

ارزیابی عددی اثر دما در مقاومت سطح
مشترک با رویکرد شمع‌های حرارتی

بهناز اسدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد امیرکیانی فردویی (دانشجوی دکتری)

محمد علیایی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

انرژی زمین‌گرمایی یکی از منابع نامحدود انرژی در سطح جهان است. یکی از راه‌های برداشت انرژی مذکور، استفاده از شمع‌های حرارتی است که علاوه بر انتقال بار سازی بالایی، وظیفه‌ی انتقال حرارت بین زمین و ساختمان را دارند. از این رو توده‌ی خاک و شمع متحمل بارهای حرارتی می‌شوند که می‌توانند مشخصه‌های مکانیکی و مقاومتی سطح مشترک خاک و شمع را تحت تأثیر قرار دهند. به همین منظور، برای بررسی تأثیر دما در مقاومت سطح مشترک خاک و شمع، مجموعه‌ی آزمایش‌های برش مستقیم به صورت تحلیل همبسته‌ی ترموهیدرومکانیکی، برای اولین بار در نرم‌افزار المان محدود آباکوس بررسی شده است. در مدل‌سازی انجام شده، تغییرات مقاومت برشی سطح مشترک خاک رس ایلیت و بتن تحت تأثیر بار مکانیکی و ترمومکانیکی بررسی شده است. اصلی‌ترین نتیجه‌ی پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با افزایش دما به میزان 5° درجه‌ی سانتی‌گراد، مقاومت سطح مشترک خاک و شمع به طور متوسط به اندازه‌ی 2° کیلوپاسکال افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: انرژی زمین‌گرمایی، شمع حرارتی، آزمایش برش مستقیم، رفتار ترموهیدرومکانیکی، سطح مشترک خاک و شمع، آباکوس.

۱. مقدمه

بتن‌ریزی صورت می‌گیرد.^[۵] اجزاء شمع حرارتی در شکل ۱ مشاهده می‌شوند. شمع‌های حرارتی در طول عمر بهره‌برداری خود، تحت بار سیکلی گرمایش و سرمایش قرار می‌گیرند.^[۷] این بارگذاری حرارتی باعث ایجاد انبساط و انقباض در طول سطح مشترک^۱ شمع و خاک می‌شود. از این رو مشخصه‌های سطح مشترک، مانند مقاومت برشی در اثر این بارگذاری حرارتی تغییر می‌کند.^[۹] سطح مشترک خاک و شمع، لایه‌ی نازکی از خاک است که تحت تأثیر شرایط مرزی مشخصی نسبت به توده‌ی خاک دورتر قرار می‌گیرد. از این رو به منظور بررسی تأثیر دما در مشخصه‌های سطح مشترک خاک و شمع مانند مقاومت برشی، پژوهشگران مختلفی پس از اصلاح دستگاه آزمایش برش مستقیم، تأثیر بارگذاری حرارتی را بررسی کرده‌اند.^[۱۰،۶]

دی دونتا^۲ (۲۰۱۴) دستگاه آزمایش برش مستقیم جدیدی را ارتقاء داد،^[۱۲] و آزمایش مذکور را در دو حالت مکانیکی و ترمومکانیکی بر روی نمونه‌های خاک - خاک و خاک - بتن مطابق با استاندارد آزمایش برش مستقیم (ASTM D۳۰۸۰) انجام داد. وی ابتدا آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌ی خاک - خاک و خاک - بتن را در حالت مکانیکی برای ۳ سربار مختلف 5° ، 10° و 15° کیلوپاسکال انجام داد و سپس روند تغییرات مقاومت برشی در سطح مشترک نمونه‌ها را بررسی کرد. در آزمایش‌های اخیر، نمونه‌ی بتنی در نیم جعبه‌ی پایینی و نمونه‌ی خاک در

امروزه سرعت صنعتی شدن جهان با وجود تمام مزیت‌هایش با پیامدهای نامطلوبی همراه است. استفاده از انرژی‌های تجدیدناپذیر، آلودگی محیط زیست، دشواری‌های حمل و نقل، و هزینه‌های سرسام‌آور تأمین انرژی، جامعه‌ی امروزی را به سمت استفاده از منابع تجدیدپذیر سوق داده است. استفاده از سوخت‌های فسیلی همچون نفت، زغال سنگ و گازهای طبیعی منجر به آثار زیست‌محیطی منفی شده است. امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر با استقبال چشمگیری مواجه شده و فناوری‌های جدیدی در این راستا ظهور کرده است. یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی زمین‌گرمایی است. مطالعات نشان می‌دهند که دمای خاک در تمام فصول سال از عمقی به بعد، یک مقدار ثابت دارد.^[۱] در نتیجه می‌توان از خاک به عنوان منبع تبادل حرارتی و گرمایش سرمایش ساختمان استفاده کرد.^[۲] از جمله راه‌های برداشت انرژی زمین‌گرمایی، استفاده از پی‌های شمعی ساختمان‌هاست.^[۱] فناوری اخیر، نقش‌سازی شمع را با نقش مبادله‌گر حرارتی ترکیب می‌کند. عملکرد سیستم حرارتی اشاره شده به این صورت است که لوله‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا به قفسه‌ی آرماتور بسته می‌شوند و سپس با جایگذاری قفس آرماتور داخل محل حفر شده،

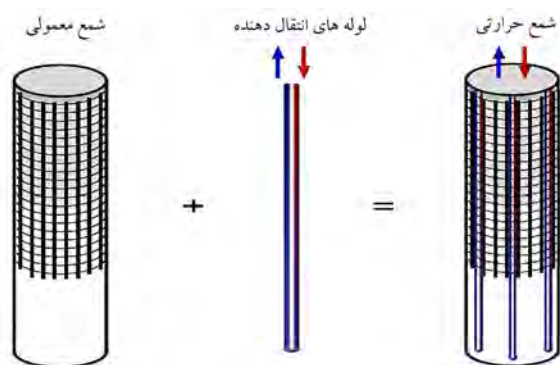
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۲/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۹/۷/۲۷، پذیرش ۱۳۹۹/۸/۱۸

DOI:10.24200/J30.2020.55583.2750

Archive of SID

بار حرارتی تأثیرگذار است. با توجه به مطالعات پیشین مشاهده می‌شود که تغییرات دما در شمع‌های حرارتی، مقاومت سطح مشترک خاک و شمع را بهبود می‌دهد و باعث افزایش مقاومت برشی و مشخصه‌های آن می‌شود. لازم به ذکر است که دما در خاک‌های مختلف اثر متفاوتی دارد و نوع خاک در آن حائز اهمیت است. با توجه به اینکه ارائه‌ی روش‌های آزمایشگاهی نیازمند تجهیزات پیچیده و گران‌قیمتی است، از این رو هدف از پژوهش حاضر، ارائه‌ی یک مدل‌سازی عددی برای بررسی تأثیر دما در رفتار ترمومکانیکی سطح مشترک خاک و شمع بوده است. برای بررسی تأثیر رفتار اخیر، آزمایش برش مستقیم به صورت عددی مدل‌سازی شده است.



شکل ۱. اجزاء شمع حرارتی.

۲. مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

در پژوهش حاضر، برای اولین بار مطالعه‌ی عددی رفتار سطح مشترک خاک - بتن تحت اثر دما بررسی شده است. برای کالیبره و صحت‌سنجی روش به کار رفته در پژوهش حاضر، از مطالعات دی دوننا (۲۰۱۴) استفاده شده است.^[۱۲] همچنین در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۶ نسخه‌ی ۲۰۱۸ استفاده شده است. مدل‌سازی در سه حالت برش مستقیم مکانیکی خاک - خاک، برش مستقیم مکانیکی خاک - بتن و برش مستقیم ترمومکانیکی خاک - بتن در ۳ سربار مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال و بارگذاری حرارتی ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شده است.

۱.۲. مدل‌سازی سطح مشترک خاک و بتن

در هر اثر متقابل خاک و سازه، حرکت نسبی سازه در مقابل خاک اتفاق می‌افتد. استفاده از المان‌های پیوسته در تحلیل اجزاء محدود مانع از حرکت نسبی در سطح مشترک خاک و شمع می‌شود. روش‌های مختلفی جهت مدل کردن سطح مشترک خاک و سازه در تحلیل اجزاء محدود وجود دارد که بدین شرح توضیح داده شده‌اند:

۱. استفاده از المان‌های پیوسته‌ی نازک با قوانین استاندارد سازگاری. معمولاً نسبت ارتفاع به ضخامت المان مذکور بین ۳ و ۱۰ در نظر گرفته می‌شود.^[۱۷، ۱۶]
۲. اتصال المان‌ها به نحوی که فقط اتصال بین گره‌های مخالف در نظر گرفته شود. معمولاً گره‌های مخالف توسط فنرهای گسسته به هم متصل می‌شوند.^[۱۹، ۱۸]
۳. رابط ویژه^۷ یا المان‌های گره‌بی با ضخامت صفر و محدود.^[۲۱، ۲۰]
۴. روش‌های هیبریدی که در آن خاک و سازه به صورت جداگانه مدل می‌شوند و از طریق معادلات خاصی به جهت حفظ سازگاری نیرو و جابه‌جایی به هم متصل می‌شوند.^[۲۳، ۲۲]

در میان روش‌های ذکر شده، روش اول کاربرد بیشتری دارد. از این رو در پژوهش حاضر به جهت مدل‌سازی سطح مشترک خاک و بتن از یک المان پیوسته‌ی نازک با قوانین استاندارد سازگاری به ارتفاع ۲ میلی‌متر استفاده شده است.

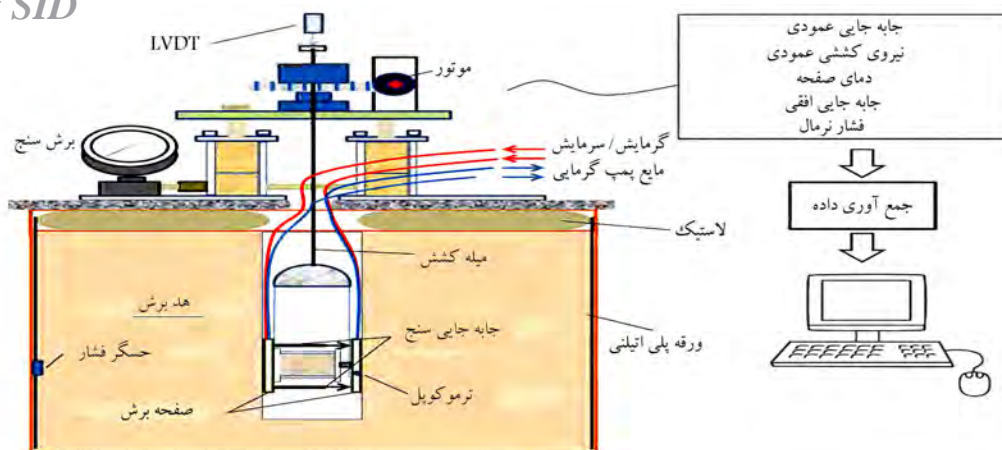
۲.۲. مدل‌سازی آزمایش برش مستقیم مکانیکی خاک - خاک

در پژوهش حاضر، ابتدا رفتار برشی خاک - خاک بدون هیچ‌گونه اعمال دمایی در سه سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال بررسی شده است. ابعاد نمونه‌ی مدل‌سازی شده، ۶۰ × ۶۰ میلی‌متر و ارتفاع آن ۲۰ میلی‌متر بوده است. مدل ساخته شده

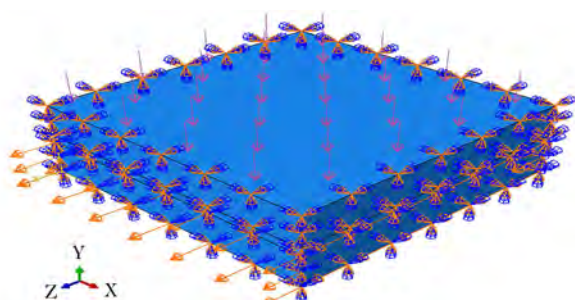
نیم جعبه‌ی بالایی قرار گرفته بود. پس از بررسی مقاومت برشی سطح مشترک در حالت برش مستقیم مکانیکی خاک - خاک و بتن، سیستم گرمایشی در قسمت پایین جعبه‌ی برش قرار گرفته و دما با یک نرخ ثابت بر زیر نمونه‌ی بتنی اعمال شده است. پس از آنکه دما به مقدار ثابت ۵۰ درجه رسید، نیم جعبه‌ی بالا و پایین دستگاه با یک نرخ ثابت نسبت به یکدیگر برش زده شده‌اند. بررسی تأثیرات دما در نتایج پژوهش مذکور نشان می‌دهد که مقاومت برشی نسبت به حالتی که هیچ‌گونه دمایی به نمونه‌ی بتنی اعمال نمی‌شود، افزایش می‌یابد.

شیانو^۳ و همکاران (۲۰۱۴)،^[۹] اثر دما در مشخصه‌های مکانیکی سطح مشترک بتن و خاک سیلتی متراکم را ارزیابی کردند و دریافتند که در دمای ۳۸ درجه‌ی سانتی‌گراد، مقاومت برشی سطح مشترک ۱۵٪ به نسبت دمای ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش پیدا می‌کند. این رفتار مقاومت حرارتی در سطح مشترک خاک و شمع تحت تغییرات سیکلی حرارت (۲۶-۳۸-۲۶ C°) نیز مشاهده شده است. همچنین ایشان در پژوهش دیگری (۲۰۱۵)،^[۱۳] برای بررسی رفتار ترمومکانیکی سطح مشترک خاک و شمع، از دستگاه T-mBST^۴ (شکل ۲) استفاده کردند که شامل یک مخزن خاک بود که در وسط آن، یک گمانه جهت نصب تجهیزات ایجاد شده بود. در دستگاه مذکور، دو صفحه‌ی بتنی با لوله‌های مدفون وجود داشت که به پمپ گرمایی جهت گرمایش و سرمایش دو صفحه‌ی بتنی متصل بودند. با استفاده از تجهیزات در دستگاه T-mBST، پس از اعمال تنش عمود بر صفحات بتنی، دو صفحه‌ی مذکور در راستای قائم درون گمانه‌ی ایجاد شده در خاک حرکت داده می‌شد. پس از اعمال برش در صفحه‌ی بتنی، نتایج نشان دادند که هر چه افزایش دمای اعمالی بیشتر باشد، مقاومت برشی ثبت شده در سطح مشترک خاک و صفحات بتنی بیشتر خواهد بود و رفتار برشی سطح مشترک از نظر مقاومت بهبود می‌یابد.

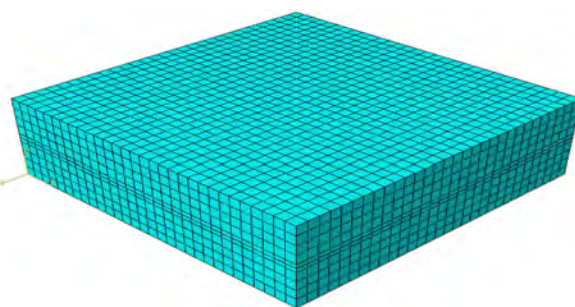
یاوری و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۴] رفتار برشی ماسه، رس و سطح مشترک خاک رس و بتن را در ۳ دمای ۵، ۲۰ و ۴۰ درجه با استفاده از دستگاه برش مستقیم اصلاح شده بررسی کردند و دریافتند که پاسخ برشی خاک و سطح مشترک خاک و بتن به دما بستگی ندارد. یزدانی و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۱] نیز به کمک دستگاه برش مستقیم اصلاح شده، تأثیر پیش تحکیم‌یافتگی خاک را در رفتار ترمومکانیکی سطح مشترک خاک و شمع بررسی کردند و دریافتند که با کاهش نسبت پیش‌تحکیمی خاک، افزایش دما موجب افزایش مقاومت سطح مشترک خاک و شمع می‌شود. همچنین ساگو^۵ و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۵] در ارزیابی تنش‌های برشی در سطح مشترک خاک و شمع حرارتی تحت بار محوری مجاز به صورت عددی نشان دادند که تنش برشی در سطح مشترک، به حرکت نسبی خاک و شمع بستگی دارد و علاوه بر آن، شکل ذرات خاک و اندازه‌ی آن در مقدار تنش برشی خاک در اثر



شکل ۲. دستگاه آزمایش برش گمانه‌ی حرارتی اصلاح شده. [۱۳]



شکل ۴. شرایط مرزی اعمال شده در مدل‌سازی.



شکل ۳. مدل خاک - خاک ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس.

معیار گسیختگی موهر - کولمب^۸ بوده است. برای تحلیل از دو آنالیز Static General Soils استفاده شده است. در پژوهش حاضر، در ابتدا سر بار مشخصی در آنالیز Static General بر نمونه وارد شده و پس از آن در آنالیز Soils، نمونه با یک نرخ ثابت ۰/۶۰۶ میلی‌متر بر دقیقه به اندازه ۸ میلی‌متر برش زده شده است. میس تولید شده در مدل مذکور از نوع منظم و نوع المان با توجه به تحلیل از نوع کوپل فشار آب حفره‌یی - تنش (C₃DAP)، المان ۸ گره‌یی آجری، در هر گره ۳ درجه آزادی جابه‌جایی و ۱ درجه آزادی فشار آب حفره‌یی) است.

۱.۲.۲. شرایط مرزی و اولیه

شرایط مرزی اعمال شده به مدل مطابق جدول ۳ است. این شرایط مرزی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در پژوهش حاضر، خاک اشباع فرض شده و مقادیر فشار آب حفره‌یی اولیه متناسب با شرایط هیدرواستاتیک به مدل معرفی شده است. علاوه بر تعریف فشار آب حفره‌یی، مقادیر نسبت تخلخل خاک و درصد اشباع اولیه‌ی خاک نیز به عنوان شرایط اولیه تعریف شده است.

۳.۲. مدل‌سازی آزمایش برش مستقیم مکانیکی خاک - بتن

در این مدل‌سازی، نیم قطعه‌ی پایین مدل با بتن جایگزین شده است. ابعاد نمونه‌ی خاکی ۶۰ × ۶۰ میلی‌متر با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر و ابعاد نمونه‌ی بتنی، ۶۰ × ۱۰۵ میلی‌متر با ارتفاع ۱۶ میلی‌متر مطابق با مطالعات دی دونتا (۲۰۱۴) بوده است. علت بزرگ‌تر بودن قطعه‌ی بتنی، ثابت بودن سطح برش در طول انجام تحلیل است. میس تولید شده در تحلیل حاضر نیز مشابه تحلیل برش مستقیم خاک - خاک و نوع المان برای قطعه‌ی خاکی کوپل فشار آب حفره‌یی - تنش (C₃DAP)، و برای

جدول ۱. پارامترهای مکانیکی و حرارتی خاک.

چگالی (kg/m^3)	۱۷۱۵	نسبت پواسون	۰/۴۵
نسبت تخلخل	۱/۲۶	زاویه‌ی اتساع	صفر
درصد اشباع	۹۸	رسانایی حرارتی ($W/m/C^\circ$)	۱/۳۵
زاویه‌ی اصطکاک (درجه)	۲۶	ظرفیت گرمایی ($Mj/m^3.C^\circ$)	۲/۶۵
مدول کشسانی (MPa)	۲	ضریب انبساط حرارتی خاک ($1/C^\circ$)	۱۰-۲
چسبندگی (kPa)	۹	ضریب انبساط حرارتی آب ($1/C^\circ$)	۱۰-۵

جدول ۲. پارامترهای مکانیکی و حرارتی بتن.

چگالی kg/m^3	مدول کشسانی (GPa)	نسبت پواسون
۲۳۰۰	۲۵	۰/۲
رسانایی حرارتی $W/m/C^\circ$	ظرفیت گرمایی $Mj/m^3.C^\circ$	ضریب انبساط حرارتی $1/C^\circ$
۱/۴۵	۱/۹	۱۰-۵

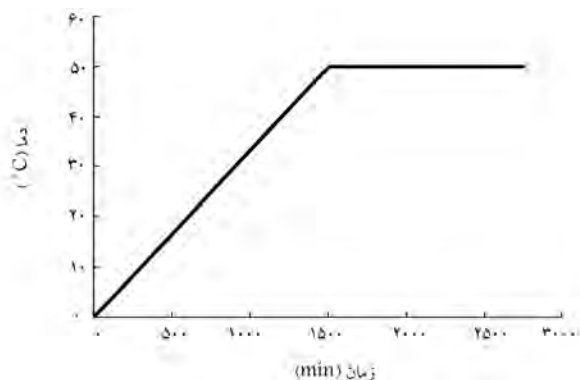
برای برش خاک - خاک در نرم‌افزار آباکوس در شکل ۳ مشاهده می‌شود. برای تعریف خصوصیات مصالح از منابع و مراجع معتبر استفاده شده است. [۲۵، ۲۴، ۱۲، ۶]

مشخصات مکانیکی و حرارتی خاک رس ایلیت و بتن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

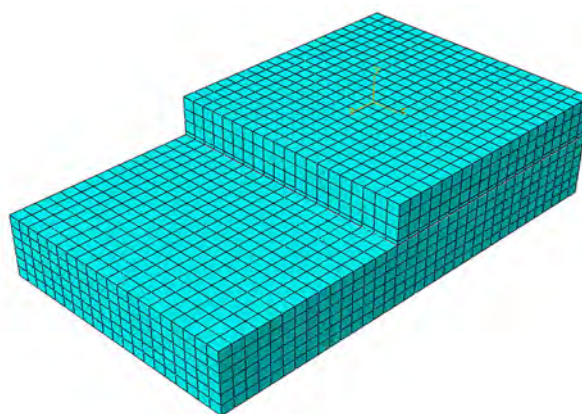
با توجه به پارامترهای خاک، مدل رفتاری در نظر گرفته شده جهت مدل‌سازی،

جدول ۳. شرایط مرزی مکانیکی اعمال شده به مدل.

گام اول Static General	گام دوم soils	گام اولیه initial	هندسه مدل
در جهات x و y محدود شده است	در جهات x و y محدود و در جهت z جابه‌جایی برشی ۸ میلی‌متر اعمال می‌شود	در جهات x و y محدود شده است	صفحه پایینی مدل
در تمام جهات محدود شده است	در جهات x و y محدود و در جهت z جابه‌جایی برشی ۸ میلی‌متر اعمال می‌شود	در تمام جهات محدود شده است	دیواره‌های پایینی مدل
در جهات x و z محدود شده است	در جهات x و y محدود شده است	در جهات x و z محدود شده است	صفحه بالایی مدل
در تمام جهات محدود شده است	در تمام جهات محدود شده است	در تمام جهات محدود شده است	دیواره‌های بالایی مدل



شکل ۶. دمای اعمال شده به زیر قطعه‌ی بتنی.



شکل ۵. مدل خاک - بتن ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس.

سانتی‌گراد رسید، برش با یک نرخ ثابت ۰/۰۰۶ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه اعمال شده است.

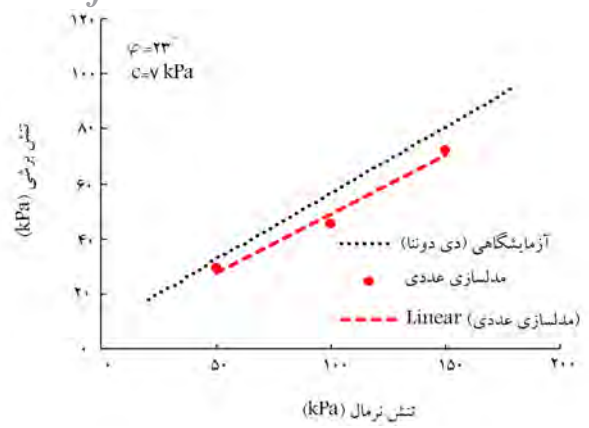
شکل ۵. مدل خاک - بتن ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس. قطعه‌ی بتنی از نوع تغییرمکان بوده است. شرایط مرزی اعمال شده، مشابه شرایط مرزی تحلیل برش مستقیم خاک - خاک است. مدل ساخته شده در نرم‌افزار در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

۳. مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

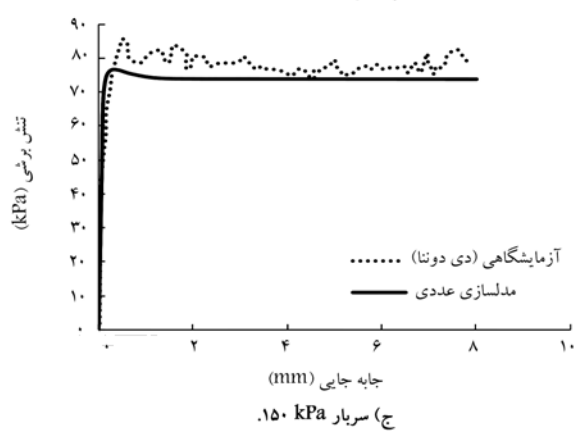
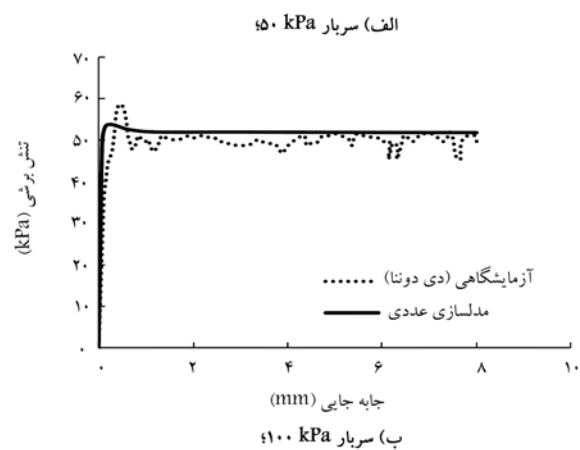
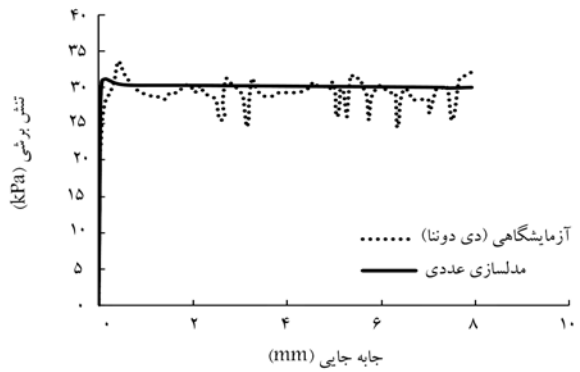
پس از انجام تحلیل در نرم‌افزار، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی انجام شده در مطالعات دی دوننا (۲۰۱۴)^[۱۲] مقایسه شده است.

۱.۳. نتایج مدل‌سازی آزمایش برش مستقیم مکانیکی خاک - خاک
نتایج مدل‌سازی آزمایش برش مستقیم مکانیکی خاک - خاک، برای هر سه سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در شکل ۷ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل‌های اخیر مشاهده می‌شود که نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی، دقت خوبی دارد. خطای نسبی متوسط (RMSE)، بیشینه‌ی خطا بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیل عددی برای هر سه سربار مذکور به‌صورت میانگین به ترتیب برابر ۴/۳٪، ۴/۷٪ کیلوپاسکال و ۱۳/۷٪ بوده است. همچنین رفتار سطح مشترک خاک - خاک، یک رفتار کشسان خمیری است که با مدل رفتاری

۴.۲. مدل‌سازی آزمایش برش مستقیم ترمومکانیکی خاک - بتن
در این حالت، هندسه‌ی مدل، شرایط مرزی و نوع مش مشابه تحلیل برش مستقیم مکانیکی خاک - بتن است. نوع المان در این حالت برای قطعه‌ی خاکی از نوع کوپل دما - فشار آب حفره‌ی (C3D8P)، المان ۸ گره‌ی آجری، ۳ درجه آزادی جابه‌جایی، ۱ درجه آزادی فشار آب حفره‌ی و دما) و برای قطعه‌ی بتنی از نوع کوپل دما - تغییرمکان (C3D8T)، المان ۸ گره‌ی آجری کوپل دما - تغییرمکان) بوده است. قبل از اعمال برش به نمونه، در آنالیز Soils، دما با یک نرخ ثابت ۲ درجه بر ساعت بر زیر قطعه‌ی بتنی اعمال شده است. علت انتخاب این نرخ از دما مطابق با مطالعات دی دوننا (۲۰۱۴)، داشتن زمان کافی برای محو فشار آب حفره‌ی اضافی بوده است. نمودار دمای اعمال شده به سطح مشترک خاک و بتن در شکل ۶ مشاهده می‌شود. پس از آنکه دمای تمام مدل، به ۵۰ درجه‌ی



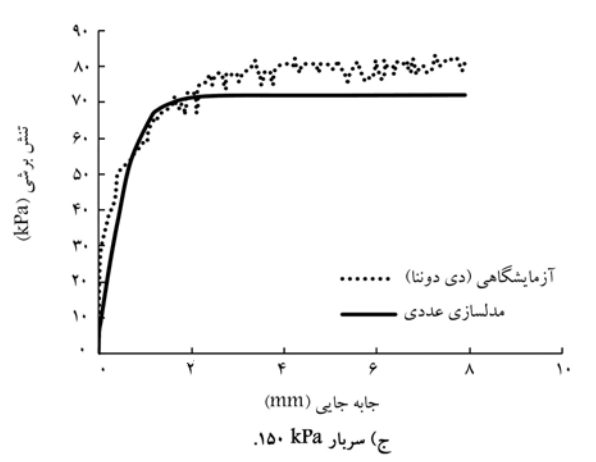
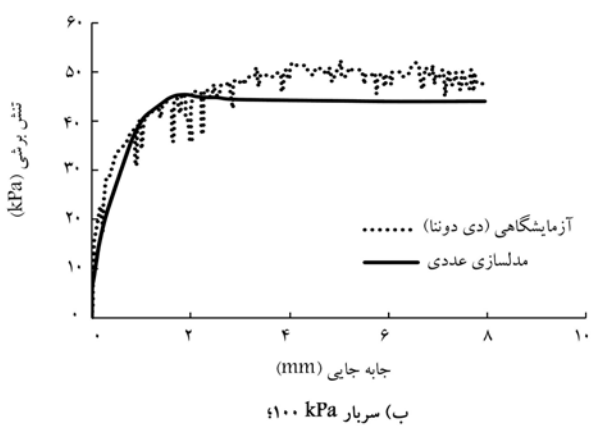
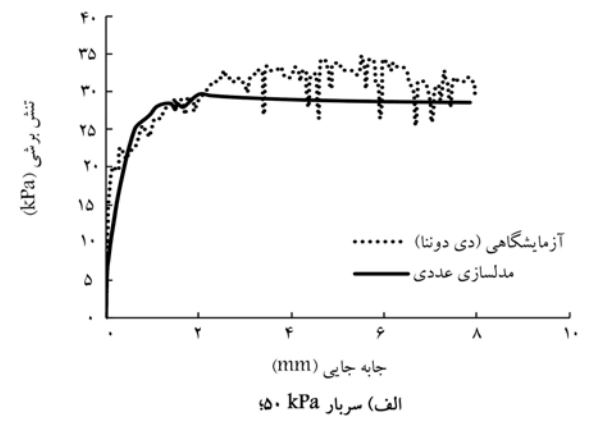
شکل ۸. پوش گسیختگی موهر - کولمب (تحلیل مکانیکی خاک - خاک).



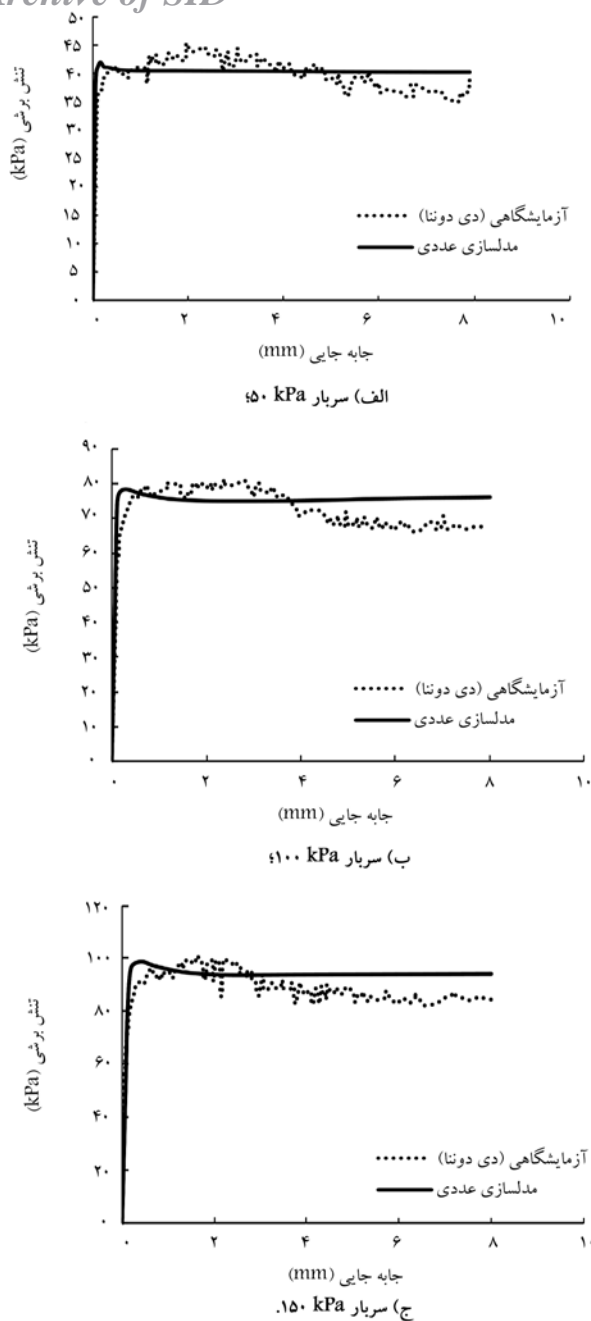
شکل ۹. برش مستقیم مکانیکی خاک - بتن.

تعریف شده در تطابق کامل است. پوش گسیختگی موهر - کولمب، مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک به دست آمده از تحلیل عددی در این حالت نیز در شکل ۸ مشاهده می شود.

۲.۳. نتایج مدل سازی آزمایش برش مستقیم مکانیکی خاک - بتن. نتایج مدل سازی آزمایش برش مستقیم مکانیکی خاک - بتن، برای هر سه سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال، در شکل ۹ مشاهده می شود که مطابق آن، مدل سازی عددی، دقت خوبی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارد. با توجه به شکل ۹، خطای نسبی متوسط (MRE)، RMSE و بیشینه خطا بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج



شکل ۷. برش مستقیم مکانیکی خاک - خاک.



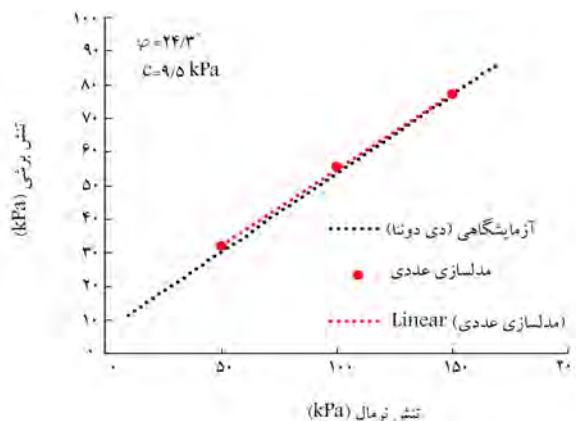
شکل ۱۱. برش مستقیم ترمومکانیکی خاک - بتن.

۱۲٫۸٪ بوده است. مطابق شکل مذکور، با افزایش دما، مقاومت برشی سطح مشترک خاک و بتن، نسبت به حالتی که هیچ‌گونه دمایی به سطح مشترک اعمال نمی‌شود، افزایش یافته است. این افزایش مقاومت به افزایش در تنش نرمال و تغییرات فشار آب حفره‌یی در طول اعمال دما نسبت داده می‌شود.^[۱۲]

نمودار تغییرات فشار آب حفره‌یی در دو حالت مکانیکی و ترمومکانیکی برای سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال (سربار میانگین) در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، که مطابق آن دما باعث کاهش فشار آب حفره‌یی شده است؛ همچنین به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی آب و خاک، مقدار فشار آب حفره‌یی منفی شده است که نشانگر ایجاد مکش در خاک است.^[۱۶] این مقدار فشار آب حفره‌یی منفی در خاک و ایجاد مکش باعث افزایش مقاومت برشی در سطح مشترک در هنگام اعمال دما می‌شود.

جدول ۴. مقایسه‌ی تنش نرمال در سطح مشترک خاک - خاک و خاک - بتن.

تنش نرمال میانگین سطح مشترک (kPa)	نوع تحلیل
۹۱/۶	تحلیل مکانیکی خاک - خاک
۹۶/۲	تحلیل مکانیکی خاک - بتن



شکل ۱۰. پوش گسیختگی موهر - کولمب (تحلیل مکانیکی خاک - بتن).

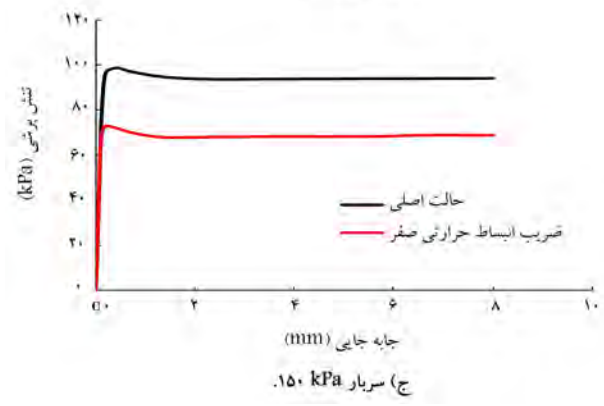
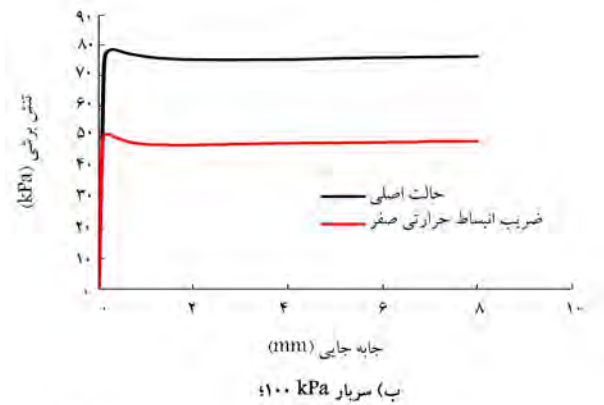
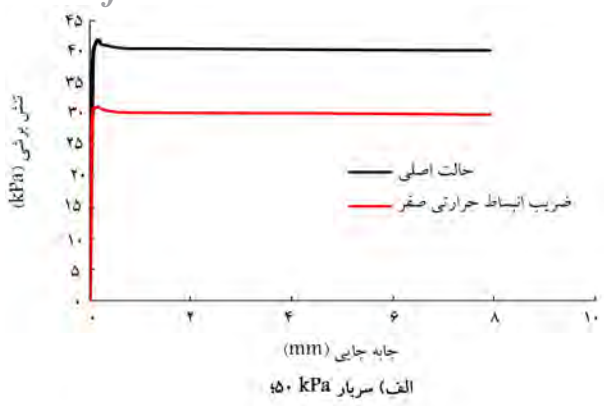
تحلیل عددی برای هر سه سربار مذکور به صورت میانگین به ترتیب برابر ۴/۴٪، ۳/۳ کیلوپاسکال و ۹/۹٪ بوده است. همچنین مقاومت برشی نهایی سطح مشترک خاک - بتن در سربارهای مختلف نسبت به مقاومت برشی نهایی سطح مشترک خاک - خاک، مقادیر بیشتری دارد.

علت افزایش مقاومت برشی نهایی سطح مشترک خاک - بتن نسبت به سطح مشترک خاک - خاک می‌تواند به بیشتر بودن تنش نرمال در سطح مشترک خاک - بتن به علت وجود بستری سخت‌تر در طول تحلیل نسبت داده شود. با توجه به رابطه‌ی $\tau_R = \sigma'_n \tan(\delta)$ ، افزایش تنش نرمال باعث افزایش مقاومت برشی می‌شود تغییرات تنش نرمال در طول سطح مشترک خاک - بتن و خاک - خاک برای سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال (سربار میانگین) در جدول ۴ مقایسه شده است. پوش گسیختگی موهر - کولمب در این حالت در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، که برای ترسیم آن بهترین خط‌گذرنده از مقادیر نهایی تنش برشی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که مقادیر چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک به دست آمده از تحلیل عددی بر روی شکل گزارش داده شده است.

با توجه به مقادیر چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک در دو حالت تحلیل مکانیکی خاک - خاک و خاک - بتن، مشاهده می‌شود مقدار چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک در سطح مشترک خاک - بتن نسبت به سطح مشترک خاک - خاک اندکی افزایش یافته است که این تغییرات به بیشتر بودن تنش نرمال و در نتیجه مقاومت برشی نهایی در حالت خاک - بتن نسبت داده می‌شود.

۳.۳. نتایج مدل‌سازی آزمایش برش مستقیم ترمومکانیکی خاک - بتن

نتایج مدل‌سازی آزمایش برش مستقیم ترمومکانیکی خاک - بتن برای هر ۳ سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. خطای نسبی متوسط (MRE)، (RMSE) و بیشینه‌ی خطا بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیل عددی برای هر ۳ سربار مذکور به صورت میانگین به ترتیب ۵/۷٪، ۵/۲ کیلوپاسکال و

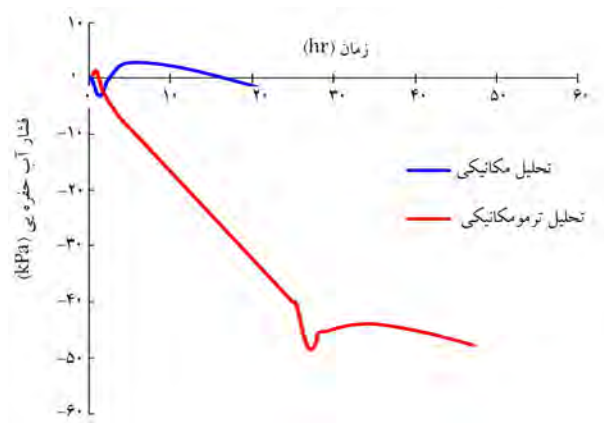


شکل ۱۵. تغییرات تنش برشی در دو حالت تعریف ضریب انبساط حرارتی و عدم تعریف آن.

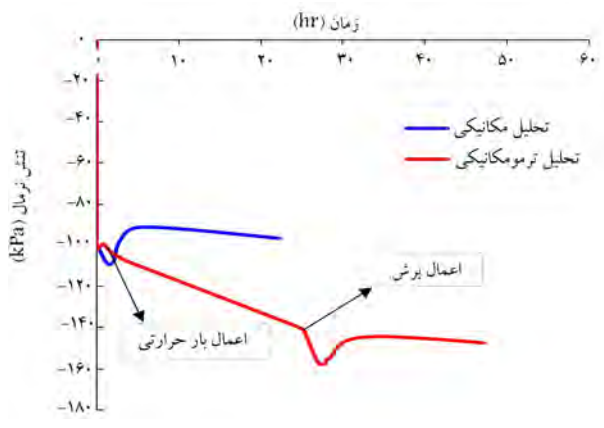
پوش گسیختگی موهر-کولمب در این حالت در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که بر روی آن مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک در حالت تحلیل عددی ترمومکانیکی گزارش شده است. مطابق شکل مذکور، مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک با افزایش دما افزایش یافته است که این افزایش به افزایش مقاومت برشی نهایی در حالت اعمال دما در اثر تغییرات فشار آب حفره‌یی و تنش نرمال نسبت داده می‌شود.

۴.۳. تأثیر ضریب انبساط حرارتی خاک

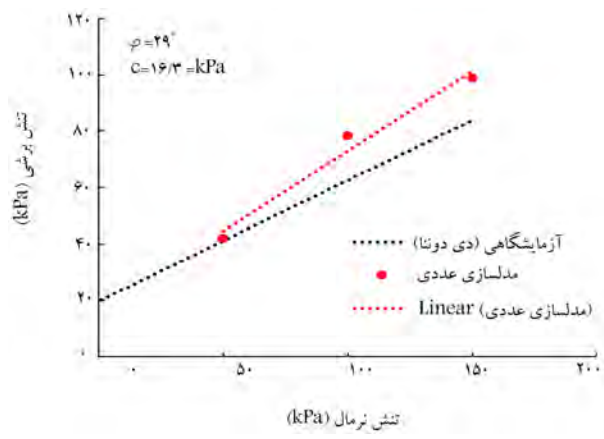
ضریب انبساط حرارتی خاک (α_s) نقش بسیار مهمی در تغییرات حجم خاک در اثر تغییرات دما دارد. در بخش حاضر، تأثیر عدم تعریف ضریب انبساط حرارتی در



شکل ۱۲. تغییرات فشار آب حفره‌یی در تحلیل‌های مکانیکی و ترمومکانیکی.



شکل ۱۳. تغییرات تنش نرمال در طول تحلیل.



شکل ۱۴. پوش گسیختگی موهر-کولمب (تحلیل ترمومکانیکی خاک - بتن).

تغییرات تنش نرمال در سطح مشترک خاک و شمع در حالت‌های مکانیکی و ترمومکانیکی برای سربار ۱۰۰ کیلو پاسکال (سربار میانگین) در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که مطابق آن با افزایش دما و ایجاد انبساط حرارتی در سطح مشترک خاک و شمع، مقدار تنش نرمال افزایش یافته است. از این رو با توجه به رابطه $(\delta) = \sigma'_n \tan(\delta) = \tau_{TR}$ با افزایش تنش نرمال، مقدار مقاومت برشی در سطح مشترک خاک و شمع با افزایش دما افزایش یافته است. منفی بودن مقادیر تنش در شکل مذکور، نشانگر فشاری بودن تنش نرمال در سطح مشترک است.

Archive of SID

شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، که مطابق آن مقدار چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک در این حالت نسبت به حالت اصلی (ضریب انبساط حرارتی مخالف صفر) به علت کاهش مقاومت برشی، کاهش پیدا کرده است.

۴. نتیجه‌گیری

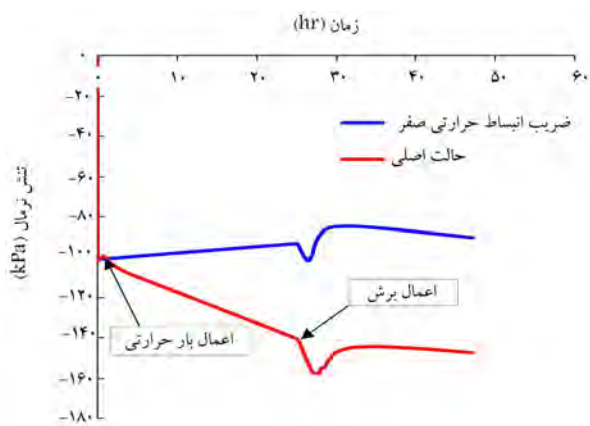
در پژوهش حاضر، برای اولین بار مجموعه‌ی آزمایش‌های برش مستقیم به منظور بررسی تأثیر اثر دما در مقاومت سطح مشترک شمع و خاک رس ایلیت، در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی شده است. نتایج به‌دست آمده از این مدل‌سازی به این صورت خلاصه شده است:

۱. مقاومت برشی نهایی سطح مشترک خاک - بتن، زمانی که هیچ‌گونه دمایی به آن اعمال نمی‌شود، نسبت به مقاومت برشی نهایی سطح مشترک خاک - خاک بیشتر است. این افزایش مقاومت نهایی به افزایش تنش نرمال در سطح مشترک خاک - بتن نسبت به حالت خاک - خاک ثبت داده می‌شود.

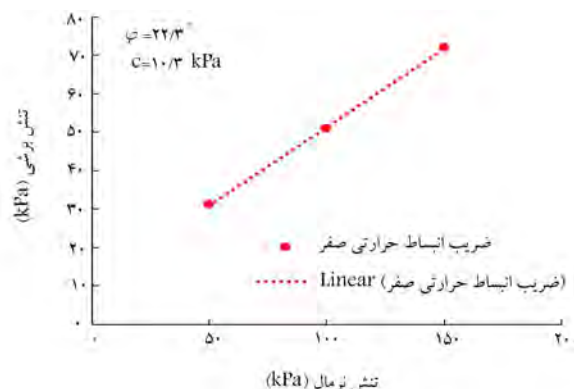
۲. با افزایش دما در سطح مشترک خاک - بتن، مقاومت برشی افزایش می‌یابد. در طول اعمال دما در این حالت، فشار آب حفره‌یی کاهش می‌یابد و در خاک مکش ایجاد می‌شود. علت ایجاد مکش در خاک، اختلاف ضریب انبساط حرارتی خاک و آب است. علاوه بر این، مقدار تنش نرمال در سطح مشترک خاک و شمع به علت انبساط حرارتی افزایش می‌یابد.

۳. با تغییرات مقاومت برشی در اثر دما می‌توان نتیجه گرفت که چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک نیز تغییر خواهند کرد. مقدار چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک در این حالت با افزایش دما افزایش می‌یابد که این افزایش چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک به افزایش مقاومت نهایی خاک - بتن در اثر اعمال دما، کاهش فشار آب حفره‌یی، ایجاد مکش در خاک و افزایش تنش نرمال در سطح مشترک نسبت داده می‌شود.

۴. ضریب انبساط حرارتی خاک نقش مهمی در تغییرات حجم خاک در اثر اعمال دما دارد. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد در صورتی که تأثیر ضریب انبساط حرارتی خاک در نظر گرفته نشود، به علت کاهش تنش نرمال در اثر عدم وقوع انبساط حرارتی، مقاومت برشی سطح مشترک خاک - بتن نسبت به حالت اصلی (ضریب انبساط حرارتی مخالف صفر) کاهش می‌یابد.



شکل ۱۶. تغییرات تنش نرمال در دو حالت تعریف ضریب انبساط حرارتی و عدم تعریف آن.



شکل ۱۷. پوش گسیختگی موهر - کولمب در حالت ضریب انبساط حرارتی صفر.

تحلیل عددی بررسی شده است. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در صورتی که ضریب انبساط حرارتی خاک برابر صفر باشد، مقاومت سطح مشترک خاک و شمع نسبت به حالت اصلی (ضریب انبساط حرارتی مخالف صفر) کاهش می‌یابد. این کاهش سطح تنش برشی به کاهش تنش نرمال در سطح مشترک به علت عدم ایجاد انبساط حرارتی بوده است. تغییرات تنش نرمال در طول تحلیل در شکل ۱۶ مشاهده می‌شوند. پوش گسیختگی موهر - کولمب در این حالت نیز در

پانوشتها

1. interface
2. Di Donna
3. Xiao
4. thermal-modified borehole shear test
5. Saggiu
6. ABAQUS
7. special interface

8. Mohr-Coulomb failure criterion

منابع (References)

1. Brandl, H. "Energy foundations and other thermo-active ground structure", *Geotechnique*, **56**(2), pp. 81-122 (2006).

2. Lee, K.S. "Underground thermal energy storage", In: *Underground Thermal Energy Storage*, Springer, pp. 15-26 (2013).
3. Abdelaziz, S., Olgun, C.G. and Martin II, J.R. "Design and operational considerations of geothermal energy piles", *Ge-Frontiers*, pp. 450-459 (2011).
4. Batini, N., Rotta Loria, A.F. and et al. "Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design solutions", *Appl. Therm. Eng.*, **86**, pp. 199-213 (2015).
5. Fadejev, J., Simson, R., Kurnitski, J. and et al. "A review on energy piles design, sizing and modelling", *Energy*, **122**, pp. 390-407 (2017).
6. Di Donna, A., Ferrari, A. and Laloui, L. "Experimental investigations of the soil-concrete interface: Physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures", *Can. Geotech. J.*, **53**(4), pp. 659-672 (2016).
7. Amatya, B.L., Soga, K., Bourne-Webb, P.J. and et al. "Thermo-mechanical behaviour of energy piles", *Geotechnique*, pp. 503-519 (2012).
8. Vasilescu, A.R., Fauchille, A.-L., Dano, Ch. and et al. "Impact of temperature cycles at soil - concrete interface for energy piles", *Energy Geotech.*, **1**, pp. 83-89 (2019).
9. Xiao, S., Suleiman, M.T. and McCartney, J.S. "Shear behavior of silty soil and soil-structure interface under temperature effects", *Geotech. Spec. Publ.*, **234 GSP**, pp. 4105-4114 (2014).
10. Xiao, S., Suleiman, M.T., Elzeiny, R. and et al. "Soil-concrete interface properties subjected to temperature changes and cycles using direct shear tests", *Geotech. Front.*, pp. 175-183 (2017).
11. Yazdani, S., Helwany, S. and Olgun, G. "Influence of temperature on soil-pile interface shear strength", *Geomech. for Energy. and the Environ*, **18**, pp. 69-78 (2019).
12. Di Donna, A. "Thermo-mechanical aspects of energy piles", Ph.D. thesis, Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland, 6145 (2014).
13. Xiao, S. and Suleiman, M.T. "Investigation of thermo-mechanical load transfer (t-z Curves) behavior of soil-energy pile interface using modified borehole shear tests", in IFCEE 2015, pp. 1658-1667 (2015).
14. Yavari, N., Tang, A.M., Pereira, J.-M. and et al. "Effect of temperature on the shear strength of soils and soil/structure interface", *Can. Geotech. J.*, **53**(7), pp. 1186-1194 (2016).
15. Saggiu, R. and Chakraborty, T. "Pile-soil Interactions under thermo-mechanical conditions imposed by geothermal energy piles in sand", in *Fourth Geo-China International Conference*, pp. 41-48 (2016).
16. Pande, G.N. and Sharma, K.G. "On joint/interface elements and associated problems of numerical ill-conditioning", *Int. Jnl. Num. Anal. Meth. Geomech.*, **3**(3), pp. 293-300 (1979).
17. Griffiths, D.V. "Numerical modelling of interfaces using conventional finite elements", *Proc. 5th Int. Conf. Num. Meth. Geomech.*, Nagoya, pp. 837-844 (1985).
18. Hermann, L.R. "Finite element analysis of contact problems", *ASCE, EM5*, **104**(5), pp. 1043-1057 (1978).
19. Frank, R., Guenot, A. and Humbert, P. "Numerical analysis of contacts in geomechanics", *Proc. 4th Int. Conf. Num. Meth. Geomech.*, Rotterdam, pp. 37-42 (1982).
20. Goodman, R.E., Taylor, R.L. and Brekke, T.L. "A model for the mechanics of jointed rock", *ASCE, SM3*, **94**(3), pp. 637-659 (1968).
21. Beer, G. "An isoparametric joint/interface element for finite element analysis", *Int. Jnl. Num. Meth. Eng.*, **21**(4), pp. 585-600 (1985).
22. Francavilla, A. and Zienkiewicz, O.C. "A note on numerical computation of elastic contact problems", *Int. Jnl. Num. Meth. Eng.*, **9**(4), pp. 913-924 (1975).
23. Lai, J.Y. and Booker, J.R. "A residual force finite element approach to soil-structure interaction analysis", Research Report No.604, University of Sidney (1989).
24. Laloui, L., Nuth, M. and Vulliet, L. "Experimental and numerical investigation of the behavior of a heat exchanger pile", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, pp. 515-535 (2006).
25. Bowles, J.E. *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, 5th edition, pp. 123-125 (1997).
26. Xiao, S., Suleiman, M.T., Elzeiny, R. and et al. "Effect of temperature and radial displacement cycles on soil-concrete interface properties using modified thermal borehole shear test", *Int. Jnl. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, **144**(7), pp.1-13 (2018).