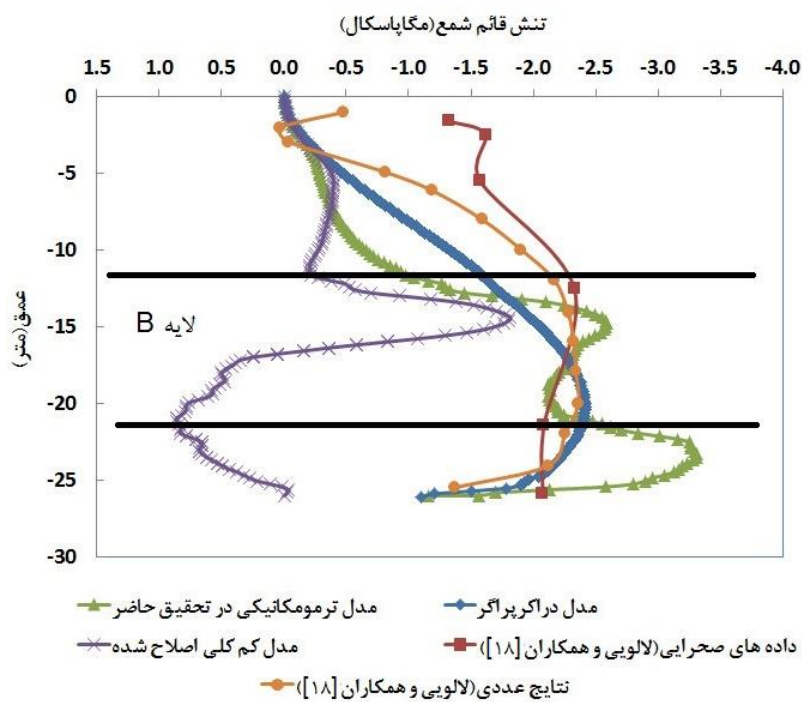
طبق شکل (۱۲) که تنش قائم شمع تحت بار حرارتی را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که مدل رفتاری تورچی [28] نسبت به مدل رفتاری دراکر-پراگر و کم‌کلی اصلاح شده توانایی مناسب‌تری برای پیش‌بینی تنش قائم شمع داشته است. همچنین برخلاف نیمه‌ی اول لایه‌ی B، در نیمه‌ی دوم آن مدل رفتاری تورچی [28] نتایج بهتری را حتی نسبت به مدل رفتاری ترمومکانیکی دراکر-پراگر که توسط لالویی و همکاران [18] مورد استفاده قرار گرفته است ارائه کرده است.

نتایج به دست آمده از مدل‌سازی حاضر و مطالعات لالویی و همکاران [18] مربوط به تنش قائم در طول شمع تحت بارگذاری هم‌زمان ۱۳۰۰ کیلونیوتن بار

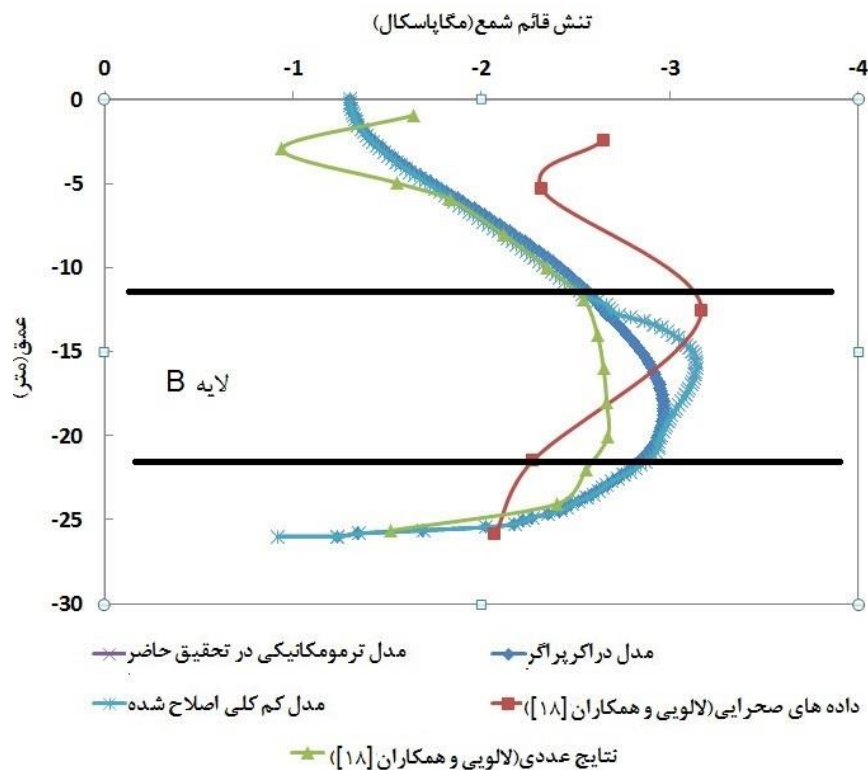
مکانیکی و ۱۳ درجه بار حرارتی در روز ۱۲ یک فرآیند تحکیم ۲۸ روزه در شکل (۱۳) آمده‌است.



شکل ۱۱ تنش قائم در طول شمع تحت بار مکانیکی ۱۳۰۰ کیلو نیوتن



شکل ۱۲ تنش قائم در طول شمع تحت بار حرارتی ۱۳,۴ درجه



شکل ۱۳ تنش قائم در طول شمع تحت بار مکانیکی ۱۳۰۰ کیلو نیوتن و بار حرارتی ۱۳,۴ درجه

تورچی [28] نسبت به مدل مکانیکی کم کلی اصلاح شده تغییری در نتایج به دست آمده ایجاد نکرده است. همچنین همان طور که قبلاً اشاره شد، آنالیز حساسیت مش در مدل شمعی حرارتی انجام شده و تغییر در اندازه‌ی مش‌ها تأثیر قابل توجهی در نتایج نداشته است.

### نتایج و بحث

به منظور بررسی بیشتر تأثیر مدل رفتاری خاک بر رفتار شمعی حرارتی و خاک مجاور آن، خروجی‌های مربوط به مؤلفه‌های قائم و شعاعی تنش و کرنش به وجود آمده در شمعی و خاک مجاور آن در لایه‌ی B استخراج شده است. در شکل (۱۴) تنش‌های قائم و شعاعی به وجود آمده در خاک مجاور شمعی در پایان فاز گرمایش بارگذاری تراومکانیکی آورده شده است. همچنین کرنش‌های قائم و شعاعی به وجود آمده در خاک مجاور شمعی نیز در شکل (۱۵) قابل مشاهده است. همان طور که در شکل (۱۴) مشخص است تغییر

به طور کلی بیشینه تنش قائم موجود در شمعی یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی شمعی‌ها می‌باشد. بر این اساس پیش‌بینی بیشینه تنش قائم در تحلیل دقیق‌تر شمعی‌های حرارتی دارای اهمیت بسیاری است. با توجه به شکل (۱۳) می‌توان دریافت که بیشینه تنش قائم شمعی تحت بارگذاری هم‌زمان مکانیکی و حرارتی در لایه‌ی B خاک رخ داده است که استفاده از مدل رفتاری کم کلی اصلاح شده و تورچی [28] در این لایه باعث افزایش قابل توجه هم‌خوانی نتایج عددی و صحرایی نسبت به زمانی که مدل رفتاری دراکر-پراگر توصیف رفتار خاک در این لایه را بر عهده دارد، شده است.

با توجه به قسمت اول صحت‌سنجی، می‌توان دریافت که مدل رفتاری تراومکانیکی تورچی [28] به درستی به نرم‌افزار آباکوس اضافه شده است. نتایج موجود در قسمت دوم هم تأثیر قابل توجه مدل رفتاری خاک در بررسی رفتار شمعی‌های حرارتی را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که استفاده از مدل رفتاری تراومکانیکی

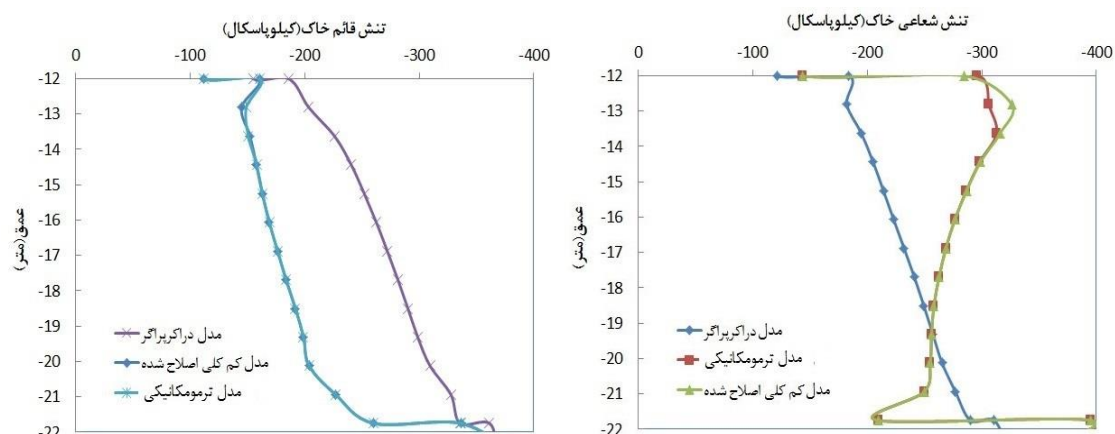
به وجود آمده در شمع حرارتی برای خاک لایه‌ی B، با استفاده از مدل رفتاری تورچی [28] نسبت به حالت استفاده از مدل رفتاری دراکر- پراگر بیشتر شده، در شکل (۱۶) هم تنش شعاعی موجود در شمع حرارتی در همان لایه با استفاده از کد یومت بیشتر از مدل رفتاری دراکر- پراگر به دست آمده است. هم چنین نتایج مدل مکانیکی کم کلی اصلاح شده تغییر قابل توجهی نسبت به مدل رفتاری تورچی [28] نداشته است.

هم چنین میزان تأثیر مدل رفتاری خاک بر کرنش‌های شعاعی و قائم شمع نیز در شکل (۱۷) آمده که باتوجه به آن می‌توان دریافت که مدل رفتاری خاک مجاور شمع تأثیر نسبتاً کمی در مؤلفه‌های کرنش شمع حرارتی داشته است.

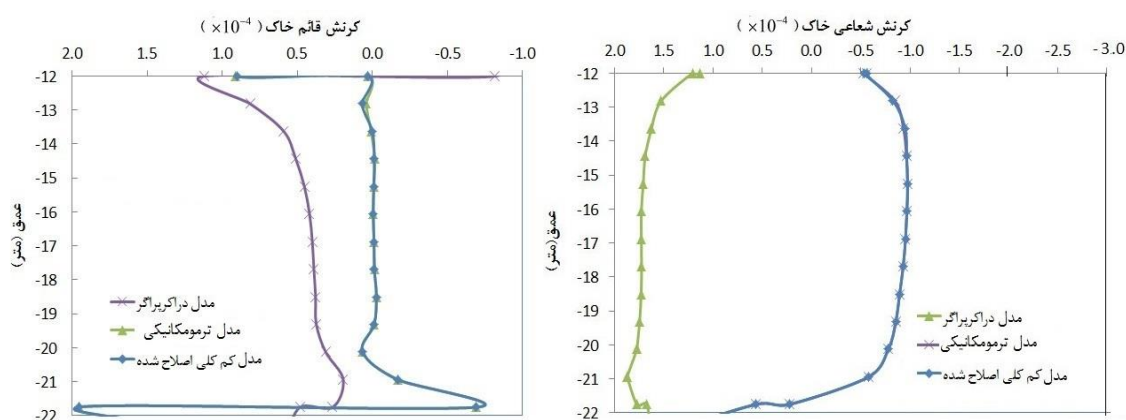
مدل رفتاری خاک باعث تغییر تنش شعاعی و قائم خاک مجاور شمع حرارتی شده به نحوی که این تغییر در بعضی نقاط به ۱۰۰ کیلو پاسکال هم رسیده است، اما تفاوتی میان مدل مکانیکی کم کلی اصلاح شده و ترمومکانیکی تورچی [28] وجود ندارد. هم چنین باتوجه به شکل (۱۵) می‌توان تغییر میزان کرنش شعاعی و قائم خاک ناشی از تغییر مدل رفتاری خاک مجاور شمع حرارتی را ملاحظه کرد.

شکل (۱۶) تغییرات تنش شعاعی در طول شمع حرارتی تحت بارگذاری هم‌زمان حرارتی به میزان ۱۳٫۴ درجه و مکانیکی به اندازه‌ی ۱۳۰۰ کیلونیوتن را نشان داده است.

مشاهده می‌شود همان‌طور که میزان تنش قائم

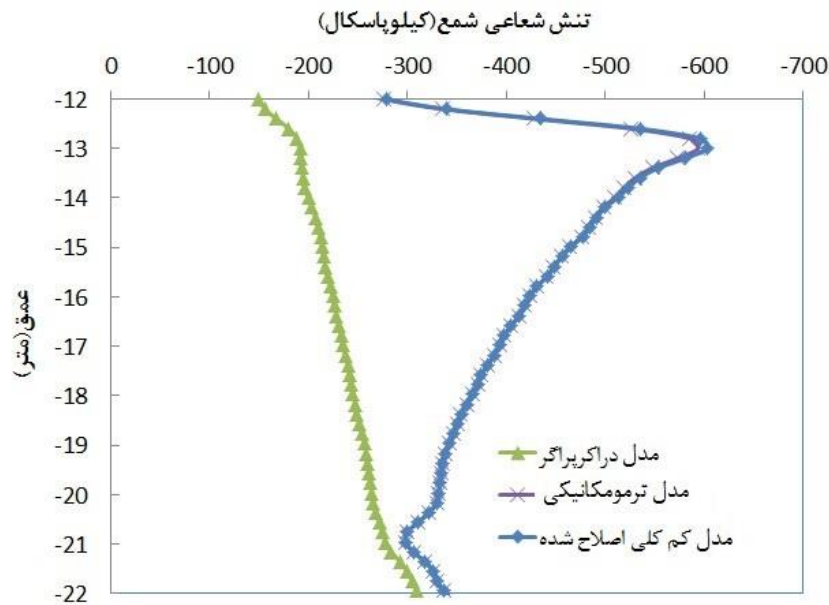


شکل ۱۴ تنش‌های قائم و شعاعی در خاک مجاور شمع در پایان فاز گرمایش بارگذاری ترمومکانیکی

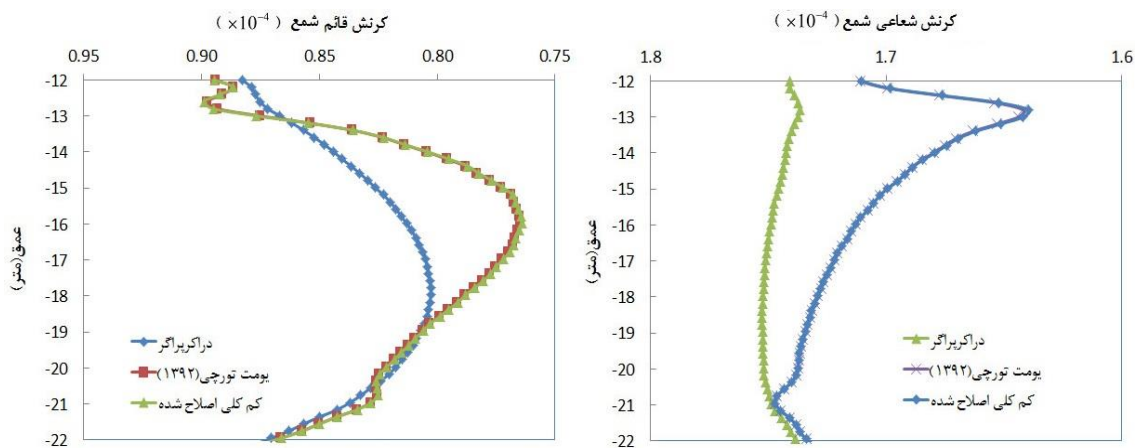


شکل ۱۵ کرنش‌های قائم و شعاعی در خاک مجاور شمع در پایان فاز گرمایش بارگذاری ترمومکانیکی





شکل ۱۶ تنش شعاعی در طول شمع حرارتی در پایان فاز گرمایش بارگذاری ترمومکانیکی



شکل ۱۷ کرش های قائم و شعاعی در طول شمع حرارتی در پایان فاز گرمایش بارگذاری ترمومکانیکی

زیر به دست آمده است:

۱. در مدل رفتاری ترمومکانیکی تورچی [28] پارامترهای الاستیک تأثیر کمی بر تنش تسلیم دارد و پارامترهای اضافه شده به تابع تسلیم مدل رفتاری کم کلی اصلاح شده در رفتار خاک بسیار تأثیرگذار بوده است.
۲. مدل رفتاری انتخاب شده برای خاک مجاور شمع حرارتی در تحلیل عملکرد شمع حرارتی مؤثر بوده و نتایج عددی حاصل از مدل رفتاری ترمومکانیکی تورچی [28] و کم کلی اصلاح شده نسبت به مدل

### نتیجه گیری

تحقیق عددی حاضر شامل مطالعه پارامتری روی مدل رفتاری ترمومکانیکی تورچی [28] و هم چنین بررسی عملکرد شمع حرارتی تحت بارگذاری حرارتی و مکانیکی با استفاده از مدل های رفتاری مکانیکی و ترمومکانیکی می باشد. برای اضافه کردن مدل رفتاری ترمومکانیکی از قابلیت سابرویتن نویسی در نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده شد و دو مدل سه بعدی آزمایش سه محوری و شمع حرارتی تهیه شد. بر این اساس نتایج

- رفتاری مکانیکی دراکر- پراگر به نتایج صحرایی نزدیک‌تر بوده است.
۳. به علت مقدار کم تنش به وجود آمده در خاک اطراف شمع و تغییر دمای کم خاک، تفاوت قابل توجهی میان نتایج مدل ترمومکانیکی تورچی [28] و مدل مکانیکی کم‌کلی اصلاح شده وجود ندارد.
۴. مؤلفه‌های شعاعی و قائم تنش و کرنش خاک اطراف شمع حرارتی و هم‌چنین تنش قائم و شعاعی شمع حرارتی متأثر از مدل رفتاری خاک اطراف شمع است، اما تغییر در مدل رفتاری خاک اطراف شمع، تغییر قابل توجهی در کرنش‌های شعاعی و قائم شمع ایجاد نمی‌کند.

## مراجع

1. Saggi, R., and Chakraborty, T., "Thermomechanical Response of Geothermal Energy Pile Groups in Sand", *International Journal of Geomechanics*, Vol. 16(4), Pp. 040151001-13, (2016).
2. Xiong, Y. -I., et al., "A Unified Thermal-hardening and Thermal-softening Constitutive Model of Soils", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 74, Pp. 73-84, (2019).
3. YAO, Y. P., and ZHOU, A. N., "Non-isothermal Unified Hardening Model: A Thermo-elasto-plastic Model for Clays", *Géotechnique*, Vol. 63(15), Pp. 1328-1345, (2013).
4. Cui, Y. J., Sultan, N., and Delage, P., "A Thermomechanical Model for Saturated Clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37(3), Pp. 607-620, (2000).
5. Chiu, S. L., "Behaviour of Normally Consolidated Clay at Elevated Temperature", University of Sydney, Sydney, Australia (1996).<sup>۱</sup>
6. Burghignoli, A., Desideri, A., and Miliziano, S., "Deformability of Clays under Non Isothermal Conditions", *RIG*, Vol. 4, Pp. 92, (1992).
7. Cekerevac, C., and Laloui, L., "Experimental Study of Thermal Effects on the Mechanical Behaviour of a Clay", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 28(3), Pp. 209-228, (2004).
8. Moritz, L., "Geotechnical Properties of Clay at Elevated Temperatures", in SGI Rapport, Report No. 276, Sweden (1995).
9. Krishnan, J. M., et al., "Thermomechanical Framework for the Constitutive Modeling of Asphalt Concrete", *International Journal of Geomechanics*, Vol. 6(1), Pp. 36-45, (2006).
10. Towhata, I., et al., "Volume Change of Clays Induced by Heating as Observed in Consolidation Tests", *soils and foundations*, Vol. 33(4), Pp. 170-183, (1993).
11. Robinet, J. C., et al., "A Constitutive Thermomechanical Model for Saturated Clays", *Engineering Geology*, Vol. 41(1), Pp. 145-169, (1996).
12. Wang, L. Z., Wang, K. J., and Hong, Y., "Modeling Temperature-Dependent Behavior of Soft Clay", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 142(8), Pp. 040160541-13, (2016).

13. Graham, J., et al., "Modified Cam-Clay Modelling of Temperature Effects in Clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38(3), Pp. 608-621, (2001).
14. Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., and Bouazza, A., "Thermally Induced Volume Change and Excess Pore Water Pressure of Soft Bangkok Clay", *Engineering Geology*, Vol. 89(1), Pp. 144-154, (2007).
15. Hamidi, A., and Khazaei, C., "A Thermo-mechanical Constitutive Model for Saturated Clays", *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 4(4), Pp. 445-459, (2010).
16. Hong, P. Y., et al., "On Some Advanced Thermo-mechanical Models for Saturated Clays", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 37(17), Pp. 2952-2971, (2013).
17. Hong, P. Y., et al., "A Two-surface Thermomechanical Model for Saturated Clays", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 40(7), Pp. 1059-1080, (2016).
18. Laloui, L., Nuth, M., and Vulliet, L., "Experimental and Numerical Investigations of the Behaviour of a Heat Exchanger Pile", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 30(8), Pp. 763-781, (2006).
19. Tri, N. V., et al., "Long-term Thermo-mechanical Behaviour of Energy Piles in Clay", *Environmental Geotechnics*, Vol. 0(0), Pp. 1-12, (2020).
20. Khodaparast, M., Kiani, M., and Bayesteh, H., "Numerical Study of Bearing Capacity and Consolidation Settlement of Energy Piles in Fine-grained Soils", in *Energy Geotechnics, Proceedings of the 1st International Conference on Energy Geotechnics*, Pp.57, ICEGT, (2016).
21. Saggiu, R., and Chakraborty, T., "Thermomechanical Analysis and Parametric Study of Geothermal Energy Piles in Sand", *International Journal of Geomechanics*, Vol. 17(9), Pp. 04017076, (2017).
22. Ma, Q., et al., "An Approach for Modelling Volume Change of Fine-grained Soil Subjected to Thermal Cycles", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 54(6), Pp. 896-901, (2017).
23. Tsetoulidis, C., Naskos, A., and Georgiadis, K., "Numerical Investigation of the Mechanical Behaviour of Single Energy Piles and Energy Pile Groups", in *Energy Geotechnics, CRC Press Boca Raton, FL, USA*. Pp. 569-575, (2016).
24. Di Donna, A., Rotta Loria, A. F., and Laloui, L., "Numerical Study of the Response of a Group of Energy Piles under Different Combinations of Thermo-mechanical Loads", *Computers and Geotechnics*, Vol. 72, Pp. 126-142, (2016).
25. AMATYA, B. L., et al., "Thermo-mechanical Behaviour of Energy Piles", *Géotechnique*, Vol. 62(6), Pp. 503-519, (2012).
26. Akrouch, G. A., Sánchez, M., and Briaud, J. -L., "Thermo-mechanical Behavior of Energy Piles in High Plasticity Clays", *Acta Geotechnica*, Vol. 9(3), Pp. 399-412, (2014).
27. Nguyen, V. T., Tang, A. M., and Pereira, J.-M., "Long-term Thermo-mechanical Behavior of Energy

Pile in Dry Sand", *Acta Geotechnica*, Vol. 12(4), Pp. 729-737, (2017).

28. تورچی، سعید، "ارائه یک مدل رفتاری ترمومکانیکی برای خاکهای رسی غیر اشباع" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی تهران، (۱۳۹۲)

29. Sadrnejad, s. a., "Soil Plasticity and Modeling". دوم ed. tehran: k.n. toosi university of technology, pp. 285-307 (1394).