

بررسی عددی اثر یخ زدگی در دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده

محمد سعید ویلایی * (کارشناس ارشد)

محمد شریفی پور (دانشیار)

امیر هوشنگ اخویسی (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۲)
دوری ۳۹، شماری ۳، صص. ۶۱-۷۰، (پژوهشی)

استفاده از سیستم میخ‌کوبی خاک در مناطق سردسیر به دلیل عدم انجام مطالعات کافی در مورد پاسخ دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده تحت شرایط یخبندان، محدودتر از سایر مناطق دمایی است. بنابراین در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، یک مدل سازی عددی از دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده در منطقه‌ی پرازیو یک آمریکا انجام شده است. پس از راستی‌آزمایی مدل عددی مذکور براساس نتایج عملیات میدانی انجام شده بر روی همان دیواره‌ی خاکی، سه چرخه یخ زدن بر دیواره‌ی خاکی اعمال و مشخص شد که تحت اثر چرخه‌های دوم به بعد، تنش ایجاد شده در میخ‌ها نسبت به چرخه‌های قبلی کاهش یافته است. سپس سه چرخه یخ زدگی براساس دمای فرضی بحرانی، بر مدل اعمال شد و با مقایسه‌ی بیشترین تنش ایجاد شده در میخ‌ها تحت اثر شرایط مذکور با آستانه‌ی گسیختگی فولاد، این نتیجه به دست آمد که دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده دچار گسیختگی نمی‌شود. در ادامه، با اعمال تأثیر معیار قطع کشش در رفتار بدنه‌ی خاکی مشخص شد که بدنه‌ی خاکی دچار افزایش جابه‌جایی و همچنین کاهش تنش در میخ‌ها شده است.

واژگان کلیدی: چرخه یخ زدن و ذوب شدن، آباکوس، دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده، شبیه‌سازی المان محدود، عملیات میدانی.

۱. مقدمه

دشوار، امکان تقویت طرح در حین اجرا، اجرای هم‌زمان گودبرداری و پایداری و ... به طور گسترده استفاده می‌شود؛ با وجود این، مطالعات طبقه‌بندی شده‌ی مناسبی در مورد طراحی و عملکرد سازه‌های خاکی میخ‌کوبی شده در نواحی سردسیر وجود ندارد و این موضوع به مطالعات بیشتری برای درک بهتر رفتار دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده در نواحی مستعد یخ زدگی نیاز دارد.

در سیستم میخ‌کوبی، علاوه بر خاک موجود در محل، عناصر دیگری مانند دیواره‌ی بتنی رویه، میخ‌های فولادی، دوغاب تزریق شده در اطراف میخ‌ها و همچنین آب‌های زیرزمینی، از دیگر عوامل مؤثر در فرایند انتقال حرارت از محیط به خاک هستند که همه‌ی موارد اخیر در طی فصول سرد، مسیرهای بالقوه‌ی را برای ورود دمای یخ زدگی به سیستم میخ‌کوبی و خاک اطراف آن فراهم می‌کنند و منجر به ایجاد جبهه‌ی یخ زدگی غیرخطی و انبساط خاک می‌شود. قرار گرفتن طولانی مدت خاک در معرض دمای یخ زدگی باعث تشکیل لایه‌های یخ بین ذرات خاک می‌شود، که این موضوع باعث افزایش سختی و مقاومت خاک نیز می‌شود. از طرفی هم ممکن است فرایند یخ زدگی موجب تضعیف مواد در قسمت رویه‌ی دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی

روش میخ‌کوبی به معنای تسلیح بر جای خاک موجود با نصب میلگردهای فولادی^۱ به منظور پایداری دیواره‌های خاکی است. سطح شکست و فروپاشی در خاک‌های با دانه‌بندی مختلط به صورت گوه است، بنابراین فلسفه‌ی اصلی روش میخ‌کوبی خاک، بر مبنای پایداری گوه گسیختگی به وسیله‌ی میخ‌ها استوار است، به طوری که گوه ناپایدار توسط میخ‌ها به حجم خاک پایدار پستی دوخته و پایدار می‌شود. در روش مذکور، میخ‌ها در هنگام بهره‌برداری تحت تنش‌های کششی قرار می‌گیرند و پایداری دیواره‌ی خاکی را تأمین می‌کنند. میلگردها معمولاً داخل گمانه‌هایی که در دیواره‌ی خاکی ایجاد شده‌اند، قرار می‌گیرند و به منظور جلوگیری از خوردگی میلگردها و همچنین انتقال مناسب‌تر نیروها از میلگرد به خاک، گمانه‌ها با دوغاب سیمان پر می‌شوند.

روش میخ‌کوبی خاک، به دلیل داشتن مزایایی مانند امکان اجرا به دو صورت موقت و دائمی، سرعت بالا در اجرای عملیات، قابلیت اجرا در محیط‌های با دسترسی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۳۰، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۰/۲۵، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۳۰.

استاد به این مقاله:

ویلایی، محمد سعید، شریفی پور، محمد، و اخویسی، امیر هوشنگ، ۱۴۰۲. بررسی عددی اثر یخ زدگی در دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۳)، صص. ۶۱-۷۰.

DOI:10.24200/J30.2023.61444.3175

و همچنین کاهش قدرت اتصال در محل تلاقی خاک و دوغاب و چسبندگی بین شاتکریت^۲ و خاک، ایجاد تغییرشکل اضافی و وارد آمدن فشار بیش از حد به سیستم میخ‌کوبی شود. از طرف دیگر باید به این نکته نیز توجه شود که پس از پایان فصل سرد و شروع فصل گرم، لتهای یخ تشکیل شده در بین ذرات خاک ذوب می‌شوند که باعث افزایش میزان آب در خاک و در نتیجه کاهش تنش مؤثر بین ذرات خاک می‌شود.^[۱]

از آن‌جا که خاک تحت اثر فعالیت یخ زدن دچار تغییراتی می‌شود، بنابراین لازم است که به چند مورد از مطالعات انجام شده در این زمینه اشاره کرد. کی^۲ و همکاران (۲۰۰۷)، یک مجموعه آزمایش بر روی یک نمونه‌ی خاک سیلتی با یک چرخه یخ زدن و ذوب شدن برای مشخص کردن تغییر در خصوصیات مهندسی خاک انجام دادند و یک وزن مخصوص خشک بحرانی به دست آوردند؛ که به ازاء مقادیر فراتر از آن، چسبندگی و فشار پیش‌تحکیمی بعد از یک چرخه یخ زدن و ذوب شدن کاهش می‌یابد، در حالی که مدول کشسانی^۴ خاک بدون توجه به تغییر وزن مخصوص خشک، همیشه کاهش می‌یابد.^[۲]

لیو^۵ و همکاران (۲۰۱۶)، یک نمونه خاک ماسه‌ی سیلتی را در آزمایشگاه فشرده کردند و سپس در معرض بیشینه‌ی ۱۲ چرخه انجماد-ذوب قرار دادند و دریافتند که بالاترین نرخ کاهش مدول کشسانی در حدود ۲۶ الی ۴۵ درصد بوده و مقاومت گسیختگی نمونه نیز به ۳۲ الی ۴۵ درصد مقاومت گسیختگی آن قبل از اعمال چرخه‌های یخ و ذوب رسیده است. میزان چسبندگی پس از چند چرخه‌ی اول انجماد - ذوب، کاهش یافت و پس از حدود ۹-۱۲ سیکل، تقریباً ثابت ماند؛ در حالی که زاویه‌ی اصطکاک داخلی ابتدا کاهش یافت و در حدود ۷ چرخه به کمترین مقدار خود رسید و سپس در طول چرخه‌های انجماد و ذوب افزایش پیدا کرد.^[۳]

لیو و همکاران (۲۰۱۹)، یک مطالعه‌ی تجربی جامع در مورد تأثیر فعالیت یخ زدن در نمونه‌های رسی سیلتی غیراشباع انجام دادند و دریافتند که انقباض نمونه‌ی خاک در اثر یخ زدن، زمانی اتفاق می‌افتد که درجه‌ی اشباع اولیه‌ی خاک کم باشد، در حالی که انبساط زمین ناشی از یخ زدن خاک، زمانی اتفاق می‌افتد که درجه‌ی اشباع اولیه‌ی خاک بالا باشد. بنابراین یک درجه‌ی اشباع بحرانی وجود دارد که در آن انقباض نمونه ناشی از یخ زدن به انبساط نمونه تبدیل می‌شود. برای نمونه‌ی خاک رسی سیلتی آزمایش شده در پژوهش مذکور، مقدار درجه‌ی اشباع بحرانی برابر ۷۵٪^۶ بوده است.^[۴]

شستری^۶ و همکاران (۲۰۲۱)، با انجام یک مجموعه آزمایش بر روی رفتار مکانیکی خاک‌های منجمد آلاسکا^۷، یک مدل کشسان-خمیری^۸ برای خاک‌های یخ زده ارائه دادند و آن را براساس نتایج آزمایش‌های مکانیکی انجام شده بر روی نمونه‌های خاک منجمد طبیعی اعتبارسنجی کردند. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک‌های منجمد طبیعی نشان داد که کاهش دما با افزایش تنش‌های پیش‌تحکیمی، سخت شدن و افزایش استحکام خاک مرتبط است. همچنین با کاهش دما، خاک یک انتقال نرم بین رفتارهای کشسان و خمیری از خود نشان می‌دهد.^[۵]

اما با توجه به محدود بودن تعداد مطالعات انجام شده در زمینه‌ی تأثیر فعالیت یخبندان در عملکرد دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده، سعی شده است که تمام مطالعات انجام شده در این زمینه، هر چند قدیمی هم در پژوهش حاضر ارائه شود، مثلاً گیلوکس^۹ و همکاران (۱۹۸۳)، استفاده از روش میخ‌کوبی خاک را برای ساخت دیوار حائل در یک پارکینگ زیرزمینی در لاکلوساز^{۱۰} واقع در کشور فرانسه ارزیابی کردند. میزان عمق نفوذ جبهه‌ی یخ‌زدگی از سطح رویه، تقریباً برابر ۵۵٪ متر

اندازه‌گیری شده است. بیشترین میزان تنش ایجاد شده‌ی ناشی از فعالیت یخ‌زدگی در میخ‌ها در فاصله‌ی کوتاهی از پشت قسمت رویه رخ داده است، که مقدار آن از ۲۰ کیلونیوتن در اوایل نصب به ۴۰۰ کیلونیوتن در اواخر ماه فوریه افزایش یافته است.^[۶]

نیکلسون^{۱۱} (۱۹۸۶)، به بررسی عملکرد یک دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده با ارتفاع ۱۲ متر در پروژه‌ی ساخت تونل در کامبرلندگپ^{۱۲} در مرکز کنتاکی^{۱۳} - تنسی^{۱۴} تحت اثر سیکل یخ زدن و ذوب شدن پرداخت. طبق اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، تنش‌های ایجاد شده در میخ‌ها در اثر یخ‌زدگی خاک پشت دیوار رویه از (۲۰۰۰ تا ۲۴۰۰ کیلونیوتن) به (۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلونیوتن) افزایش یافته است. میخ‌هایی که به صورت محافظه‌کارانه طراحی شده بودند، توانستند بارهای ناشی از فعالیت یخ‌زدگی را بدون مشکل تحمل کنند.^[۷]

الیاس^{۱۵} و همکاران (۱۹۹۱)، تعدادی دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده تحت اثر چرخه یخ زدن و ذوب شدن را بررسی کردند. طبق مطالعات ایشان، در چنین شرایطی افزایش تنش موقت قابل‌توجهی در میخ‌های تقویت‌کننده‌ی بدنه‌ی خاکی به وجود می‌آید. همچنین بیان کردند که عواملی مانند: عمق نفوذ یخ‌زدگی، شدت و دوام فصل یخبندان و وجود آب زیرزمینی در نزدیکی دیواره‌های خاکی میخ‌کوبی شده در مقدار افزایش تنش در میخ‌ها تأثیر زیادی دارند. در بعضی از دیواره‌های خاکی میخ‌کوبی شده تحت کنترل که آب زیرزمینی در نزدیکی آنها وجود داشت، افزایش تنش تقریباً تا دو برابر مقادیر اولیه پس از ساخت تا عمق ۴ متر از پشت قسمت رویه‌ی دیواره خاکی میخ‌کوبی شده مشاهده شده است. آنها پیشنهاد دادند که می‌توان از روش عایق‌بندی برای کاهش عمق نفوذ جبهه‌ی یخ‌زدگی و اثرات آن در سیستم میخ‌کوبی استفاده کرد.^[۸]

اونتریر^{۱۶} (۱۹۹۴)، به منظور سازگاری و افزایش مقاومت دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده در برابر تنش‌های افزایش‌یافته در میخ‌ها ناشی از فعالیت یخ‌زدگی، دو اصلاحیه‌ی طراحی پیشنهاد کرده است: ۱) نصب میخ‌های کوتاه‌تر به طول ۲ متر در فواصل منظم بین میخ‌های اصلی به طول ۹ متر؛ ۲) افزایش طول آزاد (دوغاب‌ریزی نشده) میخ به اندازه‌ی عمق تخمین زده شده‌ی نفوذ یخ‌زدگی که این اندازه از سر میخ محسوب می‌شود، که در این صورت جبهه‌ی یخ‌زدگی تأثیری در طول دوغاب طراحی شده‌ی اطراف میخ ندارد. اونتریر ادعا کرد که استفاده از این روش می‌تواند تنش‌های ایجاد شده در میخ را تا ۲۱٪ کاهش دهد.^[۹]

کینگزبری^{۱۷} و همکاران (۲۰۰۲)، یک عملیات میدانی بر روی دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده در منطقه‌ی مسکو واقع در ایالت مین^{۱۸} در ایالات متحده‌ی آمریکا، که دارای محیط مستعد یخ‌زدگی است، انجام دادند. آنها به مدت ۳ سال اثر فعالیت یخ‌زدگی بر دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده را تحت کنترل داشتند. نتایج به دست آمده از مطالعه‌ی میدانی اخیر نشان داد که میزان تنش ایجاد شده در سر میخ‌ها، ناشی از فعالیت یخ‌زدگی می‌تواند ۲/۵ برابر بزرگ‌تر از بیشترین تنش ایجاد شده در میخ بدون اثر فعالیت یخ‌زدگی باشد. همچنین نشان دادند که استفاده از عایق‌بندی در سیستم میخ‌کوبی می‌تواند اثر مثبتی در کاهش میزان نفوذ جبهه‌ی یخ‌زدگی و تنش‌های ناشی از آن در میخ و خاک داشته باشد.^[۱۰]

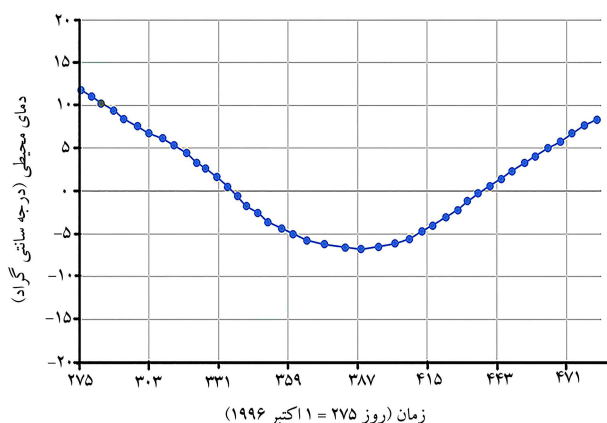
دوشن^{۱۹} (۲۰۰۳)، به منظور بررسی آثار چرخه یخبندان بر روی دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده در منطقه‌ی برانزویک^{۲۰} واقع در ایالت مین^{۲۱} ایالات متحده‌ی آمریکا، یک مطالعه‌ی میدانی انجام داد. طبق نتایج به دست آمده مشخص شد که بیشترین عمق نفوذ یخ‌زدگی به میزان ۱/۸ متر در پشت دیواره‌ی رویه‌ی بتنی رخ داده است.

جدول ۱. خصوصیات خاک برای ترکیب همزمان محاسبه دما - جابه‌جایی. [۱۴]

$a(^{\circ}\text{C})$	$\Psi(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	ν	$E(\text{Pa})$	$C(\text{J/Kg}^{\circ}\text{C})$	$K(\text{W/m}^{\circ}\text{C})$	دما ($^{\circ}\text{C}$)
۰	۰/۱	۳۰	۰/۳	$2/75 \times 10^7$	۱۱۲۶/۳۶۴	۱/۰۰۴	۲۰
۰	۰/۱	۳۰	۰/۳	$2/75 \times 10^7$	۱۱۲۶/۳۶۴	۱/۰۰۴	۰
$4/76 \times 10^{-2}$	۰/۱	۳۱	۰/۳	$5/39 \times 10^7$	۱۰۵۰/۷۶۴	۱/۰۸۵	-۱
$2/67 \times 10^{-2}$	۰/۱	۳۲	۰/۳	$7/85 \times 10^7$	۱۰۱۸/۸۲۳	۱/۱۲	-۳
$1/68 \times 10^{-2}$	۰/۱	۳۳	۰/۳	$9/71 \times 10^7$	۱۰۰۷/۲۹۴	۱/۱۳۲	-۵
$8/4 \times 10^{-4}$	۰/۱	۳۵	۰/۳	$1/32 \times 10^8$	۹۹۴/۰۶۳	۱/۱۴۶	-۱۰
$5/6 \times 10^{-4}$	۰/۱	۳۸	۰/۳	$2/05 \times 10^8$	۹۸۷/۶۳۷	۱/۱۵۳	-۱۵
$3/2 \times 10^{-4}$	۰/۱	۴۴	۰/۳	$2/75 \times 10^8$	۹۷۴/۸۵۶	۱/۱۶۷	-۲۵

جدول ۲. خصوصیات اعمال شده برای سیستم میخ دوغاب‌ریزی شده‌ی معادل و دیواره‌ی بتنی.

$a(^{\circ}\text{C})$	ν	$E(\text{Pa})$	$c(\text{J/(Kg}^{\circ}\text{C)})$	$k(\text{W/m}^{\circ}\text{C})$	
$1/3 \times 10^{-7}$	۰/۲۵	$4/609 \times 10^9$	۴۳۴	۲/۶	سیستم میخ دوغاب‌ریزی شده‌ی معادل
8×10^{-6}	۰/۲۵	$4/90 \times 10^7$	۹۷۰	۱/۲	دیواره‌ی بتنی رویه



شکل ۲. نوسان دمای محیطی منطقه‌ی برانزویک.

شرایط مرزی و دمای محیطی اعمال شده بر بدنه‌ی خاکی مدل‌سازی شده در نوشتار حاضر از عملیات میدانی انجام شده در منطقه‌ی برانزویک واقع در ایالت مین آمریکا و شرایط آب و هوایی آن منطقه در زمان انجام عملیات اقتباس شده است؛ به این ترتیب که در بخش آنالیز مکانیکی، سطح پایینی مدل در همه‌ی جهت‌ها کاملاً ثابت و مقید و سطوح جانبی هم فقط مجاز به حرکت در جهت عمودی بودند. همچنین دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده تحت سرباری به میزان ۱۴ کیلوپاسکال در سطح بالای خاکریز قرار گرفته بود. از طرف دیگر، شرایط مرزی حرارتی نیز به این صورت بود که فقط سطوح بالایی بدنه‌ی خاکی در معرض دمای محیطی قرار داشت، که دمای محیطی در لحظه‌ی $t=0$ حدوداً برابر ۱۲ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است و در عرض ۴ ماه به ۷- درجه‌ی سانتی‌گراد کاهش پیدا کرده و دمای سطح پایینی بدنه‌ی خاکی به صورت ثابت برابر ۳ درجه‌ی سانتی‌گراد تعریف شده است. برای مرزهای جانبی نیز هیچ‌گونه شرایط مرزی حرارتی تعریف نشده است؛ بنابراین مرزهای جانبی عایق حرارتی در نظر گرفته شده‌اند. شرایط مرزی اعمال شده به مدل و نمودار نوسان دمایی منطقه‌ی برانزویک به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شوند.

به منظور کاهش حجم و زمان محاسبات از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته [۳۷]

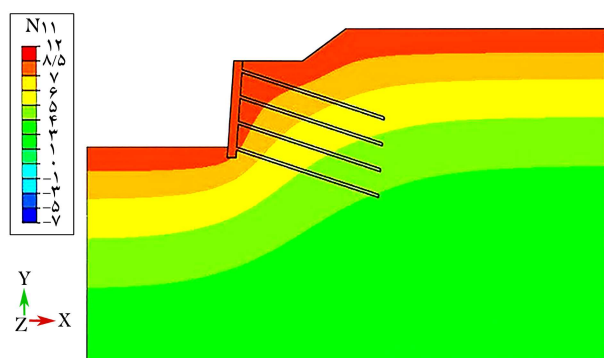
که در آن، E_{eq} مدول کشسانی معادل میخ و دوغاب، E_n مدول کشسانی میخ‌ها، E_g مدول کشسانی دوغاب، A_n مساحت مقطع عرضی میله‌ی مسلح‌کننده، A_g مساحت مقطع عرضی دوغاب تزریق شده ($A_g = A - A_n$)، A مساحت کل مقطع عرضی میخ دوغاب‌ریزی شده ($A = \pi D_{DH}^2 / 4$) و D_{DH} قطر سوراخ حفاری شده هستند.

همچنین روند مشابهی برای محاسبه‌ی رسانایی حرارتی معادل (K_{eq}) برای سیستم میخ دوغاب‌ریزی شده انجام شده است (رابطه‌ی ۳):

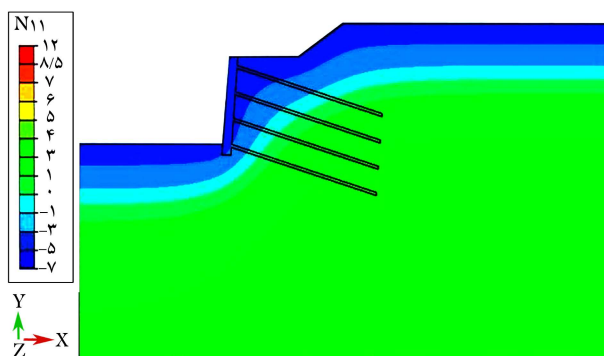
$$K_{eq} = K_n \left(\frac{A_n}{A} \right) + K_g \left(\frac{A_g}{A} \right) \quad (3)$$

در مدل‌سازی انجام گرفته، به منظور شبیه‌سازی رفتار بدنه‌ی خاکی تحت فرایند یخ‌زدگی از معیار تسلیم موهر - کولمب استفاده شده است. همچنین خصوصیات مصالح تعریف شده برای بدنه‌ی خاکی میخ‌کوبی شده از نوشتار منتشر شده‌ی ژو [۳۴] و همکاران (۲۰۰۱) برای ماسه‌ی سیلتی مستعد یخ زدن اقتباس شده، [۱۴] که در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که خصوصیات خاک تحت اثر فرایند یخ زدن تابع دما هستند؛ بنابراین در پژوهش حاضر نیز خصوصیات خاک به صورت وابسته به دما تعریف شده‌اند.

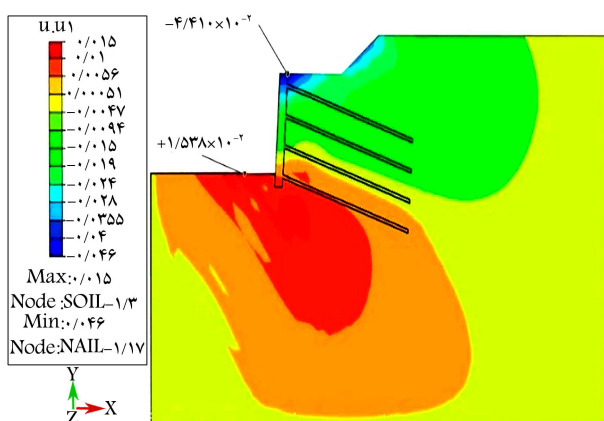
مقادیر پارامترهای معادل سیستم میخ دوغاب‌ریزی شده برای کوبل آنالیز حرارتی - مکانیکی در جدول ۲ ارائه شده است، که پارامترهای ارائه شده در آن عبارت‌اند از: K رسانایی حرارتی، C حرارت ویژه، E مدول کشسانی، ν نسبت پواسون، ϕ زاویه‌ی اصطکاک داخلی، Ψ زاویه‌ی اتساع، a ضریب انبساط حرارتی. همچنین چگالی ρ اعمال شده در خاک، بتن و میخ به ترتیب برابر ۱۸۴۲/۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب، ۲۲۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و میزان گرمای نهان ذوب نیز تقریباً برابر ۳۳۴ کیلوژول بر کیلوگرم در نظر گرفته شده است. از آن‌جا که ایجاد تماس کامل بین مواد دانه‌ی بی مانند خاک و بتن، که سطح زبر و ناهموار دارند، تقریباً غیرممکن است و این موضوع باعث تجمع هوا بین سطوح دو جسم در تماس می‌شود و هوا نیز مانند یک عایق حرارتی عمل می‌کند. بنابراین باید یک رسانایی حرارتی رابط بین دو جسم در تماس تعریف شود، که مقدار آن در مدل‌سازی ذکر شده برابر ۲۵ وات بر کلوین‌متر در نظر گرفته شده است، که از نوشتار ریس [۳۵] و توماس [۲۰۰۹] اقتباس شده است. [۱۵]



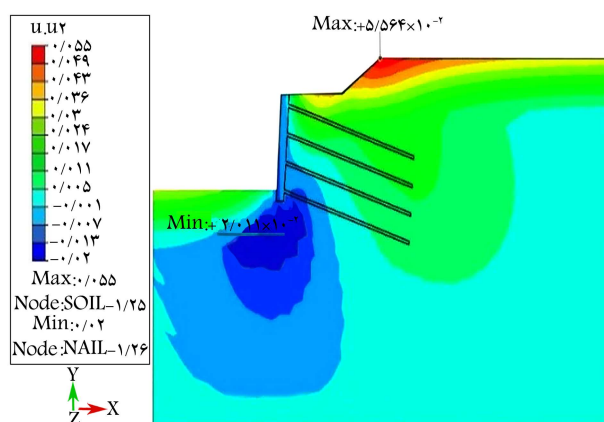
شکل ۵. کانتور توزیع دما در فصل گرم.



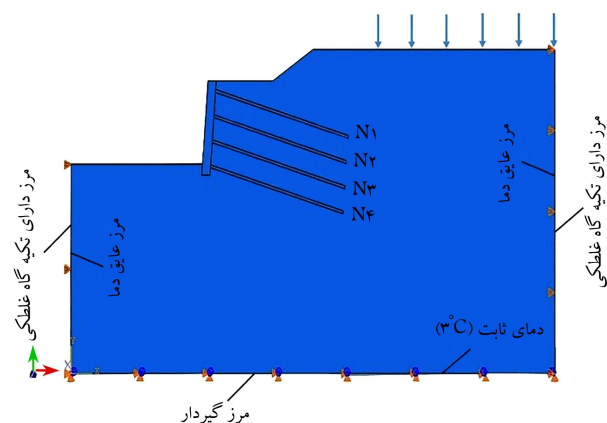
شکل ۶. کانتور توزیع دما در فصل سرد.



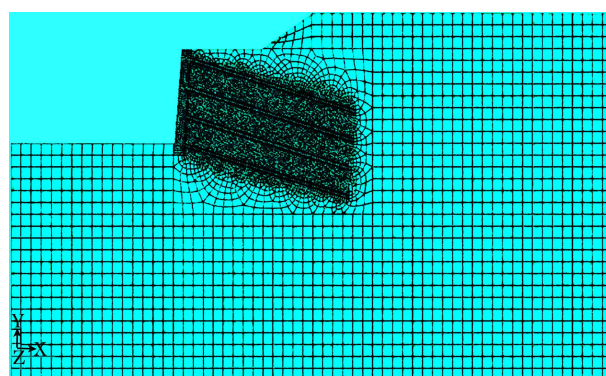
شکل ۷. کانتور جابه‌جایی افقی بدنه‌ی خاکی.



شکل ۸. کانتور جابه‌جایی قائم بدنه‌ی خاکی.



شکل ۳. شرایط مرزی و سربار اعمال شده به مدل.



شکل ۴. مش‌بندی اعمال شده به مدل.

استفاده شده است که فقط برای المان‌های چهار ضلعی و شش وجهی استفاده می‌شود و سایر المان‌ها از نوع یک پارچگی کامل^{۳۸} بودند. روش مذکور به دلیل کاهش تعداد نقاط انتگرال‌گیری، زمان انجام آنالیز را کاهش می‌دهد. مش‌بندی اعمال شده در مدل در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

۴. کانتور^{۳۹}های توزیع دمای محیطی در بدنه‌ی خاکی میخ‌کوبی شده و میزان جابه‌جایی‌های افقی و قائم بدنه‌ی خاکی تحت اثر بارگذاری مکانیکی و فرایند یخ‌زدگی

از آنجایی که دمای محیطی به عنوان تابعی از زمان در حال تغییر است، بنابراین در استپ‌کوپل دما - جابه‌جایی^{۴۰}، که برای حل مدل به کار رفته است، رسانایی دمایی از طریق رسانش گذرا انجام شده است. کانتورهای توزیع دمای سرد و گرم در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود.

باید به این نکته نیز توجه شود که دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده تحت اثر فرایند یخبندان و بارگذاری مکانیکی دچار تغییرات فیزیکی می‌شود، بنابراین کانتورهای جابه‌جایی افقی و قائم دیوار خاکی تحت شرایط مذکور در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در کانتور جابه‌جایی افقی مشاهده می‌شود تحت شرایط مذکور، بالای دیواره‌ی خاکی دچار انقباض در جهت افق شده است، که علت آن قرار گرفتن این قسمت از دیواره به طور کامل در معرض دمای یخ‌زدگی محیط است؛ اما پایین دیواره دچار انقباض شده است. در کانتور جابه‌جایی قائم نیز مشاهده می‌شود که

دیواره‌ی رویه و تقریباً کل بدنه‌ی خاکی به غیر از سطح بالایی بدنه، که تحت اثر بار ۱۴ کیلوپاسکال قرار گرفته است، دچار انبساط در جهت قائم شده‌اند.

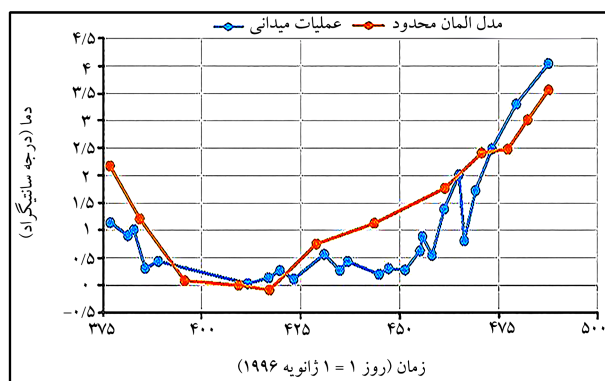
۵. راستی آزمایی

از آنجایی که ابعاد و هندسه‌ی دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده، شرایط مرزی مکانیکی و حرارتی و همچنین خصوصیات مصالح مدل شبیه‌سازی شده در پژوهش حاضر از بدنه‌ی خاکی میخ‌کوبی شده در ایالت مین آمریکا اقتباس شده است، بنابراین به منظور راستی‌آزمایی کوپل آنالیز دما - جابه‌جایی انجام شده، نتایج به دست آمده از آنالیز اخیر با نتایج عملیات میدانی انجام شده در ایالت مین واقع در آمریکا (۲۰۰۳) مقایسه شده است.

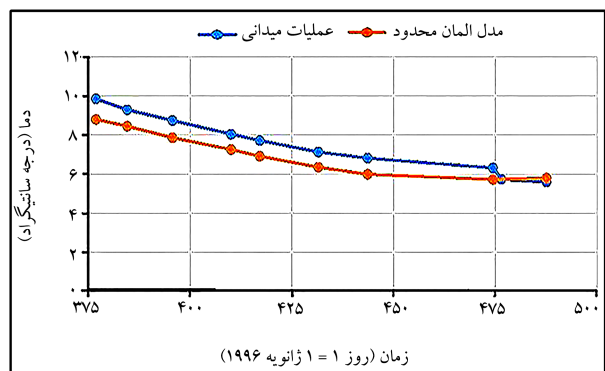
۱.۵. راستی آزمایی دمای اندازه‌گیری شده در مدل‌سازی در اعماق

۳/۹ و ۰/۳ متر در میخ‌های ردیف دوم، سوم و چهارم براساس نتایج عملیات میدانی

به منظور راستی‌آزمایی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی، ابتدا دمای اندازه‌گیری شده در اعماق ۳/۹ و ۰/۳ متری در میخ‌های ردیف دوم، سوم و چهارم از مدل‌سازی عددی با دمای اندازه‌گیری شده در عملیات میدانی در همان اعماق از میخ‌ها مقایسه شده است که در شکل‌های ۹ الی ۱۱ مشاهده می‌شوند.

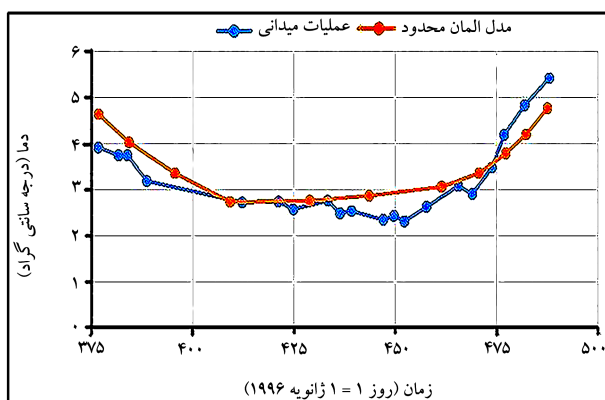


الف) عمق ۰/۳ متر؛

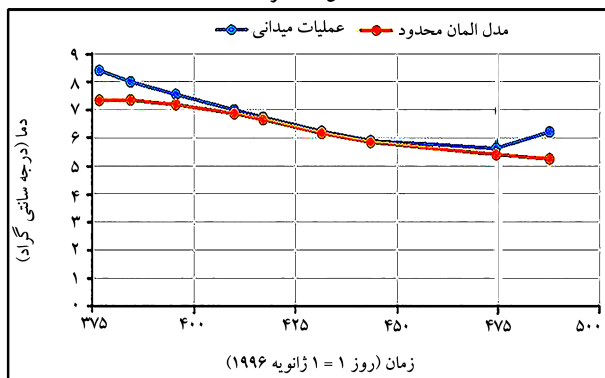


ب) عمق ۳/۹ متر.

شکل ۱۰. دمای اندازه‌گیری شده از میخ ردیف سوم در اعماق ۳/۹ و ۰/۳ متر.

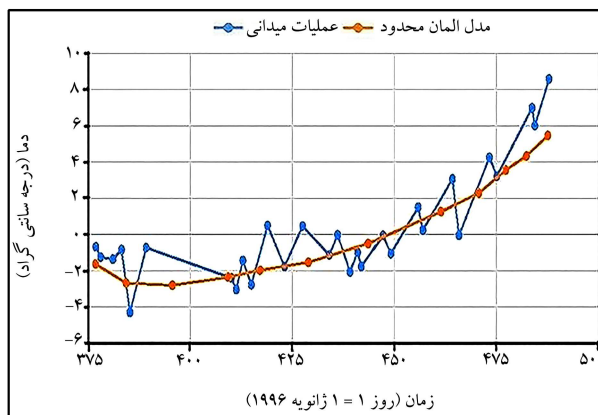


الف) عمق ۰/۳ متر؛

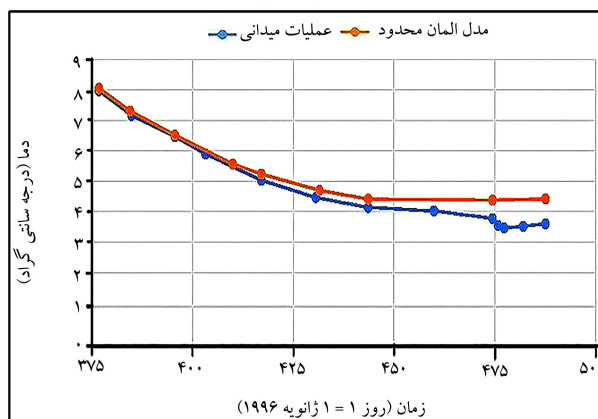


ب) عمق ۳/۹ متر.

شکل ۱۱. دمای اندازه‌گیری شده از میخ ردیف چهارم در اعماق ۳/۹ و ۰/۳ متر.

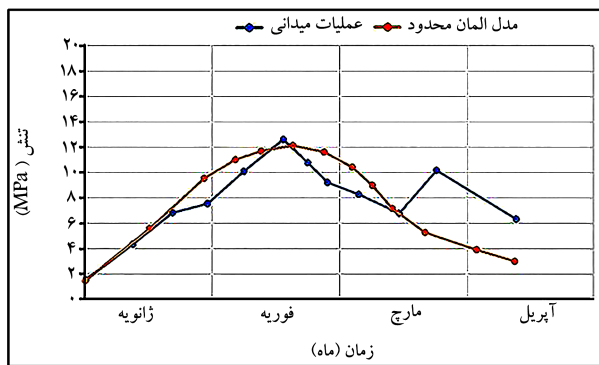


الف) عمق ۰/۳ متر؛

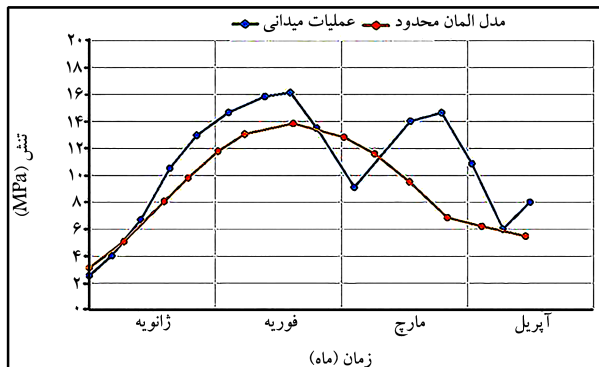


ب) عمق ۳/۹ متر.

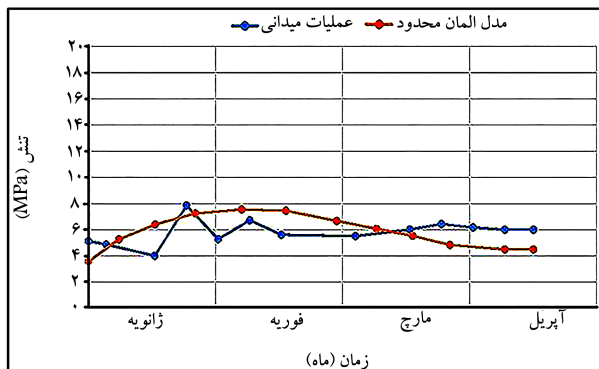
شکل ۹. دمای اندازه‌گیری شده از میخ ردیف دوم در اعماق ۳/۹ و ۰/۳ متر.



الف) میخ ردیف دوم؛

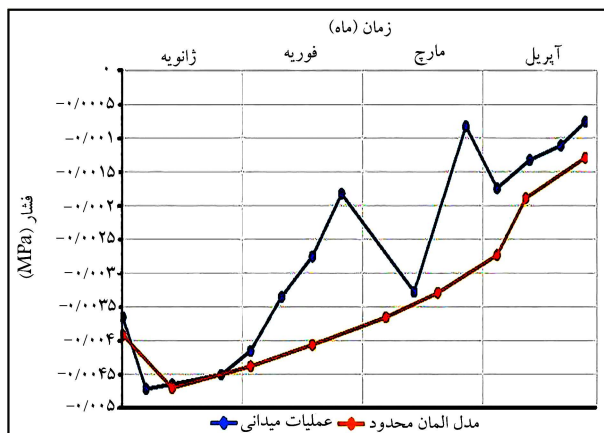


ب) میخ ردیف سوم؛



ج) میخ ردیف چهارم.

شکل ۱۲. میزان تنش ایجاد شده ناشی از فعالیت یخبندان در میخ‌های ردیف دوم، سوم و چهارم.



شکل ۱۳. فشار ناشی از انبساط خاک بر دیواره ی رویه.

۲.۵. راستی آزمایی میزان تنش اندازه‌گیری شده در میخ‌های

تقویت‌کننده‌ی بدنه‌ی خاکی و فشار وارده به دیواره‌ی رویه در

مدل‌سازی انجام شده براساس نتایج عملیات میدانی

به منظور کامل‌تر شدن فرایند راستی‌آزمایی، بیشترین میزان تنش ایجاد شده ناشی از فعالیت یخ‌زدگی در میخ‌های ردیف دوم، سوم و چهارم (اطلاعات میخ ردیف اول از عملیات میدانی موجود نیست) به دست آمده از مدل‌سازی عددی و عملیات میدانی در شکل‌های ۱۲ (الف، ب، و ج) مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین میزان تنش ایجاد شده ناشی از فرایند یخ‌زدن در میخ ردیف سوم، یعنی نزدیک‌ترین میخ به مرکز دیواره رخ داده است.

همچنین از آن‌جایی که نفوذ دمای یخ‌زدگی به درون خاک، یخ‌زدن خاک و در نتیجه انبساط آن را به دنبال دارد، این موضوع باعث ایجاد فشار رو به بیرون بر دیواره‌ی رویه ی میخ‌کوبی شده می‌شود؛ بنابراین در شکل ۱۳، میزان فشار اندازه‌گیری شده‌ی ناشی از انبساط خاک در آنالیز المان محدود و عملیات میدانی با هم مقایسه شده است. مطابق نمودارهای ارائه شده در بخش راستی‌آزمایی مشاهده شد که مطابقت نسبتاً خوبی بین نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی با نتایج عملیات میدانی با اندکی اختلاف حاصل شده است؛ چرا که در عملیات میدانی، مطمئناً عواملی وجود دارند که به درستی در نرم‌افزار محاسباتی لحاظ نمی‌شوند؛ نظیر: توزیع یکنواخت جرم، یکسان در نظر گرفتن ضریب انتقال حرارت و ... از طرفی دیگر، ابزارهای به کار گرفته شده نیز در مطالعات میدانی خطاهایی دارند که باعث تأثیر در نتایج اعلامی می‌شوند. به طور خاص، نمودارهای عملیات میدانی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، پراکندگی‌هایی دارند که خود می‌توانند بیان‌گر خطاهای احتمالی در ثبت و ضبط نتایج و یا تأثیر عوامل ناشناخته باشد.

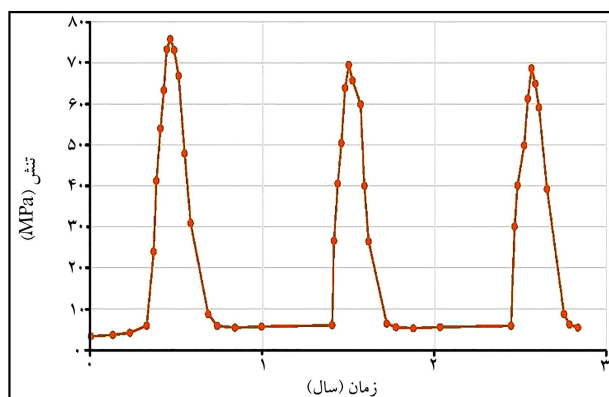
۶. بحث و بررسی

پس از راستی‌آزمایی مدل‌سازی انجام شده، بدنه‌ی خاکی میخ‌کوبی شده در دو مدل‌سازی مجزا، یک بار با دمای طبیعی منطقه‌ی برانزویک و بار دیگر، براساس یک دمای بحرانی تحت تأثیر چرخه‌های متوالی یخ‌زدگی قرار گرفت تا رفتار بدنه‌ی خاکی مسلح شده بررسی شود. در انتها، نیز به منظور اصلاح مدل رفتاری موهر-کولمب، معیار قطع کشش در خاک در مدل‌سازی انجام گرفته اعمال و نتایج آن با نتایج مدل‌سازی قبلی مقایسه شده است.

۱.۶. بررسی تأثیر چرخه‌های یخبندان براساس دمای طبیعی

منطقه‌ی برانزویک در رفتار بدنه‌ی خاکی میخ‌کوبی شده

در بخش حاضر، براساس دمای طبیعی منطقه‌ی برانزویک، سه چرخه متوالی یخ‌زدن و ذوب شدن بر بدنه‌ی خاکی میخ‌کوبی شده اعمال و میزان تنش ایجاد شده در میخ‌ها در چرخه‌های اول، دوم و سوم با هم مقایسه شده‌اند. طبق نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۴ (الف، ب و ج)، مشاهده می‌شود که با گذشت زمان و با اعمال چرخه‌های دوم و سوم یخ‌زدگی، میزان تنش در میخ‌ها کاهش یافته است، به طوری که میزان تنش ایجاد شده در سیکل سوم کمتر از تنش ایجاد شده در چرخه دوم و همچنین کمتر از تنش ایجاد شده در چرخه اول یخ‌زدگی بوده است، که کاهش تنش ذکر شده، در میخ ردیف چهارم بیشتر مشهود بوده است.



شکل ۱۵. میزان تنش ایجاد شده در میخ ردیف سوم ناشی از اعمال سه سیکل یخ زدگی با دمای فرضی ۴۰- درجه‌ی سانتی‌گراد.

اثر شرایط بحرانی (دمای فرضی ۴۰- درجه‌ی سانتی‌گراد)، تنش ایجاد شده ناشی از شرایط مذکور در میخ ردیف سوم به عنوان ملاک بررسی پایداری دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده در نظر گرفته شده است. طبق نمودار ارائه شده در شکل ۱۵، که نشان‌دهنده‌ی میزان تنش ایجاد شده در میخ ردیف سوم تحت شرایط مذکور است، مشاهده می‌شود که بیشترین میزان تنش، حدوداً برابر ۷۵ مگاپاسکال به دست آمده و از آن جایی که آستانه‌ی گسیختگی فولاد برابر ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است؛ بنابراین تحت اثر دمای فرضی ۴۰- درجه‌ی سانتی‌گراد، که دمایی بحرانی به حساب می‌آید، دیواره‌ی خاکی مورد نظر دچار گسیختگی نشده است.

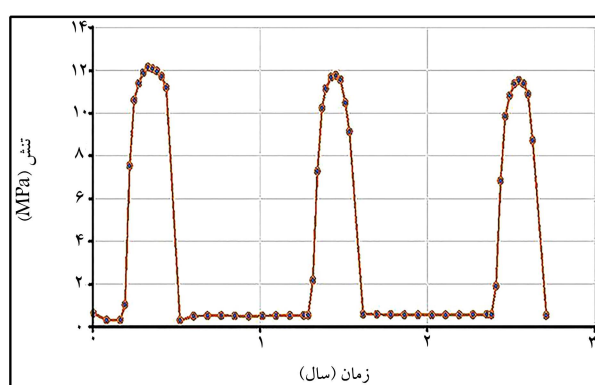
۳.۶. بررسی تأثیر معیار قطع کشش^{۴۱} در خاک در رفتار بدنه‌ی

خاکی تقویت شده با سیستم میخ‌کوبی تحت اثر شرایط یخ‌زدگی

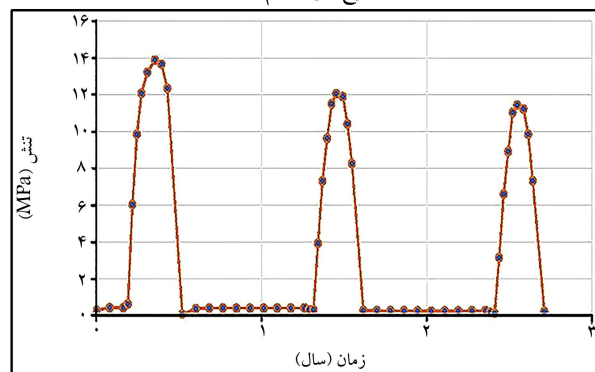
معیار گسیختگی موهر-کولمب، که معمولاً برای نشان دادن میزان استحکام خاک به کار برده می‌شود، مقاومت کششی بیشتر خاک‌ها را دست بالا برآورد می‌کند. با توجه به این موضوع و به منظور اصلاح مدل رفتاری موهر-کولمب می‌توان مفهوم قطع کشش را برای بررسی تأثیر کاهش مقاومت کششی خاک در رفتار بدنه‌ی خاکی تحت شرایط یخ‌زدگی اتخاذ کرد.^[۱۶] بنابراین در مدل‌سازی انجام شده در پژوهش حاضر، معیار قطع کشش در خاک اعمال و نتایج آن با نتایج مدل‌سازی قبلی مقایسه شده است. طبق نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که در اثر کاهش مقاومت کششی خاک، میزان جابه‌جایی افقی و قائم دیواره‌ی خاکی نسبت به مدل قبلی، تحت شرایط یخبندان افزایش یافته است. کانتور جابه‌جایی افقی و قائم دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌شود. افزایش میزان جابه‌جایی بدنه‌ی خاکی به این معنی است که المان‌های مسلح‌کننده، تأثیر کمتری در پایداری دیواره‌ی خاکی داشته‌اند، بنابراین میزان تنش کمتری در آنها ایجاد شده است که این موضوع در نمودارهای ۱۸ (الف، ب، و ج) مشاهده می‌شود. مطابق نمودارهای اخیر، بیشترین تنش ایجاد شده در میخ‌های ردیف اول، دوم، و سوم در حالت اعمال معیار قطع کشش در خاک نسبت به مدلی که در آن مفهوم قطع کشش اعمال نشده، کاهش یافته است.

۷. نتیجه‌گیری

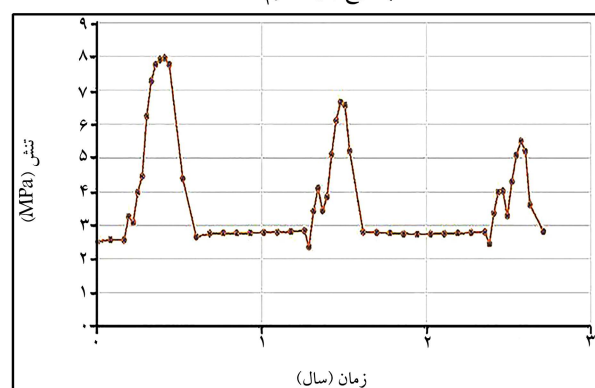
در نوشتار حاضر، به بررسی اثر چرخه‌یخبندان در دیواره‌ی خاکی تقویت شده با



الف) میخ ردیف دوم؛



ب) میخ ردیف سوم؛



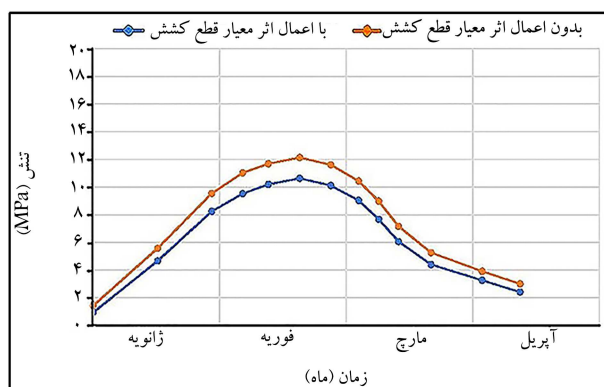
ج) میخ ردیف چهارم.

شکل ۱۴. میزان تنش ایجاد شده‌ی ناشی از اعمال سه چرخه‌ی یخ‌زدگی در میخ‌های ردیف دوم، سوم و چهارم.

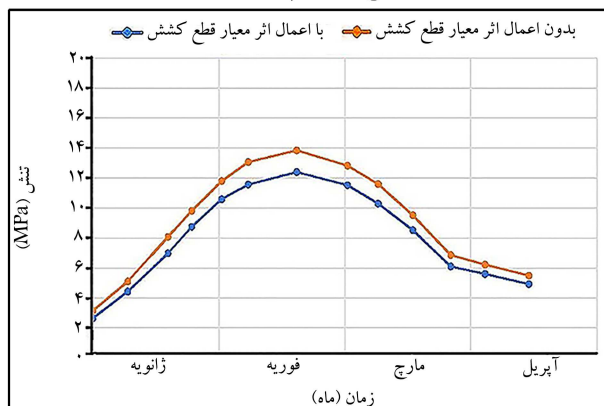
۲.۶. بررسی تأثیر چرخه‌های یخبندان براساس دمای بحرانی ۴۰-

درجه‌ی سانتی‌گراد در پایداری دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده

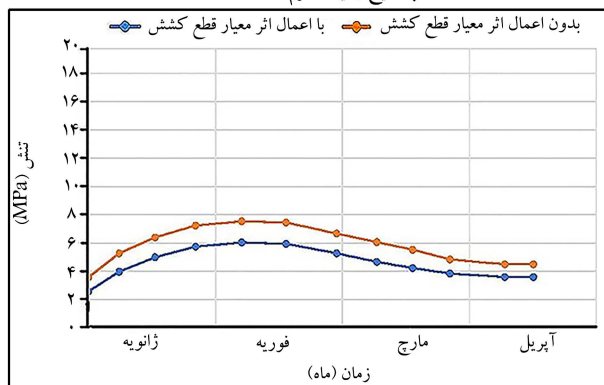
در ادامه به منظور بررسی پایداری دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده در منطقه‌ی برانزویک واقع در ایالات متحده‌ی آمریکا تحت شرایط بحرانی فرضی، بدنه‌ی خاکی تقویت شده با سیستم میخ‌کوبی، تحت تأثیر سه سیکل متوالی یخ‌زدگی براساس دمای فرضی ۴۰- درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفت، تا پایداری یا عدم پایداری آن بررسی شود. همان‌طور که در راستی‌آزمایی انجام شده در بخش ۲.۵. نشان داده شد، بیشترین تنش ایجاد شده ناشی از فعالیت یخ‌زدگی در میخ ردیف سوم رخ داده است. بنابراین در بخش کنونی نیز به منظور بررسی پایداری دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده تحت



الف) میخ ردیف دوم؛



ب) میخ ردیف سوم؛

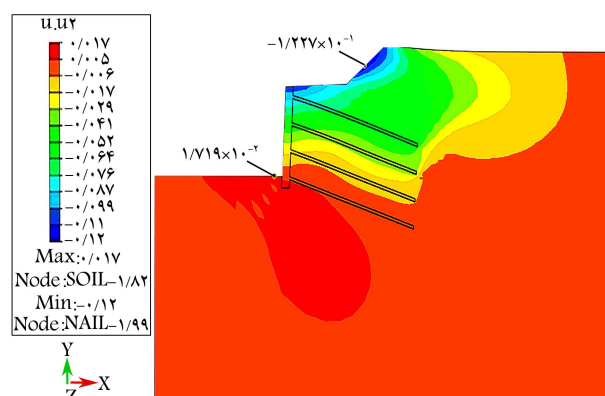


ج) میخ ردیف چهارم؛

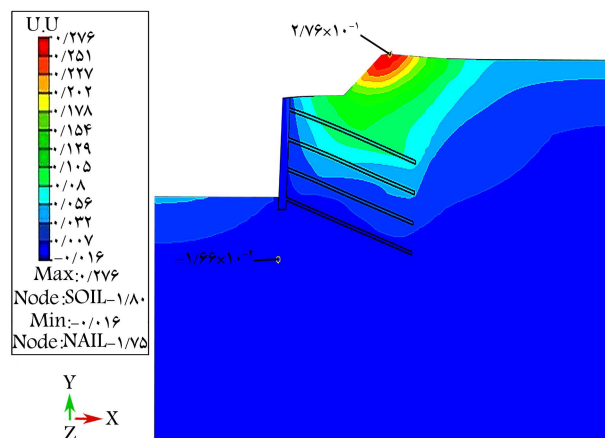
شکل ۱۸. مقایسه‌ی میزان تنش ایجاد شده در دو حالت اعمال و عدم اعمال کاهش مقاومت کشش خاک در میخ‌های ردیف دوم، سوم و چهارم.

مگاپاسکال به دست آمده و از آنجایی که آستانه‌ی گسیختگی فولاد برابر 240 مگاپاسکال است، دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده دچار گسیختگی نشده است؛

۳. با اعمال اثر معیار قطع کشش خاک در مدل‌سازی و کاهش مقاومت کششی خاک در معیار گسیختگی موهر-کولمب، میزان جابه‌جایی بدنه‌ی خاکی تحت اثر شرایط یخبندان دچار افزایش شده است؛ که بیانگر تأثیر کمتر المان‌های مسلح‌کننده در پایداری دیواره‌ی خاکی تحت شرایط جدید بوده و میزان تنش ایجاد شده در میخ‌ها نسبت به مدل قبلی، که در آن مفهوم قطع کشش اعمال نشده است، دچار کاهش شده است.



شکل ۱۶. کانتور جابه‌جایی افقی بدنه‌ی خاکی در حالت کاهش مقاومت کششی خاک.



شکل ۱۷. کانتور جابه‌جایی قائم بدنه‌ی خاکی در حالت کاهش مقاومت کششی خاک.

سیستم میخ‌کوبی پرداخته شده است. به همین منظور یک دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده در منطقه‌ی برانزویک واقع در ایالت مین، ایالات متحده‌ی آمریکا تحت اثر دمای یخ‌زدگی مدل‌سازی شده است. پس از راستی‌آزمایی نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج عملیات میدانی انجام شده بر روی دیواره‌ی خاکی اخیر توسط دوشن (۲۰۰۳)، ابتدا در یک مدل‌سازی، سه چرخه‌متوالی یخ زدن و ذوب شدن براساس دمای طبیعی منطقه‌ی برانزویک به مدل اعمال شد تا میزان تنش ایجاد شده در میخ‌ها در چرخه‌های اول، دوم و سوم یخبندان بررسی شود. سپس در مدل‌سازی بعدی، به منظور بررسی پایداری یا عدم پایداری دیواره‌ی خاکی میخ‌کوبی شده، باز هم سه چرخه‌ی یخ زدن و ذوب شدن، اما این بار با دمای فرضی -40° درجه‌ی سانتی‌گراد به مدل اعمال و در ادامه نیز اثر معیار قطع کشش در خاک تحت شرایط یخبندان در رفتار بدنه‌ی خاکی میخ‌کوبی شده بررسی شده و این نتایج به دست آمده است؛

۱. با گذشت زمان و اعمال چرخه‌های متوالی یخ زدن و ذوب شدن بر بدنه‌ی خاکی میخ‌کوبی شده، میزان تنش ایجاد شده در میخ‌ها در هر چرخه نسبت به چرخه قبلی کاهش یافته است. این میزان کاهش در چرخه سوم نسبت به چرخه دوم و به همین ترتیب نسبت به چرخه اول بیشتر بوده است؛

۲. در اثر اعمال سه چرخه متوالی یخ زدن و ذوب شدن با دمای فرضی -40° درجه‌ی سانتی‌گراد، بیشترین تنش ایجاد شده در میخ‌ها برابر 75

۸. محدودیت‌های پژوهش

دمایی و مکانیکی حاکم بر مدل، نوع خاک محل، نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی به منظور راستی‌آزمایی نتایج عددی و ... از محدودیت‌های پژوهش حاضر هستند.

از آن‌جا که مبنای مدل‌سازی انجام شده در پژوهش حاضر، عملیات میدانی صورت گرفته در سال ۲۰۰۳ در آمریکا بوده است، بنابراین مواردی از قبیل شرایط مرزی

پانوشته‌ها

1. Nail
2. Shotcrete
3. Qi
4. Modulus of Elasticity
5. Liu
6. Shastri
7. Alaska
8. Elasto Plastic
9. Guilloux
10. La Clusaz
11. Nicholson
12. Cumberland Gap
13. Kentucky
14. Tennessee
15. Elias
16. Unterreiner
17. Kingsbury
18. Maine
19. Duchesne
20. Brunswick
21. Maine
22. Sequential Coupling
23. Fully Coupled Thermo-Mechanical Analysis
24. Conduction
25. Convection
26. Radiation
27. ABAQUS
28. Multi-Physical
29. One-Way Coupling
30. Sequential Coupling
31. Full Coupling
32. Step
33. Coupled Temperature Displacement
34. Xu
35. Rees
36. Thomas
37. Reduced Integration
38. Full Integration
39. Contour
40. Coupled Temperature Displacement
41. Tension Cut-Off

منابع (References)

1. Jumikis, A.R., 1997. The cryogenic system soil-water-temperature. *AJP*, 77(1), pp.112-120.
2. Qi, J., Ma, W. and Song, C., 2007. Influence of freeze-thaw on engineering properties of silty soil. *Cold Regions Science and Technology*, 53(3), pp.397-404. DOI:10.1016/j.coldregions.2007.05.010.
3. Liu, J., Chang, D. and YU, Q., 2016. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of

- a silty sand. *Engineering Geology*, 210, pp.23-32. DOI:10.1016/j.enggeo.2016.05.019.
4. Liu, Z., Liu, J., Li, X. and et al., 2019. Experimental study on the volume and strength change of an unsaturated silty clay upon freezing. *Cold Regions Science and Technology*, 157, pp. 1-12. DOI:10.1016/j.coldregions.2018.09.008.
5. Shastri, A., Sanchez, M., Gai, X. and et al., 2021. Mechanical behavior of frozen soils: Experimental investigation and numerical modeling. *Computers and Geotechnics*, 138, pp.104-361.
6. Guilloux, A., Notte, G. and Gonin, H., 1983. Experiences on retaining a structure by nailing in marine soils. *Proceeding of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*.
7. Nicholson, P., 1984. In situ ground reinforcement techniques. *International Conference on Deep Foundations*, Beijing, China, pp.1-9.
8. Elias, V. and Juran, I., 1991. Soil nailing for stabilization of highway slopes and excavations. Earth Engineering and Sciences, Inc., Baltimore, for FHWA, McLean, VA, pp.88-89.
9. Unterreiner, P., 1994. Contribution to the study and numeric modeling of soil nails: Design estimates for deformation of retaining structures. Ph.D. Dissertation, Paris.
10. Kingsbury, D., Sandford, T. and Humphrey, D., 2002. Soil nail forces caused by frost. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1808, pp.38-46. <https://doi.org/10.3141/1808-05>.
11. Duchesne, S.M., 2003. Effects of frost heave on a soil nail wall in brunswick, maine. Ph.D dissertation, Northeastern University.
12. Babaei, M., Liu, J. and Stasseff, D., 2016. Numerical analysis of freezing and thawing influence on soil nail walls. *CGS GeoVancouver Conference Vancouver*.
13. Minkoff, S.E., Stone, C.M., Bryant, S. Pesynska, M. and Wheeler, M.F., 2003. Coupled fluid flow and geomechanical deformation modeling. *Journal of Petroleum Sciences and Engineering*, 38(1), pp.37-56. DOI:10.1016/S0920-4105(03)00021-4.
14. Xu, X.Z., Wang, J.C. and Zhang, L.X., 2001. Frozen soil physics. Beijing Science and Technology Press, Beijing.
15. Thomas, H.R. and Rees, S.W., 2009. Measured and simulated heat transfer to foundation soils. *Geotechnique, ICE Virtual Library*, 59(4), pp.365-375. DOI:10.1680/geot.2008.59.4.365.
16. Li, Z.W. and Yang, X.L., 2019. Active earth pressure for retaining structures in cohesive backfills with tensile strength cut-off. *Computres and Geotechnics*, 110, pp.242-250. DOI:10.1016/j.compgeo.2019.02.023.