

مطالعه عددی ظرفیت بیرون کشیدگی سطح تماس خاک - میخ با استفاده از روش اجزای

محدود

علیرضا سعیدی عزیزکندی^{۱*}محمدحسن بازیار^۲حامد دشتارا^۳امیرحسین کلاهدوزان^۳

چکیده

میخکوبی خاک یکی از روش‌های متداول در پایدارسازی ترانشه‌ها، گودبرداری‌ها و همچنین دیوارهای حائل است. ظرفیت بیرون کشیدگی سطح تماس خاک - میخ یک پارامتر بسیار مهم در طراحی و ارزیابی ایمنی سیستم‌های میخکوبی شده است. در این مقاله، به منظور شبیه‌سازی فرایند آزمایش بیرون کشیدگی یک المان میخ، مدل اجزای محدود سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس توسعه داده شد. صحت‌سنجی مدل عددی توسط مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی انجام گرفت. بر این اساس، از مدل صحت‌سنجی شده جهت بررسی اثر مقادیر مختلف مدول الاستیسیته خاک، قطر میخ و سرعت بیرون کشیدگی بر روی ظرفیت بیرون کشیدگی میخ استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که با افزایش مدول الاستیسیته خاک، مقاومت بیرون کشیدگی حداکثر افزایش می‌یابد. میزان این افزایش در مدول‌های الاستیسیته پایین چندان چشمگیر نبوده اما برای مدول‌های بیشتر از ۲۷ مگا پاسکال قابل توجه خواهد بود. نتایج همچنین نشان دادند که میخ‌های با قطر بزرگ‌تر نسبت به میخ‌های با قطر کوچک‌تر، مقاومت بیرون کشیدگی بیشتر از خود نشان می‌دهند که علت این مطلب را می‌توان سطح تماس بیشتر با خاک مجاور و در نتیجه بسیج شدن تنش برشی بیشتر در میخ‌های با قطر بزرگ‌تر بیان نمود. در نهایت، مشاهده گردید که با افزایش سرعت بیرون کشیدگی میخ، مقاومت کاهش می‌یابد که دلیل آن نبود زمان کافی جهت بسیج کامل تنش برشی در سطح تماس خاک - میخ است.

واژه‌های کلیدی

میخکوبی خاک، روش اجزای محدود، ظرفیت بیرون کشیدگی، مطالعه عددی، آباکوس

۱. استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران. asaeeidia@iust.ac.ir

۲. استاد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳. کارشناس ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در رشته مهندسی عمران، احداث سازه‌ها، حفاظت از گودبرداری‌ها و ساختمان‌های موجود در مجاورت آن‌ها و تثبیت دیواره‌های خاکی است. عدم رعایت روش‌های مناسب به‌منظور حفاظت گودها و همچنین شیب‌های در حال احداث، منجر به خسارات جبران‌ناپذیری خواهد شد و مخاطرات به وجود آمده ناشی از نشست‌های احتمالی و کاهش ظرفیت باربری و تغییر مکان‌های جانبی، موجب ایجاد ترک در سازه‌های مجاور گود خواهد شد (لازارته و همکاران^۱، ۲۰۱۵).

به‌منظور جلوگیری از وقوع موارد ذکرشده لازم است قبل از شروع عملیات گودبرداری از روش‌های نگهداری و مهاربندی جانبی مناسبی استفاده شود. در این راستا از سیستم‌های حفاظت جانبی متعددی استفاده می‌گردد که با توجه به عملکرد مناسب و مزایای استفاده از میخ در خاک‌ها نسبت به سایر روش‌های ذکرشده از قبیل امکان اجرا در مجاورت سازه‌های موجود، روش ساخت مطابق با معیارهای محیط‌زیستی (بدون لرزش و سروصدا)، سادگی اجرا، سازگار بودن با عوارض زمین و وضعیت طرح و محل (انعطاف‌پذیری روش)، تغییرشکل‌های کم، صرفه‌جویی اقتصادی در مقایسه با دیگر روش‌های ساخت خصوصاً سازه‌های نگهدارنده، امکان کار در فضاها محدود، اشغال فضای کمتر نسبت به مهارب به جهت طول کوتاه‌تر میخ‌ها، سرعت بالای انجام کار، اطمینان بیشتر میخ‌ها نسبت به مهارب‌ها، دست‌کاری و اصلاح طرح بدون از دست دادن سطح ایمنی و مناسب بودن برای کاربردهای موقتی و دائمی، مطالعه سیستم میخکوبی در این تحقیق مدنظر قرار گرفته است (شلوسر و اونترینر^۲، ۱۹۹۱).

یکی از فاکتورهای کلیدی در طراحی و تحلیل ضریب اطمینان پایداری سیستم‌های میخکوبی شده، میزان مقاومت بیرون‌کشیدگی در سطح تماس خاک-میخ است. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مدل‌های حقیقی خاک میخکوبی شده نشان می‌دهند که گسیختگی در یک توده

مسلح می‌تواند بر اثر گسیختگی مصالح تسلیح و یا ازجا درآمدگی مصالح تسلیح از داخل خاک رخ دهد (کارتیر^۳، ۱۹۸۳؛ ژیلوکس و همکاران^۴، ۱۹۸۳). بیرون‌کشیدگی میخ یک حالت ناپایداری داخلی می‌باشد و مقاومت بیرون-کشیدگی با توجه به‌اندازه میخ (قطر و طول میخ) به دست می‌آید. مقاومت چسبندگی را می‌توان مقاومت برشی بسیج شده در طول سطح مشترک خاک و ملات تزریقی در نظر گرفت (فرنزن^۵، ۱۹۹۸). از پژوهش‌های انجام‌گرفته در گذشته به‌خوبی مشخص‌شده که مکانیسم انتقال بار بین میخ‌ها و خاک تا حد ظرفیت ازجادرآمدگی نهایی به پارامترهایی نظیر تکنیک نصب، روش حفاری، نوع گروت، روش تزریق، فشار تزریق، اندازه و شکل مسلح‌کننده، مشخصات هندسی خاک محل (خصوصاً دانسیته نسبی خاک یا نسبت پیش‌تحکیمی)، نفوذپذیری خاک و مشخصه-های مقاومت برشی خاک بستگی دارد (مرادی و زادکریم، ۱۳۹۴).

محققین بسیاری در قالب آزمایش‌های در محل بزرگ‌مقیاس، آزمون‌های آزمایشگاهی، مدل‌سازی‌های عددی و یا مدل‌های تحلیلی بر روی مقاومت بیرون‌کشیدگی سطح تماس خاک-میخ و عواملی که می‌توانند بر آن مؤثر باشند، مطالعه کرده‌اند. چو و این^۶ در سال ۲۰۰۵ از دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس و یک دستگاه آزمون بیرون‌کشیدگی آزمایشگاهی جهت ارزیابی مقاومت برشی در سطح تماس خاک گرانیته به‌طور کامل تجزیه‌شده^۷ (CDG) و میخ استفاده نمودند. مقایسه‌هایی میان نتایج با توجه به منحنی‌های تنش-تغییرمکان و مقاومت برشی سطح تماس نسبت به زبری سطح تماس انجام گرفت. مطابقت خوبی میان نتایج این دو آزمایش، تحت فشار سربار و شرایط آزمایشگاهی یکسان گزارش شد.

سو و همکاران^۸ در سال ۲۰۱۰ مجموعه‌ای از آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی در خاک CDG را به‌منظور بررسی تأثیر تعدادی از عوامل روی مقاومت برشی سطح تماس خاک-میخ انجام دادند. پس‌از آن یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی برای شبیه‌سازی این آزمایش‌ها و همچنین ارزیابی اثر مقادیر

۶. Chu and Yin

۷. Completely decomposed granite

۸. Su et al.

۱. Lazarte et al.

۲. Schlosser & Unterreiner

۳. Cartier

۴. Guilloux et al.

۵. Franzen

صحت‌سنجی شده جهت بررسی عوامل مختلف شامل مدول الاستیسیته خاک، قطر میخ و همچنین سرعت بیرون کشیدگی میخ بر میزان مقاومت بیرون کشیدگی استفاده خواهد شد.

هندس، مش‌بندی و شرایط مرزی

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، در این مقاله از مدل‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس جهت شبیه‌سازی و تحلیل آزمایش‌های بیرون کشیدگی میخ استفاده شده است. هندسه مدل اجزای محدود ایجاد شده در شکل (۱) قابل مشاهده است. ابعاد مدل ساخته شده ۱ متر در ۰٫۳ متر در ۰٫۸۱ متر بوده است که مشابه ابعاد استفاده شده در آزمایش‌های انجام گرفته توسط سو و همکاران در سال ۲۰۱۰ است. جهت صرفه‌جویی در زمان تحلیل، به دلیل متقارن بودن هندسه، شرایط بارگذاری و شرایط مرزی، می‌توان تنها نیمی از مدل فیزیکی را در مطالعات عددی شبیه‌سازی نمود. قطر میخ ۰٫۱ متر و طول آن نیز ۱٫۲ بوده که ۰٫۲ متر آن به عنوان طول اضافی در بیرون جعبه‌ی بیرون کشیدگی قرار می‌گیرد. مرکز میخ در ارتفاع ۰٫۳۱۵ متری از کف مدل قرار دارد. یک لایه نازک از خاک مجاور میخ با ضخامت ۴ میلی‌متر که با عنوان ناحیه برشی نیز شناخته می‌شود، در نظر گرفته شد. یک صفحه چوبی با ضخامت ۰٫۰۱ متر نیز به منظور اعمال فشار سربار در بالای خاک قرار گرفت. خاک، میخ و ناحیه برشی همگی با استفاده از المان‌های آجری خطی هشت گره‌ای با انتگرال کاهش یافته ایجاد شدند. در تمام طول مدت تحلیل به دلیل تغییر شکل‌های بزرگ، از حل‌کننده^۵ با ماتریس غیرمتقارن استفاده گردید.

شرایط مرزی اعمال شده به مدل اجزای محدود در شکل (۲) نمایش داده شده است. در کف مدل از تکیه‌گاه مفصلی استفاده شد تا تغییر مکان در جهات X، Y و Z محدود گردد. در سطوح جانبی مدل، به منظور شبیه‌سازی صفحه تقارن^۶ و مرز جعبه آزمایش، از تکیه‌گاه‌های غلتکی استفاده گردیده است. این موضوع بدان معناست که در این صفحات، جابجایی در جهت X مقید شده است.

مختلف فشار سربار و زاویه اتساع ناحیه برشی در سطح تماس خاک- میخ توسعه دادند. نتایج مدل‌سازی عددی تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند.

بین و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۱ یک روش تحلیلی ساده شده جهت محاسبه تنش برشی حداکثر در سطح تماس خاک- میخ پیشنهاد داده و آن را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی نمودند. این روش ساده اثر تنش نرمال پس از اجرای میخ، تنش محصورکننده در اثر اتساع خاک و همچنین فشار تزریق دوغاب را در نظر می‌گیرد. علاوه بر این، آن‌ها یک مطالعه پارامتریک جهت بررسی اثر چند عامل حیاتی از جمله شعاع گمانه، زاویه اتساع، فشار سربار و فشار تزریق روی تنش برشی حداکثر در سطح تماس خاک- میخ انجام دادند.

ژو و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۱ یک مدل اجزای محدود سه بعدی را با در نظر گرفتن تمامی فرایندهای موجود در آزمایش بیرون کشیدگی توسعه داده و تأثیر فشار سربار و تزریق دوغاب را مورد بررسی قرار دادند. قرابت نتایج مدل- سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی، توانایی مدل‌سازی اجزای محدود در شبیه‌سازی دقیق آزمایش بیرون کشیدگی میخ را نشان داد.

هانگ و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۳ مجموعه‌ای از آزمایش‌های بیرون کشیدگی میخ‌های تزریق شده با دوغاب سیمان را برای یک شیروانی در هنگ کنگ انجام دادند تا اثر فشار تزریق دوغاب روی مقاومت برشی سطح تماس خاک- میخ را مطالعه کنند. به منظور بهبود درک سازوکار تماسی میان میخ و خاک مجاور در محل، به خصوص در شرایط وجود فشار تزریق، نتایج و مشاهدات انجام گرفته در آزمایش‌های در محل انجام گرفته با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی مقایسه شد.

در این مقاله، از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس^۴ جهت شبیه‌سازی آزمایش‌های بیرون کشیدگی انجام گرفته توسط سو و همکاران در سال ۲۰۱۰ استفاده شده است. در ابتدا مش‌بندی، مدل رفتاری و پارامترهای مصالح و همچنین ترتیب انجام مدل‌سازی ارائه خواهد شد. سپس مدل اجزای محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده و مقایسه‌های میان نتایج عددی و آزمایشگاهی ارائه می‌گردد. در نهایت، از مدل اجزای محدود

۴. ABAQUS

۵. Solver

۶. Symmetry

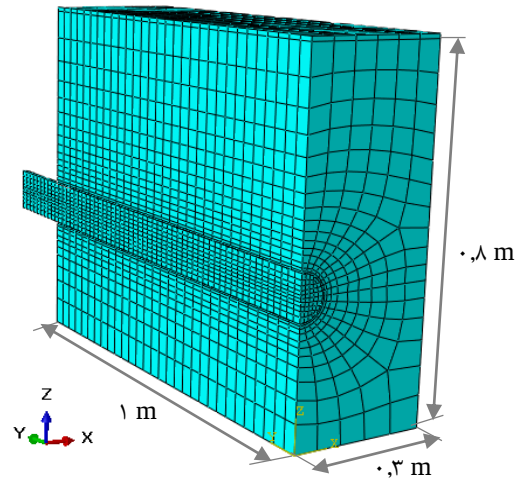
۱. Yin et al.

۲. Zhou et al.

۳. Hong et al.

$$E_{eq} = \frac{E_s A_s + E_g A_g}{A} \quad (1)$$

که در این رابطه E_s, E_{eq} و E_g به ترتیب مدول الاستیسیته معادل، مدول الاستیسیته میلگرد فولادی و مدول الاستیسیته دوجاب تزریق شده و A_s, A_g و A نیز به ترتیب مساحت سطح مقطع میلگرد فولادی، دوجاب تزریق شده و کل می باشند. جدول (۱) پارامترهای استفاده شده در مدل عددی را به صورت خلاصه ارائه می دهد.

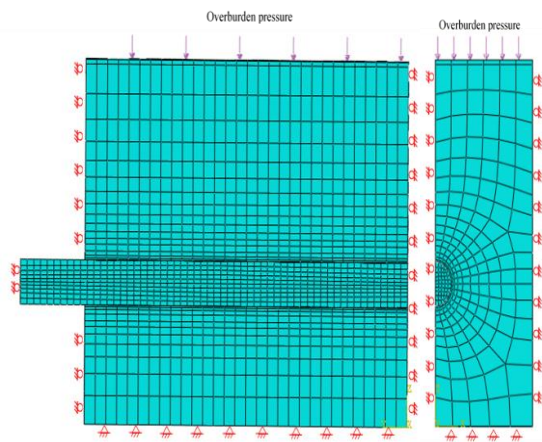


شکل (۱): هندسه مدل سه بعدی اجزای محدود ایجاد شده برای آزمایش بیرون کشیدگی میخ

از طرف دیگر در صفحات جلو و عقب مدل، تغییر مکان در راستای y بسته شد تا مرزهای جلو و عقب جعبه آزمایش را شبیه سازی نماید. تغییر مکان های سطح گمانه نیز در ابتدا مقید در نظر گرفته شد که در ادامه به منظور شبیه سازی فرایند حفاری، آزاد سازی این تغییر مکان های محدود شده صورت خواهد گرفت. در مرحله شبیه سازی فرایند بیرون کشیدگی، تغییر مکان در دو انتهای المان میخ در راستای y آزاد سازی شد. پس از آن، به منظور مدل سازی بیرون کشیدگی، یک تغییر مکان مشخص غیر صفر به صورت شرایط مرزی به سر میخ اعمال گردید.

مدل های رفتاری و مقادیر پارامترهای مصالح

مصالح خاک و ناحیه برشی هر دو به صورت یک محیط پیوسته الاستیک - پلاستیک کامل^۱ با معیار گسیختگی موهر-کولمب مدل سازی گردید. میخ از یک میلگرد فولادی و دوجاب سیمان تشکیل می گردد که در مدل سازی های عددی معمولاً به صورت یک میله همگن الاستیک ایدئال سازی می شود. چراکه احتمال تسلیم آن تقریباً ناچیز بوده و میلگرد فولادی و دوجاب کرنش های تقریباً یکسانی را متحمل خواهند شد. مدول الاستیسیته معادل میله ایدئال سازی شده از رابطه (۱) به دست می آید:



شکل (۲): بارگذاری و شرایط مرزی مدل: (الف) نمای جانبی و (ب) نمای روبرو

شبیه سازی رفتار سطح تماس میخ - خاک مسئله ای پیچیده بوده و نحوه شبیه سازی آن در مدلسازی عددی اثر قابل توجهی روی نتایج حاصله دارد؛ خصوصیات این سطح تماس تحت اثر عوامل مختلفی از جمله روش نصب میخ ها، خصوصیات سطح میخ ها و نیز مشخصات خاک قرار دارد. علاوه بر این، زاویه اتساع خاک اثر قابل توجهی بر رفتار این سطح تماس دارد. محققین از روش های مختلفی جهت شبیه سازی میخ و همچنین سطح تماس آن با خاک استفاده کرده اند. در ادامه به مرور تعدادی از این روش ها پرداخته می شود.

برخی محققین از مدلسازی اجزای محدود دوبعدی در نرم افزار آباکوس برای تحلیل سازه های میخکوبی شده بهره گرفته اند (شن و همکاران^۲، ۱۹۸۱). اگرچه این مطالعات دید ارزشمندی از رفتار سازه های میخکوبی شده را فراهم می کنند.

۱. Elastic-perfectly plastic

۲. Shen et al.

مصلح	چگالی	مدول الاستیسیته	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک	چسبندگی	زاویه اتساع
خاک	1668 kg/m^3	$27,5 \text{ MPa}$	$0,35$	34°	27 kPa	$8,2^\circ$
ناحیه برشی	1668 kg/m^3	$27,5 \text{ MPa}$	$0,35$	29°	5 kPa	10°
میخ	2000 kg/m^3	32 GPa	$0,28$	-	-	-
صفحه چوبی	-	$1,6 \text{ GPa}$	$0,25$	-	-	-

جدول (۱): مشخصات مصالح استفاده شده

معیار تسلیم موهر کولمب تبعیت می نماید، در حالی که تمامی اجزای دیگر الاستیک در نظر گرفته شدند. با استفاده از این مدل، برخی جنبه های تماس میخ - خاک و همچنین سازوکار گسیختگی داخلی و کلی سازه میخکوبی شده تحلیل شدند. خروجی های مطالعه آن ها به درک عمیق تری از رفتار سازه های میخکوبی شده منجر گردید.

ژانگ و همکاران^۶ در سال ۱۹۹۹ در مدلسازی اجزای سه بعدی خود جهت بررسی تغییر مکان های گودبرداری میخکوبی شده، جهت ساده سازی تحلیل فرض کردند که میخ و خاک به وسیله المان های دو فنی به یکدیگر متصل شده اند. این المان از دو گره در راستای عرض سطح تماس و در طرفین آن تشکیل شده و بین آن ها دو فنی فرضی متعامد وجود دارند که تنش نرمال و برشی را میان گره ها منتقل می کنند. سطح تماس میخ - خاک بسته به بزرگی تنش های برشی موجود در مقایسه با مقاومت برشی ممکن است در حالت بدون لغزش یا دارای لغزش باشد. در صورتی که المانی وارد مود لغزش شود، سختی برشی فنی بسیار ناچیزی به آن اختصاص می یابد. نتایج مطالعات نشان داده که مقاومت نهایی بیرون کشیدگی مستقل از میزان سربار وارده و عمق خاک است. با استفاده از شبیه سازی سطح تماس میخ - خاک دو فنی می توان این موضوع را در نظر گرفت. کیم^۷ در سال ۱۹۹۸ فصل مشترک بین خاک و خاک میخ را با استفاده از المان های بدون ضخامت^۸ شبیه سازی نمود. یانگ و درامن^۹ در سال ۲۰۰۰ از مدل اندرکنش اصطکاک سطحی

بالین حال کاستی هایی نیز به همراه دارند که از جمله مهم ترین آن عدم شبیه سازی مناسب تماس میان میخ و خاک است. چراکه در این حالت نمی توان از جفت های تماسی و اندرکنش های بین سطوح استفاده نمود و تنها گزینه ممکن استفاده از قید المان مدفون^۱ است. با استفاده از این روش، المان های میخ به عنوان قسمت مدفون و محیط خاک به عنوان ناحیه میزبان^۲ معرفی می گردند و فرض می گردد که هیچ گونه لغزشی در سطح خاک و میخ صورت نمی گیرد (لغزش صفر) که در عمل فرض درستی نیست. فرض عدم وجود رفتار لغزش در سطح مشترک، منجر به تخمین بالادست مقاومت برشی سطح مشترک می گردد؛ بنابراین، جهت انجام تحلیل های دقیق روی رفتار سیستم های میخکوبی، نیاز به بهره گیری از مدلسازی سه بعدی است.

هو و اسمیت^۳ در سال ۱۹۹۳، اسمیت^۴ در سال ۱۹۹۲ و اسمیت و سو^۵ در سال ۱۹۹۳ نخستین مطالعاتی بودند که در آن ها از مدلسازی سه بعدی اجزای محدود جهت تحلیل سازه های میخکوبی شده بهره گرفته شد. در این مطالعات از المان های هشت یا چهارده گرهی جهت شبیه سازی اجزای تشکیل دهنده یک سازه میخکوبی شده استفاده گردید. علاوه بر این، سطح تماس میخ - خاک به وسیله لایه نازکی از المان های از همان نوع مدل شد. همچنین فرض شد که خاک از یک رابطه تنش کرنش الاستیک - پلاستیک کاملاً

۷. Kim

۸. Zero-thickness elements

۹. Yang and Drumn

۱. Embedded element

۲. Host region

۳. Ho & Smith

۴. Smith

۵. Smith & Su

۶. Zhang et al.

به منظور شبیه سازی فصل مشترک خاک نیل استفاده نمودند لذا امکان تغییر مکان نسبی زیاد بین خاک و میخ میسر خواهد بود.

بنابراین می توان گفت به طور کلی سه روش برای مدل سازی سطح تماس بین دو المان در نرم افزار آباکوس وجود دارد. روش اول استفاده از المان فصل مشترک^۱ با ضخامت صفر و روش دوم اتصال سطح به سطح برای مدل کردن رفتار تماسی در المان که هر دو خصوصیت رفتار مماسی و قائم بر سطح را می توان برای این نوع اتصال در نظر گرفت. رفتار مماسی اتصال بین دو سطح المان ها را می توان به صورت سطح بدون اصطکاک یا زیر تعریف کرد اما رفتار چسبنده سطوح را نمی توان هم زمان در این نوع اتصال تعریف نمود. روش سوم استفاده از یک لایه نازک برای مدل کردن سطح تماس است. رفتار مماسی و قائم سطوح تماس را می توان با تعریف مصالح برای این لایه نازک تعریف کرد.

با توجه به روش های ذکر شده و در نظر گرفتن این موضوع که در آزمایش بیرون کشیدگی میخ، تغییر مکان نسبی زیادی بین میخ و خاک اتفاق می افتد تصمیم به استفاده از اندرکنش سطح به سطح گرفته شد. ضمن اینکه این روش پاسخ های قابل قبولی در پژوهش های پیشین (یانگ و درمان، ۲۰۰۰) از خود ارائه داده است. همان طور که در پاراگراف های پیشین اشاره شد، روش تماس سطح به سطح قادر به شبیه سازی مستقیم چسبندگی بین میخ و خاک نبوده و رفتار سطح تماس را با استفاده از تعیین دو رفتار مماسی و عمودی مدلسازی می کند. با این وجود، در تعریف مشخصات سطح تماس گزینه ای^۲ وجود دارد که می توان با استفاده از آن ترتیبی اتخاذ نمود که اجازه جداشدگی دو سطح داده نشود؛ بنابراین می توان گفت با اعمال این گزینه، چسبندگی میان میخ و خاک به صورت غیرمستقیم در نظر گرفته خواهد شد. علاوه بر این در عمل، با افزایش لغزش نسبی میان میخ و خاک مجاور، ضریب اصطکاک سطح تماس کاهش خواهد یافت و لازم است به منظور نزدیک نمودن هرچه بیشتر شرایط مدل سازی عددی به شرایط واقعی تدبیری در این خصوص اندیشیده شود. به منظور در نظر گرفتن این موضوع در طی فرایند بیرون کشیدگی، از کاهش مبتنی بر دما برای

تغییر دادن ضریب اصطکاک سطح تماس با افزایش لغزش میان میخ و خاک استفاده شده است. در خصوص تغییرات ضریب اصطکاک نیز باید اشاره کرد که مقدار آن از مقدار اولیه $\tan\phi_{\text{shearing zone}} = 0.554$ تا مقدار نهایی ۰.۳۴ به صورت خطی و با توجه به مقدار کرنش پلاستیک رخ داده در سطح تماس کاهش می یابد.

کالیبراسیون ضرایب اصطکاک در روش پنالتی بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط سو و همکاران در سال ۲۰۱۰ برای مقاومت بیرون کشیدگی میخ تحت سربارهای مختلف بوده است. به عبارت دیگر از آنجاکه نحوه تغییرات این ضریب در مراجع فنی ذکر نشده است، چند الگوی تغییرات به صورت تجربی اعمال شده و در نهایت الگوی تغییرات نتایج منطبق تری با نتایج آزمایشگاهی مذکور برای مقاومت بیرون کشیدگی میخ تحت اثر فشارهای سربار ۴۰، ۸۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ پاسکال ارائه داد.

ترتیب مدل سازی

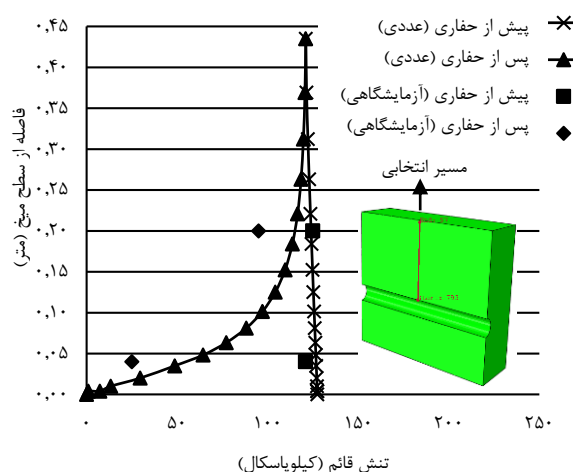
در این مقاله، از چهار گام مختلف برای شبیه سازی آزمایش های بیرون کشیدگی میخ استفاده شده است که به ترتیب ذیل می باشند:

- گام اول: تنش های بر جای اولیه خاک به دلیل نیروی وزن ایجاد می گردند. در این گام، المان میخ از مدل حذف می گردد تا به دلیل اندرکنش های تماسی موجود، مشکلی در همگرایی مدل ایجاد نشود.
- گام دوم: تغییر مکان های گمانه که در گام قبلی مقید شده بودند، آزاد می گردند تا قرائند حفاری گمانه را مدل کنند.
- گام سوم: المان میخ که در گام اولیه حذف شده بود، در این گام در جای خود قرار گرفته و اندرکنش تماسی میان آن و خاک مجاور فعال می شود.
- گام چهارم: به منظور شبیه سازی فرایند بیرون کشیدگی، یک جابجایی ۵۰ میلی متری به سر میخ اعمال می گردد. مدت زمان تعیین شده برای اعمال این جابجایی برابر ۳۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد که به معنی سرعت بیرون کشیدگی معادل ۱ میلی متر در دقیقه خواهد بود.

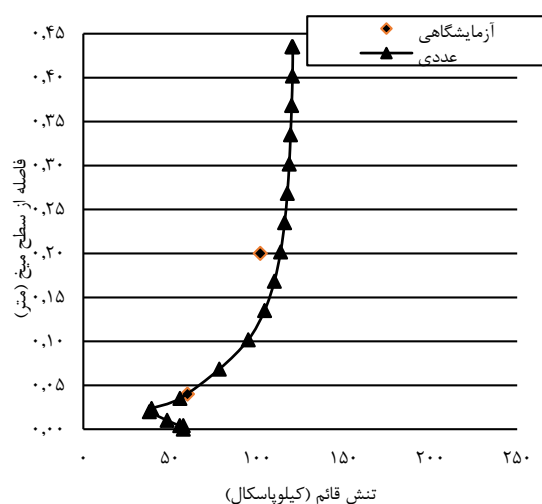
صحت‌سنجی مدل اجزای محدود با استفاده از نتایج

آزمایشگاهی

دقت نتایج مدل عددی اجزای محدود توصیف‌شده در قسمت قبل با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط سو و همکاران در سال ۲۰۱۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مدل-سازی عددی و آزمایشگاهی برای حالت بیرون کشیدگی میخ تحت فشار سربار ۱۲۰ کیلو پاسکال با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به‌منظور ارزیابی تنش‌های قائم در مراحل مختلف، یک مسیر مشخص در بالای سطح میخ انتخاب گردیده و مقادیر تنش قائم (S33) در این راستا با داده‌های آزمایش مقایسه شد. مسیر انتخاب‌شده و همچنین توزیع تنش قائم در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق این شکل، پیش از حفاری تنش قائم در سطح فوقانی مدل (زیر صفحه چوبی) برابر با فشار سربار اعمالی یعنی ۱۲۰ کیلو پاسکال بوده و مقدار آن با افزایش عمق و کاهش فاصله از سطح میخ به دلیل وزن خاک به‌صورت خطی افزایش یافته است. پس از حفاری، به دلیل آزاد شدن تنش‌ها در سطح میخ، تنش قائم از ۱۲۰ کیلو پاسکال در بالا تا صفر در سطح میخ کاهش خواهد یافت. همچنین، مقادیر تنش قائم در مقاومت بیرون-کشیدگی حداکثر در شکل (۴) ترسیم شده است. مطابق این شکل، با مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در آزمایش‌ها مشخص می‌شود که این دو از مطابقت مناسب و قابل‌قبولی برخوردار هستند.



شکل (۳): توزیع تنش قائم در مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی تحت فشار سربار ۱۲۰ کیلو پاسکال



شکل (۴): توزیع تنش قائم در مقاومت بیرون کشیدگی حداکثر تحت فشار سربار ۱۲۰ کیلو پاسکال

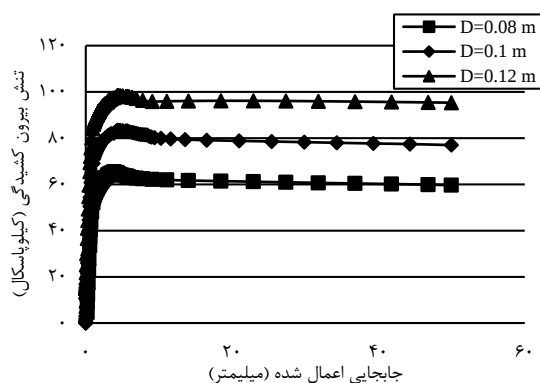
تأثیر عوامل مختلف بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ

در این بخش، مدل اجزای محدود صحت‌سنجی شده برای ارزیابی تأثیر عوامل مختلف روی میزان مقاومت بیرون-کشیدگی میخ استفاده می‌گردد. سو و همکاران در سال ۲۰۱۰ تأثیر فشار سربار و زاویه اتساع ناحیه برشی را مورد مطالعه قرار دادند. ژو و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک مطالعه پارامتریک برای ارزیابی اثر فشار تزریق دوغاب انجام دادند. در این مقاله، اثر قطر میخ، مدول الاستیسیته خاک و سرعت بیرون کشیدگی میخ مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. طی مطالعات پارامتریک، تمامی پارامترها ثابت نگاه داشته شده و تنها پارامتر موردنظر تغییر می‌یابد.

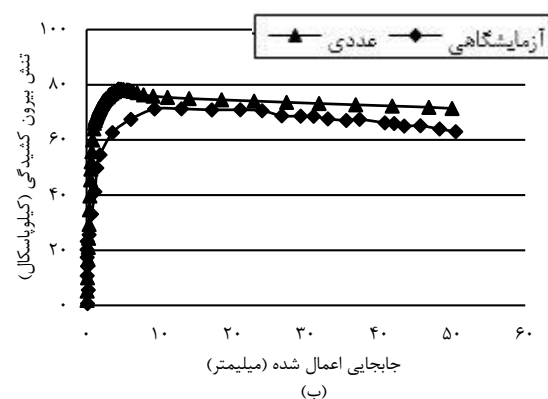
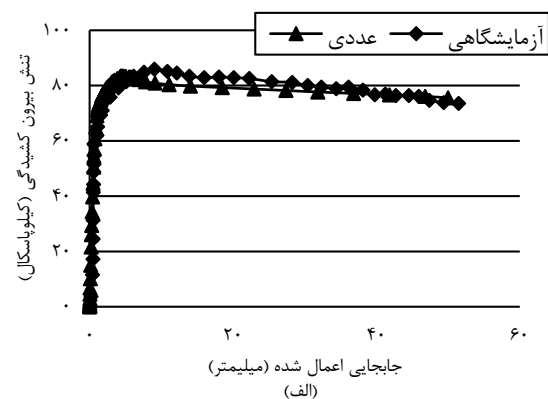
شکل (۵) مقادیر تنش برشی بیرون کشیدگی در برابر جابجایی اعمال‌شده برای مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تحت فشارهای سربار ۴۰ و ۸۰ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد. تنش بیرون کشیدگی از طریق تقسیم مجموع نیروی عکس‌العمل کل گره‌های سر میخ بر مساحت جانبی در تماس با خاک محاسبه می‌گردد. از شکل (۵) می‌توان مشاهده نمود که نتایج عددی و آزمایشگاهی به‌خوبی با یکدیگر مطابقت داشته و مدل اجزای محدود توسعه‌یافته آزمایش بیرون کشیدگی میخ را به نحو مناسبی شبیه‌سازی نماید. اگرچه، مقاومت بیرون کشیدگی حداکثر در مدل‌های عددی در جابجایی‌های اندکی کوچک‌تر از مقادیر آزمایشگاهی رخ می‌دهد.

بررسی اثر قطر میخ

شبیه‌سازی‌ها برای میخ با سه قطر مختلف ۰٫۰۸، ۰٫۱ و ۰٫۱۲ متر تحت فشار سربار ۱۲۰ کیلو پاسکال انجام شد. شکل (۶) منحنی‌های تنش بیرون کشیدگی- جابجایی اعمال شده برای این سه حالت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که میخ‌های با قطر بزرگ‌تر، مقاومت بیرون کشیدگی بیشتری نسبت به میخ‌های با قطر کوچک‌تر از خود نشان می‌دهند. تنش‌های بیرون کشیدگی حداکثر به صورت خطی با قطر متناسب هستند. دلیل این افزایش را می‌توان در این مطلب بیان کرد که در حالت قطر میخ بزرگ‌تر، سطح تماس میان میخ و خاک مجاور بیشتر بوده و در نتیجه تنش برشی بیشتری در این سطح تماسی بسیج می‌گردد. نکته قابل توجه دیگری که از شکل (۶) مشاهده می‌شود این است که هر سه منحنی در جابجایی‌های تقریباً برابری به مقدار مقاومت بیرون کشیدگی حداکثر خود می‌رسند.



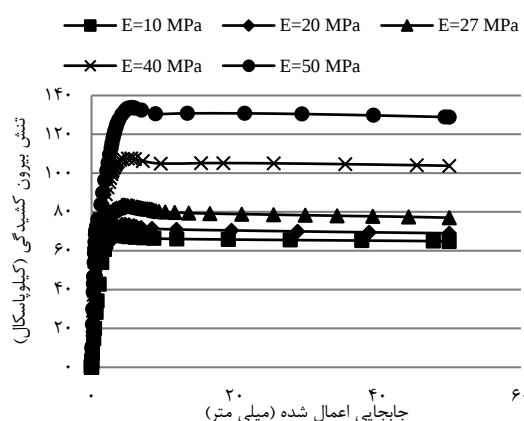
شکل (۶): تأثیر قطر میخ بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ در فشار سربار ۱۲۰ کیلو پاسکال



شکل (۵): نتایج عددی و آزمایشگاهی تنش بیرون کشیدگی در برابر جابجایی اعمالی تحت فشار سربار ۴۰ کیلو پاسکال و ۸۰ کیلو پاسکال (ب) و ۴۰ کیلو پاسکال و ۸۰ کیلو پاسکال (الف)

بررسی اثر مدول الاستیسیته خاک

پنج مدول الاستیسیته مختلف ۱۰، ۲۰، ۲۷، ۴۰ و ۵۰ مگا پاسکال تحت فشار سربار ۱۲۰ کیلو پاسکال مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات تنش بیرون کشیدگی در برابر جابجایی اعمال شده در شکل (۷) نشان داده شده است. از نتایج به دست آمده به وضوح می‌توان دریافت که با افزایش مدول الاستیسیته خاک، مقاومت بیرون کشیدگی حداکثر نیز افزایش خواهد یافت. مقدار این افزایش در مدول‌های پایین چندان چشمگیر نیست اما برای مدول‌های الاستیسیته بیشتر از ۲۷ مگا پاسکال، میزان آن قابل توجه خواهد بود. علاوه بر این، در مدل‌های با مدول الاستیسیته بیشتر، جابجایی که میخ در آن به حداکثر مقاومت بیرون کشیدگی خود می‌رسد، بیشتر است.



شکل (۷): تأثیر مدول الاستیسیته خاک بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ در فشار سربار ۱۲۰ کیلو پاسکال

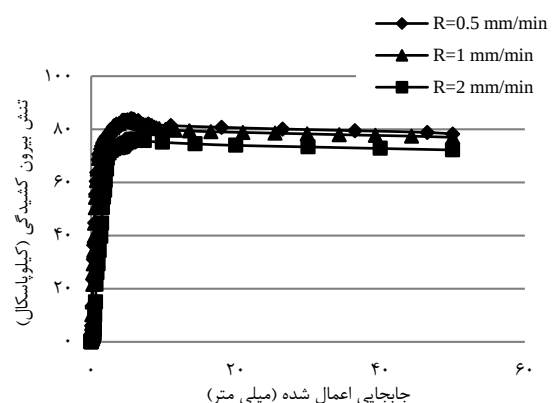
بررسی اثر سرعت بیرون کشیدگی میخ

به منظور بررسی اثر سرعت بیرون کشیدگی میخ، سه مقدار مختلف ۰,۵، ۱ و ۲ میلی متر در دقیقه تحت سربار ۱۲۰ کیلو پاسکال استفاده شد. برای ایجاد هریک از این سرعت‌ها، جابجایی ثابت ۵۰ میلی متری به ترتیب در مدت زمان ۱۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۶۰۰۰ ثانیه اعمال گردید. نتایج به دست آمده برای سه سرعت مختلف در شکل (۸) نمایش داده شده است. همان طور که از این شکل مشاهده می گردد، برای سرعت های بیرون کشیدگی ۰,۵ و ۱ میلی متر در دقیقه تفاوت قابل توجهی وجود نداشته و منحنی های آن ها تقریباً یکسان هستند. اگرچه، زمانی که سرعت بیرون کشیدگی به ۲ میلی متر در دقیقه افزایش یافته است، مقادیر تنش بیرون کشیدگی کمتری حاصل شده است. دلیل این کاهش، عدم وجود مدت زمان کافی جهت بسیج تنش های برشی در سطح تماس میان خاک و میخ در سرعت های بیرون کشیدگی بالا بوده که در نتیجه آن مقادیر ظرفیت بیرون کشیدگی میخ نسبت به حالات با سرعت بیرون کشیدگی کمتر، کاهش خواهد یافت.

نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدل اجزای محدود سه بعدی توسط نرم افزار آباکوس برای شبیه سازی آزمایش های بیرون کشیدگی میخ توسعه یافت. به منظور کاهش ضریب اصطکاک سطح تماس میان خاک و میخ با افزایش لغزش

نسبی میان این دو



شکل (۸): تأثیر سرعت بیرون کشیدگی میخ بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ در فشار سربار ۱۲۰ کیلو پاسکال

از یک روش نوین کاهش مبتنی بر دما استفاده گردید. مقایسه های صورت گرفته حاکی از تطابق قابل قبول نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بود. در مرحله بعد مدل صحت سنجی شده برای انجام مجموعه ای از مطالعات پارامتریک شامل بررسی اثر قطر میخ، مدول الاستیسیته خاک و سرعت بیرون کشیدگی میخ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده از مطالعات پارامتریک صورت گرفت را می توان در موارد ذیل خلاصه نمود:

۱- میخ های با قطر بزرگ تر نسبت به میخ های با قطر کوچک تر، مقاومت بیرون کشیدگی بیشتری نشان می دهند. دلیل این امر، سطح تماس بیشتر میخ و خاک مجاور در حالت میخ با قطر بزرگ تر است. جابجایی که میخ های با قطر مختلف در آن به مقاومت بیرون کشیدگی حداکثر خود می رسند در تمامی حالات تقریباً یکسان است.

۲- با افزایش مدول الاستیک خاک، ظرفیت بیرون کشیدگی حداکثر نیز افزایش می یابد. مقدار این افزایش در مدول های پایین ناچیز بوده و برای مقادیر بیش از ۲۷ مگا پاسکال قابل توجه است. علاوه بر این مطلب، در حالت مدول های الاستیک خاک بالاتر، جابجایی که میخ در آن به مقاومت بیرون کشیدگی حداکثر خود می رسد، مقدار بیشتری است.

۳- در سرعت های بیرون کشیدگی بالا، مقاومت بیرون کشیدگی میخ کاهش خواهد یافت. دلیل احتمالی این مطلب عدم در اختیار داشتن زمان کافی جهت بسیج کامل نیروهای برشی در سطح تماس میخ و خاک است.

علائم انگلیسی

نماد	تعریف (واحد)
E_{eq}	مدول الاستیسیته معادل میلگرد فولادی و دوغاب (GPa)
E_s	مدول الاستیسیته میلگرد فولادی (GPa)
E_g	مدول الاستیسیته دوغاب تزریق شده (GPa)
A_s	مساحت سطح مقطع میلگرد فولادی (m^2)
A_g	مساحت سطح مقطع دوغاب تزریق شده (m^2)
A	مساحت سطح مقطع کل (m^2)
E	مدول الاستیسیته خاک (MPa)
D	قطر میخ (m^2)
R	سرعت بیرون کشیدگی میخ (mm/min)

مراجع

۱. مرادی، غ؛ و زادکریم، س. (۱۳۹۴)، مطالعات مقیاس واقعی تأثیر فشار تزریق بر مقاومت بیرون کشیدگی و رفتار خزشی میخ‌های گروتی در خاک مارن زیتونی، نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، جلد ۴۵ (شماره ۴)، ص ۱۹۷-۱۰۶.
2. Cartier, G. (1983). Experiments and observations on soil nailing structures. In Proc. of 8th European Conf. on SMFE.
3. Chu, L. M. & Yin, J. H. (2005). A laboratory device to test the pull-out behavior of soil nails. Geotechnical testing journal, 28(5), 499-513.
4. Franzen, G. (1998). Soil nailing-A laboratory and field study of pull-out capacity.
5. Guilloix, A. Notte, G. & Gonin, H. (1983, January). Experiences on retaining a structure by nailing in marine soils. Proceeding Of European Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering.
6. Ho, D. K. H. & Smith, I. M. (1993). Modelling of soil nailing construction by 3-dimensional finite element analysis. In Retaining Structures. Proceedings of the Conference Organized By the Institution of Civil Engineers and Held on 20-23 July, 1992 at Robinson College, Cambridge.
7. Hong, C. Y. Yin, J. H. Pei, H. F. & Zhou, W. H. (2013). Experimental study on the pullout resistance of pressure-grouted soil nails in the field. Canadian geotechnical journal, 50(7), 693-704.
8. Kim, W. C. (1998). The effect of nail stiffness and inclination in soil nailing by finite element method (Doctoral dissertation, Utah State University. Department of Civil and Environmental Engineering).
9. Lazarte, C. A. Robinson, H. Gómez, J. E. Baxter, A. Cadden, A. & Berg, R. (2015). Soil Nail Walls Reference Manual (No. FHWA-NHI-14-007).
10. Schlosser, F. & Unterreiner, P. (1991). Soil nailing in France: research and practice. Transportation Research Record, 1330, 72-79.
11. Smith, I. M. (1992). Three-dimensional analysis of reinforced and nailed soil. Numerical models in geomechanics. Balkema, 829-38.
12. Smith, I. M. & Su, N. (1997). Three- dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plan. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 21(9), 583-597.
13. Su, L. J. Yin, J. H. & Zhou, W. H. (2010). Influences of overburden pressure and soil dilation on soil nail pull-out resistance. Computers and Geotechnics, 37(4), 555-564.
14. Yang, M. Z. & Drumm, E. C. (2000). Numerical analysis of the load transfer and deformation in a soil nailed slope. Geotechnical special publication, 102-116.
15. Yin, J. H. Hong, C. Y. & Zhou, W. H. (2011). Simplified analytical method for calculating the maximum shear stress of nail-soil interface. International Journal of Geomechanics, 12(3), 309-317.
16. Zhang, M. Song, E. & Chen, Z. (1999). Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM). Computers and Geotechnics, 25(4), 191-204.
17. Zhou, W. H. Yin, J. H. & Hong, C. Y. (2011). Finite element modelling of pullout testing on a soil nail in a pullout box under different overburden and grouting pressures. Canadian Geotechnical Journal, 48(4), 557-567.