

مدلسازی اجزاء محدود آزمایش بیرون کشش میخ ماریچ

سینا معاف^۱، محمد علیایی^{۲*}

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استادیار مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

*M.Olyaei@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۹/۰۶/۲۷

تاریخ دریافت ۹۹/۰۲/۱۳

چکیده

در چند دهه اخیر استفاده از یک روش کارآمد و اقتصادی در تامین پایداری خاک، به عنوان یک چالش مهم برای مهندسين و پژوهشگران مطرح بوده است. میخ کوبی (مسلح سازی خاک در محل) با توجه به سرعت اجرا، تکنیک مناسبی در تامین پایداری است. بیشتر میخ کوبی با میخ های ساده و دارای تزریق شناخته می شود، اما میخ دارای صفحات ماریچ یا "میخ ماریچ" نیز با توجه به سرعت زیاد اجرا و عدم نیاز به تزریق مورد توجه است. با توجه به بررسی های محدود صورت گرفته در زمینه میخ ماریچ، هدف این مطالعه بررسی مقاومت بیرون کشیدگی میخ ماریچ (به عنوان مهم ترین عامل در طراحی سیستم میخ کوبی) با یک مدلسازی اجزاء محدود سه بعدی توسط نرم افزار آباکوس است. بررسی اثر سربار، فاصله و تعداد صفحات، اهداف این مطالعه هستند. نتایج، اثر سربار بر مقاومت بیرون کشش را تایید می کنند. همچنین سطوح گسیختگی در فواصل دورتری نسبت به سطح میخ اتفاق می افتد و فاصله سه برابر قطر را می توان فاصله بهینه صفحات در نظر گرفت. استفاده از میخ با فاصله صفحات کم تر موجب افزایش مقاومت نشده است. همچنین استفاده از صفحات بیش تر با فاصله کم تر افزایش مقاومت را نشان نمی دهد. مقایسه نتایج مدلسازی و تست های آزمایشگاهی نشان دهنده درستی مدلسازی آزمایش بیرون کشش است و این مدلسازی می تواند گواهی بر عملکرد میخ ماریچ در شیب های خاکی باشد.

واژگان کلیدی: مدلسازی اجزاء محدود، میخ کوبی، میخ ماریچ، آزمایش بیرون کشش

۱- مقدمه

غیرفعال نزدیک به یکدیگر است، که یک توده خاک بهم چسبیده را تشکیل می دهد و در نهایت مقاومت برشی خاک را افزایش می دهد [1]. رفتار برشی در فصل مشترک خاک با مصالح دیگر یکی از پارامترهای مهم در طراحی پروژه های ژئوتکنیکی است و در سیستم میخ کوبی این رفتار به کمک آزمایش بیرون کشش سنجیده می شود. مقاومت بیرون کشیدگی میخ یکی از موارد مهم در طراحی و کنترل این سیستم است و توسط مهندسين و

سیستم میخ کوبی به عنوان یکی از روش های پایدارسازی دیواره گودها و شیب های خاکی در نقاط مختلف کشور استفاده های فراوان دارد و روشی اقتصادی و کارآمد برای تثبیت وضعیت خاک است. میخ کوبی با توجه به زمان کم اجرا و عدم تسخیر فضای داخلی گود مورد توجه کارفرمایان است. ایده اصلی استفاده از این سیستم، مسلح سازی خاک با استفاده از قطعات

سیستم میخ کوبی یک سیستم غیرفعال است و پیش کشیده نیست [9]. مقاومت بیرون کشیدگی مهم ترین عامل در طراحی سیستم میخ کوبی است که پارامترهای زیادی بر آن تأثیر گذارند. پژوهش های زیادی انجام شده است که پارامترهای موثر بر این مقاومت را بررسی کرده اند [2, 3, 4, 5, 6, 7]. همچنین در سال های اخیر با توجه به اهمیت و کاربرد سیستم میخ کوبی، مطالعه و پیش بینی رفتار شیب های مسلح شده با این سیستم مورد توجه پژوهشگران زیادی بوده است [26, 27]. با توجه به روش های مطالعه مقاومت بیرون کشیدگی میخ، در این مقاله سعی شده است مطالعات پیشین به طور خلاصه و به صورت دسته بندی شده ارائه شود:

1-1-1 مطالعات میدانی

آزمایش های میدانی زیادی روی شیب های خاکی مسلح شده با این سیستم به منظور کنترل طراحی انجام شده است. برای نمونه یانگ و همکاران [11] تعدادی آزمایش میدانی روی خاک CDG هنگ کنگ که با لوله های پلیمری مسلح سازی شده بود، انجام داده و متوجه افزایش قابل توجهی در مقاومت بیرون کشیدگی به دلیل فشار تزریق شدند. بررسی رفتار تعدادی از شیب های خاکی که در اثر بارش و کاهش مقاومت برشی در خاک دچار ریزش شدند، [12] نشان داد، در چنین شیب ها و یا کارگاه هایی با شرایط مختلف زمین، میخ کوبی می تواند ناکارآمد یا دارای اتلاف انرژی زیاد باشد و نیز محدودیت هایی با توجه به عدم دسترسی به محل و یا خطوط انرژی موجود در زمین داشته باشد [9].

پژوهشگران مختلفی ارزیابی شده است [2, 3, 4, 5, 6, 7]. هنوز نقاط مبهم فراوانی در آن، به ویژه برای میخ مارپیچ وجود دارد. مقاومت بیرون کشیدگی تابع عوامل متعددی از جمله روش نصب، سربار، فشار تزریق، زبری سطح میخ، مشخصات خاک و مشخصات هندسی و مقاومتی میخ است. میخ ساده بعد از حفاری چال و قرار دادن میله فلزی با قطر 25-40 mm و شیب 20°-10°، تحت فشار گرانج یا فشار- تزریق، نصب می شود [8]. اما میخ های مارپیچ دارای تزریق نبوده و بعد از ساخت به کمک لنگر و فشار رو به جلو نصب می شوند. میخ مارپیچ نسبت به میخ ساده سرعت اجرای بیش تری داشته و نیاز به تجهیزات حفاری و تزریق ندارد. همچنین سبب دست خوردگی و تخریب کمتری در خاک می شود [8]. در مطالعه پیش رو هدف، بررسی مقاومت بیرون کشیدگی میخ مارپیچ و مقایسه نتایج آن با اطلاعات آزمایشگاهی به دست آمده توسط تاخی و همکاران [9] است. همان گونه که در شکل (1) مشاهده می شود عوامل موثر بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ مارپیچ، قطر صفحات مارپیچ، گام مارپیچ، تعداد صفحات، فاصله صفحات و ضخامت صفحات هستند [8].

1-1-1 پیشینه تحقیق

به نظر می رسد ایده اصلی میخ کوبی، به عنوان یک روش ساخت در مهندسی عمران، برآمده از سیستم راکبوتینگ استفاده شده در روش جدید اتریشی برای تونل سازی باشد [9, 10]. از پیدایش این سیستم در سال 1960 تاکنون کاربرد آن برای تثبیت شیب ها و حفاری ها، مانند سیستم انکراژ، افزایش چشم گیری پیدا کرده است [9]. البته تفاوت هایی بین این دو سیستم وجود دارد؛

شکل 1. مشخصات میخ مارپیچ

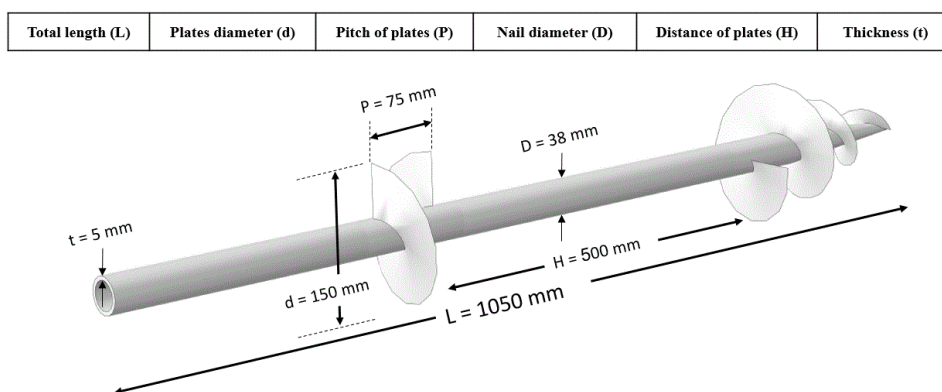


Fig. 1. Helical soil-nail properties

۱-۱-۲- مطالعات آزمایشگاهی

سیستم میخ کوبی مانند سایر پروژه‌های ژئوتکنیکی متأثر از عوامل مختلفی است و دارای اشکالات جدی نیز هست که هنوز به درستی شناخته نشده است.

پژوهشگران در این حوزه مدلسازی‌های فیزیکی و تست‌های آزمایشگاهی انجام داده اند، که به طور خاص می‌توان به بررسی مقاومت بیرون کشش یک میخ دارای تزریق در خاک هنگ‌کنگ اشاره کرد. در این راستا سو^۹ و همکاران [13, 14] دریافتند که حفاری چال برای اجرای میخ موجب کاهش قابل توجه تنش در اطراف چال حفاری می‌شود و مقاومت بیرون کشش وابسته به سربار است. همچنین از انجام تست‌های آزمایشگاهی متوجه شدند که فرآیند ساخت موجب رها شدن یک تنش اصلی بر روی خاک شده و فشار سربار بر مقاومت بیرون کشش اثری ندارد.

هانگ^{۱۰} و همکاران [15] تعدادی تست میدانی و آزمایشگاهی برای بررسی اثر تزریق و سربار روی میخ ساده انجام داده‌اند و دریافتند که ظرفیت بیرون کشش، با افزایش فشار تزریق به صورت خطی افزایش می‌یابد، ولی افزایش سربار تأثیری بر آن ندارد. بین و ژو^{۱۱} [16] با انجام تست‌های آزمایشگاهی با مصالحی مشابه به این نتیجه رسیدند که فشار سربار و فشار تزریق هر دو بر ظرفیت بیرون کشش تأثیرگذارند.

کلیدی‌ترین پارامتر در شناخت سیستم میخ کوبی، شناخت فصل مشترک آن با خاک است. جونیدین و همکاران [12] مدعی شدند با توجه به استفاده زیاد از این سیستم در هنگ‌کنگ ضعف‌هایی در شناخت از این سیستم در فصل مشترک بین میخ و خاک در خاکریزهای سست وجود دارد. در نهایت آنها به وضوح از روی نتایج آزمایشگاهی و میدانی اعلام داشتند که هیچ‌گونه همگرایی بین پارامترهای موثر بر مقاومت بیرون کشش وجود ندارد. ایده اصلی در تمام این آزمایش‌ها ساخت یک جعبه پر از خاک و مهیا کردن شرایط برای اعمال سربار و فشار تزریق بوده است.

۱-۱-۳- مطالعات عددی

مدلسازی عددی به واسطه روش اجزاء محدود برای آنالیز رفتار سیستم میخ کوبی توسط پژوهشگران مختلف انجام شده و نتایج آن نیز ارائه شده است. برای نمونه سو و همکاران [23] با انجام یک سری مدلسازی‌های عددی دریافتند که مقاومت نهایی به صورت قابل توجهی با افزایش زاویه اتساع خاک افزایش پیدا می‌کند و مقاومت بیرون کشش نهایی به طور مستقیم مرتبط با سربار نیست. همچنین ژو^{۱۲} و همکاران [24] با انجام تعدادی مدلسازی عددی دریافتند که می‌توان به کمک مدلسازی، مراحل واقعی انجام آزمایش بیرون کشش را به طور مطمئن و قابل اعتمادی مدلسازی کرد. شینیو^{۱۳} و همکاران [25] با انجام مطالعه آزمایشگاهی و عددی بیرون کشش یک میخ تزریقی تراکمی اظهار داشتند که شکل هندسی تزریق و ضریب اصطکاک ناحیه تزریق با خاک بر ظرفیت بیرون کشش موثر است. همچنین اثر قطر تزریق از طول تزریق بیشتر است.

مطالعات یاد شده مربوط به میخ ساده و دارای تزریق است. در ادامه به منظور برتری یافتن بر بعضی از کمبودهای میخ ساده و ارائه یک سیستم سریع‌تر و کارآمد، ساخت و بررسی میخ مارپیچ مورد توجه قرار گرفت. شارما^{۱۴} و همکاران [8] به کمک ساخت یک دستگاه بیرون کشش و تعدادی میخ مارپیچ با تعداد و قطر صفحات متفاوت این سیستم را بررسی کردند. آنها متوجه اثرگذاری زیاد سربار، قطر صفحه و زبری سطح میخ بر ظرفیت شدند، در حالی که گام صفحات مارپیچ اثری بر ظرفیت نداشته است. همچنین تاخی و همکاران [9] اقدام به طراحی یک سری تست آزمایشگاهی کرده و به بررسی اثر سربار روی آن پرداختند. در این آزمایش‌ها، آنها از یک میخ مارپیچ که متشکل از یک میله فلزی و تعدادی صفحه مارپیچ است استفاده کردند (شکل ۲). سازوکار عملکرد در این آزمایش انتقال نیروی محوری از میله به صفحات و ایجاد تنش در خاک است.

مطالعات بیش‌تر نشان می‌دهد اولین استفاده از میخ مارپیچ توسط باییت^{۱۵} [17] بوده است. بعد از آن در سال ۲۰۰۵ این سیستم توسط دپارتمان حمل و نقل میسوری بررسی شد و نتایج توسط دردروف^{۱۶} و همکاران [18] گزارش شده است.

۲- تئوری و فرمولاسیون

میخ دارای تزریق شامل یک میله مدفون در ملات تزریقی است (شکل ۳). هنگام بیرون کشیدن، اصطکاک موجود در سطح تزریق با خاک، بسیج شده و ظرفیت میخ را تشکیل می‌دهد. می‌توان دریافت که پارامتر اصلی مقاومت، همین اصطکاک سطح میخ با خاک است که در طول میخ ظاهر می‌شود و به صورت نیروی کششی به میخ منتقل می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که طول و قطر ستون تزریقی حاصل، در پشت صفحه گسیختگی احتمالی، در حال مقاومت در برابر بیرون کشیدگی هستند.

شکل ۳. میخ ساده (دارای تزریق)

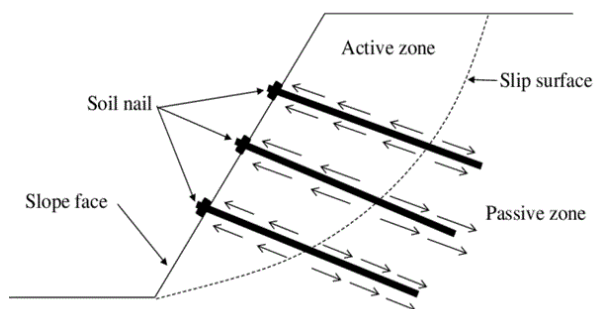


Fig. 3. Conventional soil-nail (with grouting)

این مقاومت بیرون کشیدگی (P) طبق FHWA(2003) [19] از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \pi DL \times q \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$P = \pi DL \times b \operatorname{tg} \varphi \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه ۱، D و L و q به ترتیب مقادیر قطر ستون تزریقی، طول میخ و تنش سطح میخ و خاک هستند. در رابطه ۲، b و φ به ترتیب تنش قائم و زاویه اصطکاک در سطح میخ و خاک هستند. مقدار φ موثر از فشار تزریق و نوع خاک خواهد بود.

میخ ماریپیچ به دلیل عملکرد مشابه، در محاسبه ظرفیت بیرون کشیدگی آن از آیین‌نامه مربوط به شمع‌های ماریپیچ استفاده می‌شود و معتبرترین آنها (ICC-ES AC 308) [20] است.

میخ ماریپیچ با توجه به دارا بودن صفحات ماریپیچ در طول خود شاهد افزایش ظرفیت باربری است [21]. روش‌های مورد استفاده در محاسبه ظرفیت باربری سه مورد هستند:

شکل ۲. میخ مورد استفاده تاخی و همکاران

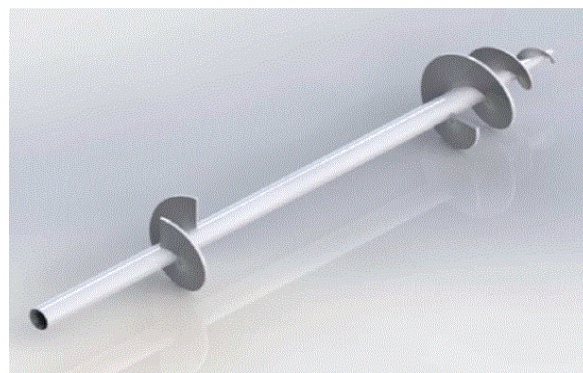


Fig. 2. Nail used by Tokhi et al.

۲-۱- هدف پژوهش

با توجه به پیشینه پژوهش یاد شده، مطالعاتی در زمینه شناخت عملکرد و عوامل موثر بر مقاومت بیرون کشش میخ ماریپیچ به صورت آزمایشگاهی انجام شده است. مطالعات محدود صورت گرفته به صورت تئوری و عددی و همچنین از آنجایی که مدلسازی عددی یکی از روش‌های تایید نتایج آزمایشگاهی است، در این پژوهش تصمیم گرفته شده است یک مدلسازی عددی صورت گرفته و نتایج آن با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شود. در این پژوهش سعی شده است تمامی شرایط آزمایشگاهی تاخی و همکاران [9] از جمله مشخصات میخ، جعبه خاک و سرعت بیرون کشش، مدلسازی شود. همچنین بررسی اثر سربار، فاصله و تعداد صفحات، اهداف این مطالعه هستند.

۳-۱- روش تحقیق

روش‌های تعیین مقاومت بیرون کشیدگی میخ ماریپیچ به ترتیب زیر هستند:

۱- مطالعه میدانی

۲- تست آزمایشگاهی

۳- مدلسازی عددی

در این پژوهش قصد بر این است با در نظر گرفتن توانمندی نرم افزارهای مختلف و هندسه خاص مدلسازی، از روش مدلسازی اجزاء محدود سه بعدی توسط نرم‌افزار آباکوس استفاده شود.

می‌شوند. d_{hi} ، γ_i و h_i به ترتیب قطر صفحه، وزن مخصوص خاک و عمق مدفون میخ هستند. با ترکیب رابطه میخ ساده و میخ مارپیچ برای ماسه خواهیم داشت:

$$P = (\pi DL \times \bar{b} \operatorname{tg} \varphi) + \sum_{i=1}^n A_{hi} \left(\frac{1}{2} d_{hi} \gamma_i N_{\gamma} + \gamma_i k_0 h_i N_q \right) \quad \text{رابطه (۶)}$$

با توجه به قطر کم میله و اصطکاک ناچیز آن با خاک می‌توان از بخش اول رابطه ۶ صرف‌نظر نمود:

$$P = \sum_{i=1}^n A_{hi} \left(\frac{1}{2} d_{hi} \gamma_i N_{\gamma} + \gamma_i k_0 h_i N_q \right) \quad \text{رابطه (۷)}$$

۲-۲- روش برش استوانه:

روش ظرفیت باربری برش استوانه بر این فرض استوار است که رفتار میخ مارپیچ مشابه میخ‌های تزریقی است. در واقع ظرفیت باربری از مجموع مقاومت اصطکاکی ستون خاکی محصور شده بین مارپیچ‌ها و ظرفیت یکی از صفحات بالا یا پایین به دست می‌آید. چگونگی توزیع تنش در این روش در شکل (۵) مشاهده می‌شود. روابط برش استوانه به ترتیب زیر است:

$$P = (\pi DL \times \bar{b} \operatorname{tg} \varphi) + A_{hi} \left(\frac{1}{2} d_{hi} \gamma_i N_{\gamma} + \gamma_i k_0 h_i N_q \right) \quad \text{رابطه (۸)}$$

شکل ۵. توزیع تنش به روش برش استوانه

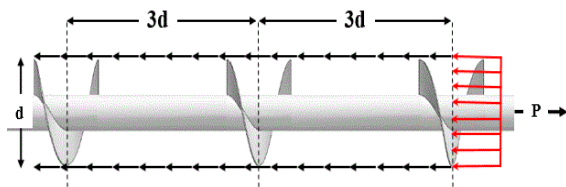


Fig. 5. Stress distribution by cylindrical shear method

در رابطه ۸، D و L به ترتیب مقادیر قطر ستون خاکی (برابر با قطر صفحه مارپیچ) و طول میخ هستند. \bar{b} و φ به ترتیب تنش قائم و زاویه اصطکاک در سطح ستون خاکی هستند. همچنین A_{hi} سطح درگیر هر صفحه با خاک است.

۱- روش صفحه منفرد

۲- روش برش استوانه

۳- روش تجربی بر اساس گشتاور نصب

روش تجربی دارای سازگاری بیش‌تری با واقعیت است ولی برای محاسبه سطح مورد نیاز از دو روش اول و کنترل آن از روش سوم بهره می‌برند [21].

۱-۲- روش صفحه منفرد:

این روش مبتنی بر نظریه رایج ظرفیت باربری پی‌ها است:

$$P = \sum_{i=1}^n Q_{hi} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$Q_{hi} = A_{hi} \times q_{hi} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$q_{hi} = C_i N_c + \frac{1}{2} d_{hi} \gamma_i N_{\gamma} + \gamma_i k_0 h_i N_q \quad \text{رابطه (۵)}$$

در شکل (۴) چگونگی توزیع تنش در روش صفحه منفرد مشاهده می‌شود. رابطه ۳، ظرفیت کل میخ (P) که مجموع ظرفیت هر صفحه (Q_{hi}) است، را دارد.

شکل ۴. توزیع تنش به روش صفحه منفرد

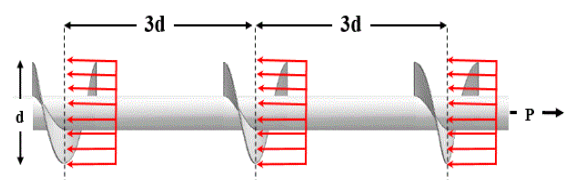


Fig. 4. Stress distribution by single plate method

در رابطه ۴، A_{hi} سطح هر صفحه و q_{hi} تنش موجود در سطح صفحات است. اما رابطه ۵ که در واقع توسعه یافته روابط ظرفیت باربری Hansen, Meyerhof, Terzaghi و Vesic است، شامل سه جمله است که به ترتیب سهم چسبندگی خاک (C_i)، اصطکاک و فشار سربار در ظرفیت باربری است.

با توجه به اینکه میخ به صورت افقی قرار می‌گیرد ضریب k_0 (ضریب فشار جانبی خاک) به سربار اعمال می‌شود. N_{γ} ، N_c و N_q ضرایب ظرفیت باربری هستند که با توجه به φ محاسبه

بدون افزایش موثر مقاومت می‌شود. از معادلات Boussinesq می‌توان نتیجه گرفت، فاصله سه برابر قطر برای صفحات، یک راه حل عملی بر اساس توزیع تنش خواهد بود [22].

با توجه به مطالعات انجام شده توسط باسط^{۱۷} [22] در سال ۱۹۷۷ می‌توان اظهار داشت که فاصله سه برابر قطر فاصله انتقالی بین روش برش استوانه و صفحه منفرد است و روش برش استوانه و صفحه منفرد را می‌توان به ترتیب روش‌های مناسبی برای محاسبه ظرفیت میخ‌های ماریپیچ با فاصله صفحه کم و زیاد دانست. بیشتر نتایج این دو روش در فاصله سه برابر قطر مشابه است [22].

۳- مدلسازی

۳-۱- مش اجزاء محدود و شرایط مرزی

یک مدل سه بعدی اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار تجاری آباکوس به منظور انجام آزمایش بیرون کشش توسعه داده شده است. در این مدلسازی از سه مش جداگانه استفاده شده است. مش اول مدل خاک، مش دوم میخ و صفحات ماریپیچ و مش آخر صفحه چوبی است. علت استفاده از صفحه، مدلسازی واقعی مراحل آزمایشگاهی است. در مراحل آزمایشگاهی از یک صفحه برای اعمال یکنواخت سربار ایجاد شده توسط جک هیدرولیکی بر خاک استفاده می‌شود. هندسه و مش تولید شده در آنالیز عددی در شکل (۷) دیده می‌شود.

با توجه به آنالیز مش، مشخص شده است که مش‌بندی در ناحیه یک استوانه خاکی، که حین فرایند بیرون کشش به سمت بیرون حرکت داده می‌شود، روی مقاومت و نتایج تاثیر گذار است و در این ناحیه از مش‌بندی کاملاً ریز استفاده شده است. ابعاد مدل خاک ۱/۵×۱×۱ متر است. مشخصات هندسی میخ به تفصیل در شکل (۱) توضیح داده شده است. میخ متشکل از یک لوله فولادی به قطر خارجی ۳۸ میلی‌متر، ضخامت ۵ میلی‌متر و طول ۱۰۵۰ میلی‌متر هست که در ارتفاع و عرض ۰/۵ متر از خاک نصب شده است. صفحات ماریپیچ دارای ضخامت ۵ میلی‌متر، گام ۷۵ میلی‌متر و قطر ۱۵۰ میلی‌متر هستند (شکل ۱).

ضریب k_0 ، ضریب فشار جانبی خاک و N_γ و N_q ضرایب ظرفیت باربری هستند که با توجه به ϕ محاسبه می‌شوند، اما γ_i و h_i به ترتیب قطر صفحه، وزن مخصوص خاک و عمق مدفون میخ هستند.

شکل ۶. توزیع تنش صفحه عمیق دفن شده با معادلات بوسینسک

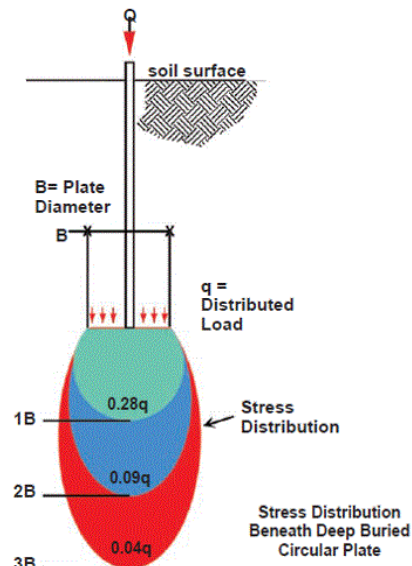


Fig. 6. Stress distribution of buried deep plate with Boussinesq equations

یکی از پارامترهای مهم در تعیین ظرفیت باربری میخ ماریپیچ، انتخاب فاصله مناسب بین صفحات برابر است. همان‌گونه که در شکل (۶) دیده می‌شود معادلات Boussinesq [22] (در حدود سال ۱۸۸۵) توزیع تنش برای یک صفحه عمیق دفن شده در خاک را توصیف کرده است.

با فاصله گرفتن از سطح بارگذاری مقادیر تنش کاهش می‌یابد، به شکلی که در فاصله سه برابر قطر این مقدار به حدود ۴٪ مقدار بارگذاری می‌رسد [22]. این مطلب نشان دهنده آن است که قرارگیری صفحات به فاصله سه برابر قطرشان، می‌تواند از ترکیب نواحی توزیع تنش جلوگیری کند و مانع از گسیختگی پیش‌بینی نشده شود.

اما فاصله بیشتر از سه برابر قطر، از همپوشانی نواحی توزیع تنش جلوگیری کرده و فواصلی در بین نواحی توزیع تنش ایجاد می‌شود که بدون اثرگذاری است و موجب افزایش طول میخ،

شکل ۹. جزئیات مش بندی میخ

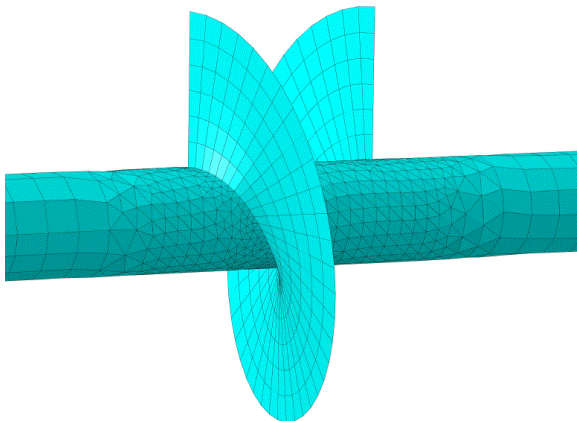


Fig. 9. Details of nail meshing

صفحات مارپیچ از المان‌های پوسته‌ای هستند که از نوع دو بعدی ۴ گرهی هستند و در این ناحیه برای بدنه میخ به دلیل هندسه پیچیده ناحیه اتصال با صفحات مارپیچ، از المان‌های بسیار ریز و C3D4 استفاده شده است که از نوع ۴ وجهی ۴ گرهی هستند (شکل ۹).

جابه‌جایی در جهت‌های x و y شکل (۸) برای صفحات جانبی خاک، مطابق کار آزمایشگاهی بسته شده است. جابه‌جایی در جهت z در قسمت پایین صفر و در قسمت بالا به منظور اعمال سربار و ایجاد نشست در ماسه آزاد است. به منظور اعمال بیرون کشش یک جابه‌جایی در جهت مخالف y به سر میخ اعمال می‌شود.

۳-۲- مدل عددی، مشخصات مدل و مراحل مدلسازی

خاک از نوع ماسه ریز بوده و در تست آزمایشگاهی به صورت خشک و بدون تراکم بعد از کارگذاری میخ، در جعبه آزمایش ریخته می‌شود. به منظور مشاهده رفتار خاک در حین اعمال سربار و انجام بیرون کشش از مدل رفتاری پلاستیک موهر-کلمب استفاده شده است و مقادیر پارامترها در جدول (۱) مشاهده می‌شود.

شکل ۷. قسمت‌های مختلف مدل

a. (خاک) b. (میخ) c. (صفحه چوبی)

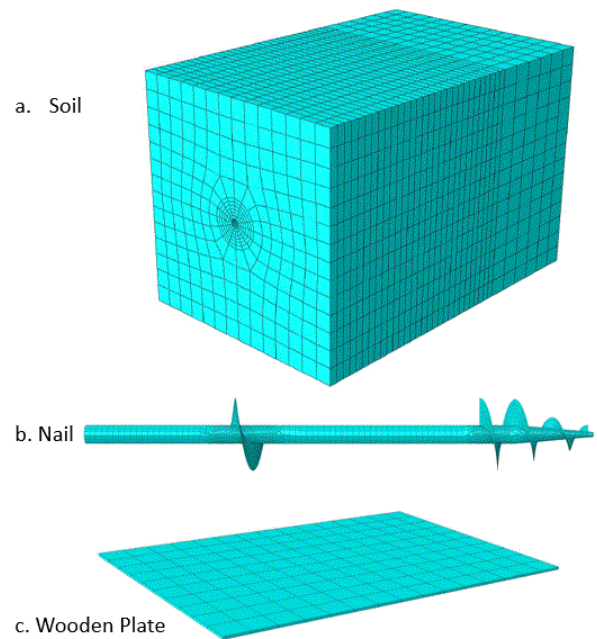


Fig. 7. Different parts of the model

(a. Soil b. Nail c. Wooden Plate)

شکل ۸. مدل سه بعدی اجزاء محدود آزمایش بیرون کشش

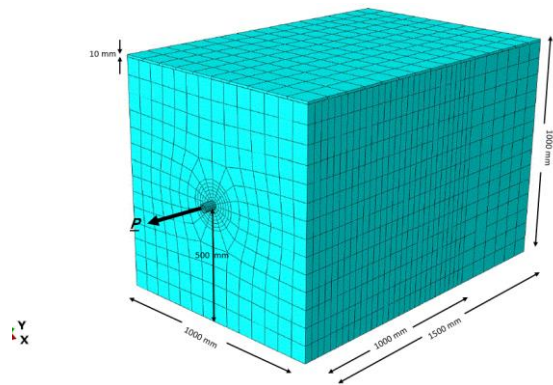


Fig. 8. 3D finite element model for a soil-nail pull-out test

میخ دارای چهار صفحه مارپیچ است، که دو صفحه کامل و دو صفحه کاهش یافته مخروطی هستند. این صفحات مخروطی به منظور فرایند نصب در نظر گرفته شده‌اند. همچنین از یک صفحه چوبی به منظور اعمال سربار با ابعاد $1 \times 1/5$ متر استفاده شده است. در مدلسازی خاک و صفحه چوبی از المان‌های C3D8 استفاده شده است که از نوع المان‌های ۶ وجهی ۸ گرهی هستند. در مدلسازی میخ از سه نوع المان استفاده شده است. بدنه میخ در ناحیه دور از صفحه مارپیچ از نوع المان C3D8 است.

جدول ۱. پارامترها و مقادیر در مدلسازی اجزاء محدود

Material	Behavioral Model	Y kN/m ³	E GPa	ν	φ	ψ	C kPa
Soil (Sand)	Mohr-columb	15.1	0.012	0.25	36	2.5	0.1
Nail	Elastic	78.5	220	0.3	-	-	-
Wooden Plate	Elastic	0.7	4	0.25	-	-	-

Table 1. Parameters and values in the FE modelling

شده است. در یک برش سه بعدی تنش برشی دارای دو مؤلفه عمود بر هم است، این مؤلفه‌ها شامل τ_1 و τ_2 است. در این مدل فرض بر این است که اگر تنش اصطکاکی معادل $(\tau_{eq} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2})$ کوچک‌تر از تنش اصطکاکی بحرانی ($\tau_{critical}$) باشد، جابه‌جایی رخ نخواهد داد.

تنش اصطکاکی بحرانی، ناشی از فشار و ضریب اصطکاک در فصل مشترک دو ماده است. با افزایش τ_{eq} در فصل مشترک و برابر شدن آن با مقدار τ_{crit} جابه‌جایی اتفاق افتاده و گسیختگی رخ می‌دهد. همچنین صفحات ماریپیچ با توجه به ضخامت کمی که دارند به صورت قید مدفون در خاک در نظر گرفته شده‌اند.

مراحل آماده‌سازی و انجام آزمایش بیرون کشش را به طور خلاصه می‌توان در گام‌های زیر عنوان کرد:

گام ۱: مدلسازی، اعمال شرایط اولیه و اعمال شرایط مرزی

گام ۲: اعمال سربار

گام ۳: فعال‌سازی میخ و اعمال نیروی بیرون کشش

مشخصات پلاستیک خاک با توجه تست‌های آزمایشگاهی تاخی و همکاران [9] انتخاب شده است. فرایند بیرون کشش میخ با سرعت 1mm/min انجام می‌شود. این سرعت کم از پدیده کشیدگی جلوگیری میکند [9]. مدل رفتاری انتخاب شده برای میخ و صفحه چوبی، مدل الاستیک خطی است که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است.

در فصل مشترک میخ و خاک از مدل اصطکاکی کولمب استفاده

شکل ۱۰. نتایج عددی و آزمایشگاهی نیرو-جابه‌جایی در سربارهای ۱۹، ۳۴ و ۷۵ کیلوپاسکال

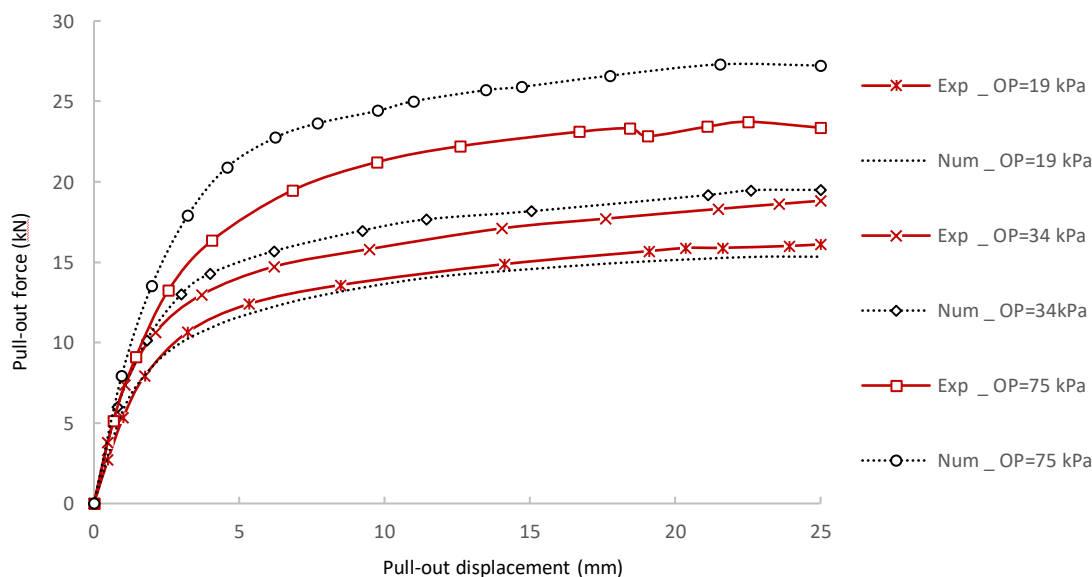


Fig. 10. Numerical and experimental results of pull-out force versus pull-out displacement for the tests under OP = 19, 34, 75 kPa

۴- درستی آزمایی، تفسیر نتایج و بررسی اثر سربار

شکل ۱۱. نتایج روش‌های مختلف محاسبه ظرفیت میخ مارپیچ

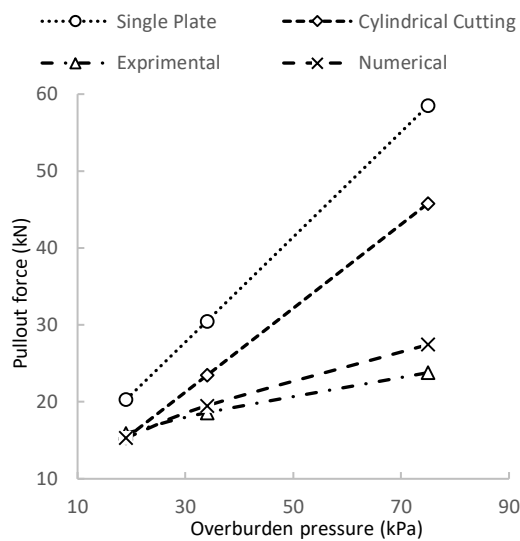


Fig. 11. Results of different methods of calculating the helical soil-nail capacity

جدول ۲. مقادیر ظرفیت میخ مارپیچ در روش‌های مختلف

Method	Overburden Pressure	19 kPa	34 kPa	75 kPa
Experimental	Pull-out Force (kN)	15.9	18.6	23.8
Numerical	Pull-out Force (kN)	15.3	19.5	27.4
Single Plate	Pull-out Force (kN)	20.3	30.5	58.5
cylindrical cutting	Pull-out Force (kN)	15.3	23.4	45.8

$$N_y = 54.36, N_q = 47.1, k_0 = 1 - \sin 36 = 0.41, d = 0.15 \text{ m}, \gamma = 15.1 \text{ kN/m}^3, h = 0.5 \text{ m}, n = 2, A = 3.14 (0.15 * 0.15) / 4$$

Table 2. Helical soil-nail capacity values in different methods

مقادیر این نتایج در جدول (۲) دیده می‌شود و نمودارهای آن در شکل (۱۱) عنوان شده است. در مقایسه روش‌های محاسبه ظرفیت با توجه به نمودارهای شکل (۱۱) می‌توان گفت که روش صفحه منفرد مقادیر بالاتری را نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد و کم‌ترین مقادیر را نیز روش آزمایشگاهی نشان می‌دهد. نتایج مربوط به روش صفحه منفرد می‌توانست دارای شیب کمتری برای یک خاک ریزدانه باشد. چرا که ضرایب ظرفیت باربری مؤثر از ϕ بوده و این مقادیر برای خاک دانه‌ای بیشتر هستند. البته تقریب مناسبی بین روش آزمایشگاهی و عددی وجود دارد که می‌توان عنوان کرد این دو روش به واقعیت نزدیک تر هستند. در سربارهای پایین هر چهار روش تقریباً مقادیر

بعد از مدلسازی، اعمال شرایط اولیه و وارد کردن سربار، بیرون کشش با سرعتی بسیار کم (1mm/min) به واسطه شرط مرزی در نظر گرفته شده اعمال می‌شود. نتایج بیرون کشش در سه سربار مختلف در نمودارهای شکل (۱۰) دیده می‌شود. در این نمودار سعی شده است نمودارهای خروجی این مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی تاخی و همکاران [9] مقایسه شود. نمودارهای خط چین سیاه رنگ، مدلسازی اجزاء محدود صورت گرفته، هستند. نمودارهای بیرون کشش تاخی و همکاران [9] نشان دهنده تغییر و کاهش مقدار پارامترهای پلاستیک (ϕ و C) با افزایش مقدار جابه‌جایی است.

با توجه به اینکه خاک، ماسه خشک است، پارامتر موثر در این بخش ϕ هست. در فرآیند مدلسازی در آباکوس با افزایش مقدار جابه‌جایی مقدار ϕ ، طبق بیرون کشش آزمایشگاهی، کاهش داده شده است تا به مقدار پسماند برسد.

همان‌گونه که در نمودارهای مدلسازی بیرون کشش دیده می‌شود مقادیر ماکزیم مقاومت در سربارهای ۱۹ kPa، ۳۴ kPa و ۷۵ برابر ۱۵/۳ kN، ۲۷/۴ kN و ۱۹/۵ kN، و جابه‌جایی‌های متناظر ۲۳ mm، ۲۴ mm و ۲۳ mm است. محدوده خطی نمودارهای بیرون کشش در جابه‌جایی ۲-۴ mm و مقدار متناظر نیروی بیرون کشش در این محدوده ۸-۲۰ kN است. همان‌گونه که نتایج تاخی و همکاران [9] نشانگر اثرگذاری سربار بر مقاومت بیرون کشش است، مدلسازی اجزاء محدود هم نشانگر این مطلب، اما به شکل مؤثرتری است. با توجه به این که اثر سربار بر خاک‌های دانه‌ای (ϕ) بیشتر است، تحلیل نتایج اثر سربار برای یک خاک ریزدانه می‌توانست اثر کمتری داشته باشد. به شکلی که در سربار ۱۹ kPa دو نمودار تقریباً منطبق بر هم هستند اما در دو سربار دیگر اختلافی فزاینده مشاهده می‌شود که نشان دهنده اثرگذاری بیش‌تر سربار است. در این پژوهش سعی شده است که نتایج کار آزمایشگاهی، مدلسازی عددی و نتایج بدست آمده از روش‌های تئوری با یکدیگر مقایسه شود.

طور که کانتورهای جابه‌جایی شکل (۱۲) نشان می‌دهند در محل قرارگیری صفحات، محدوده گسیختگی به دلیل تراکم خاک در آن منطقه از قطر صفحات فراتر می‌رود که موجب عملکرد بهتر می‌شود.

۵- مطالعه پارامتریک فاصله و تعداد صفحات

در این مطالعه به منظور بررسی اثر فاصله صفحه و تعداد صفحه دو میخ دیگر (شماره ۲ و ۳) در نظر گرفته شده است که در شکل (۱۳) مشخصات این میخ‌ها دیده می‌شود.

شکل ۱۳. مشخصات هندسی میخ‌های استفاده شده در مطالعه

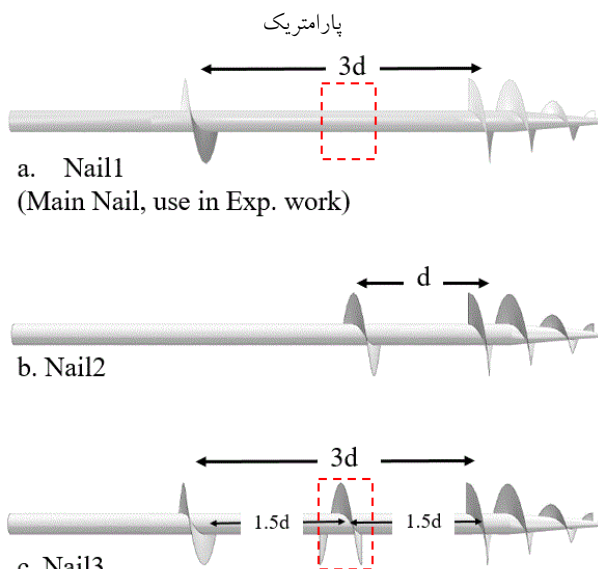


Fig. 13. Geometrical properties of Nails, Used in parametric studies

۵-۱- مطالعه اثر فاصله صفحه

با توجه به این که میخ اصلی دارای یک صفحه کامل به فاصله حدود $3d$ نسبت به صفحات انتهایی بود، به منظور بررسی اثر فاصله صفحه، میخ ۲ با یک صفحه به فاصله d از صفحات انتهایی در نظر گرفته شده است. نتایج این مدلسازی در نمودارهای شکل (۱۴) مشاهده می‌شود. نمودارهای قرمز رنگ نشان دهنده مقاومت بیرون کشش میخ شماره ۲ هستند که $1-3$ kN کاهش مقاومت را نشان می‌دهند. همچنین محدوده خطی نمودارهای بیرون کشش بسیار کاهش یافته است.

مشابهی را نشان می‌دهند و در سربارهای بالا مقادیر ظرفیت محاسبه شده از روش‌های مختلف با یکدیگر اختلاف پیدا می‌کند. این اختلاف بین روش صفحه منفرد و روش برش استوانه بیشتر است. مقادیر به دست آمده بیانگر آن است که روش‌های تئوری مقادیر بیشتری را نسبت به روش عددی و روش آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این می‌تواند به دلیل در نظر گرفته نشدن شرایط واقعی و طبیعی حین گسیختگی باشد. چرا که حین گسیختگی چگونگی عملکرد صفحات و درگیر شدن هر یک از صفحات بسیار مهم است. برای نمونه در روش صفحه منفرد ظرفیت همه صفحات به طور هم‌زمان در نظر گرفته می‌شود، در حالی که طبق مطالعه بخش ۵-۲ صفحات میانی یا صفحات انتهایی عملکرد کم‌تری دارند. در شکل (۱۲) چگونگی گسیختگی و کانتورهای جابه‌جایی در جهت y برای میخ مارپیچ در سربار 75 kPa دیده می‌شود.

شکل ۱۲. الگوی جابه‌جایی و ناحیه گسیختگی در جهت y برای میخ اصلی

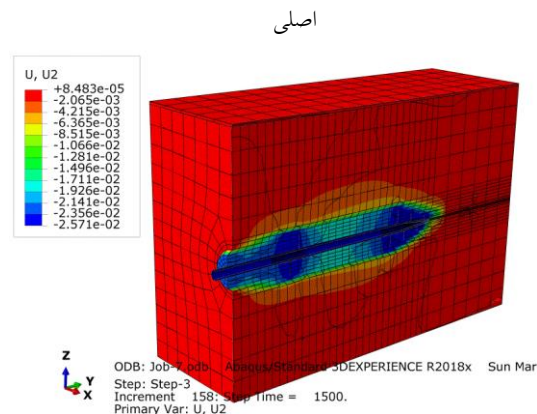


Fig. 12. Deformation pattern and rupture zones in y direction for main nail

همان گونه که در شکل (۱۲) دیده می‌شود تمرکز جابه‌جایی‌ها در ناحیه صفحات، نشان دهنده عملکرد به صورت صفحه منفرد است. نتایج بخش ۵-۲ و نمودار شکل (۱۶) تایید کننده این مطلب است. چرا که مشاهده وضعیت تنش در مقابل هر صفحه نشان دهنده عملکرد برابر هر صفحه است. با این حال حرکت خاک در محدوده بین صفحات، سازوکار گسیختگی به صورت برش استوانه را نشان می‌دهد. در واقع مطلب مذکور نشان دهنده این است که فاصله $3d$ بین صفحات، فاصله انتقالی بین سازوکار گسیختگی به روش برش استوانه و صفحه منفرد است. همان

۲-۵ - مطالعه اثر تعداد صفحه

کردن صفحه یا در واقع کاهش فاصله صفحات به هیچ وجه نتوانسته است باعث افزایش مقاومت شود اما محدوده مقاومت خطی میخ را افزایش داده است، به شکلی که در ابتدا مقاومت میخ با شیب بیشتری شروع شده است. در هر سه سربارها به سمت چپ کشیده شده‌اند در حالی که هیچ‌گونه تغییری در محدوده پلاستیک دیده نمی‌شود. بررسی دقیق‌تر وضعیت تنش در مقابل صفحات میخ ۱ و ۳ در شکل‌های (۱۶ و ۱۷) دیده می‌شود.

همان‌گونه که گفته شد عملکرد هر یک از صفحات در تعیین ظرفیت بسیار مهم است.

به منظور بررسی اثر تعداد صفحه، میخ شماره ۳ با تعداد ۲ صفحه بعد از صفحات انتهایی در نظر گرفته شده است که فاصله این صفحات 1.5d است. در واقع این میخ همان میخ شماره ۱ با یک صفحه میانی هست و قصد بررسی اثر اضافه کردن صفحه در بین صفحات اصلی یا بررسی اثر تعداد صفحه بیش‌تر با فاصله کمتر دنبال می‌شود.

نتایج این مدل‌سازی در نمودارهای شکل (۱۵) مشاهده می‌شود. نمودارهای قرمز رنگ نشان دهنده نتایج مقاومت بیرون کشش برای میخ ۳ هستند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اضافه

شکل ۱۴. نتایج عددی نیرو-جاب‌جایی میخ ۱ و ۲ در سربارهای ۳۴، ۱۹ و ۷۵ کیلوپاسکال

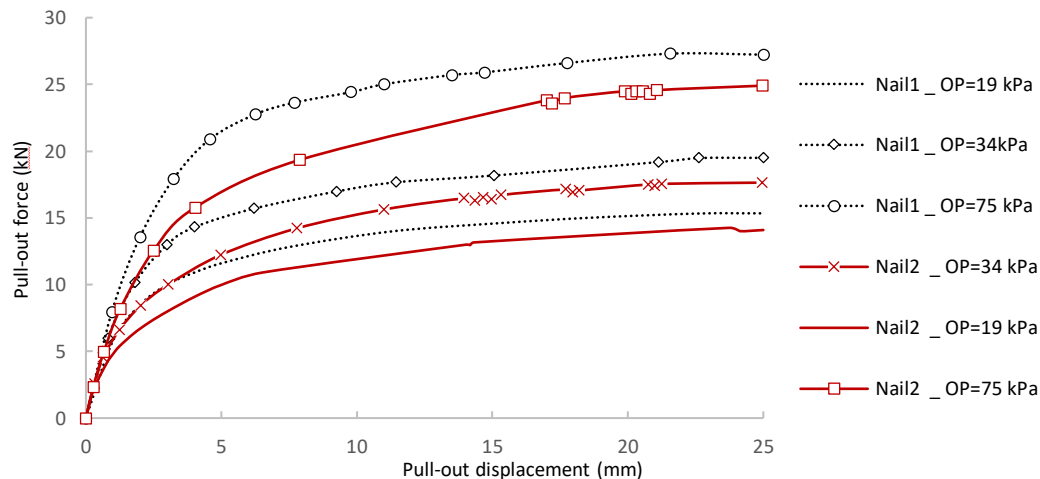


Fig. 14. Numerical results of pull-out force versus pull-out displacement for Nail 1&2 tests under OP = 19, 34, 75 kPa

شکل ۱۵. نتایج عددی نیرو-جاب‌جایی میخ ۲ و ۳ در سربارهای ۳۴، ۱۹ و ۷۵ کیلوپاسکال

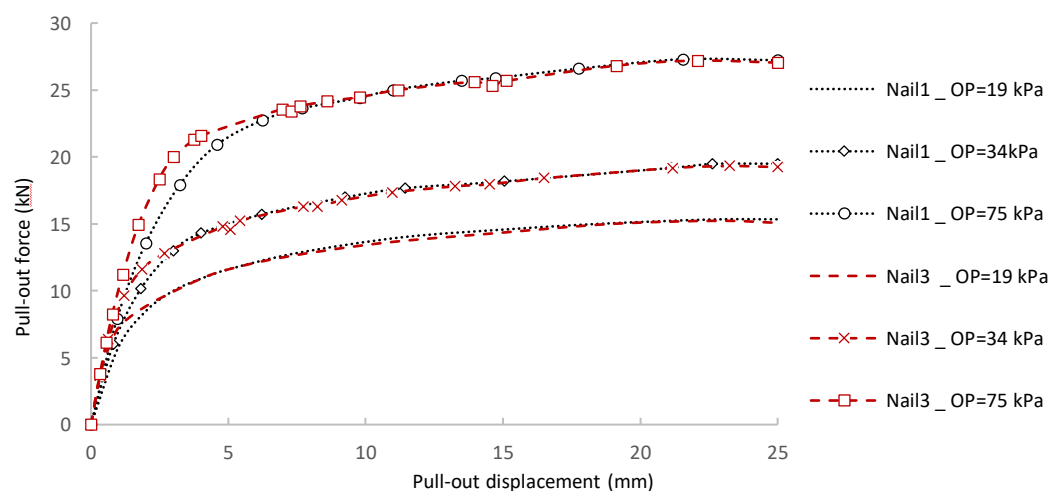


Fig. 15. Numerical results of pull-out force versus pull-out displacement for Nail 2&3 tests under OP = 19, 34, 75 kPa

۱- منحنی‌های بیرون کشش و نمودارهای مقاومت بیرون کشش در مقابل سربار نمایانگر آن هستند که با افزایش سربار (تنش‌های قائم) مقاومت تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. این پدیده تمایل پیروی رفتار بیرون کشش میخ از معیار موهر-کولمب را نشان می‌دهد.

۲- همان‌گونه که از کانتورهای جابه‌جایی بر می‌آید محدوده گسیختگی به دلیل متراکم شدن خاک در محل صفحات ماریچ از محدوده قطر صفحات فراتر می‌رود و این پدیده موجب عملکرد بهتر میخ ماریچ نسبت به میخ تزریقی است.

۳- مشاهدات کانتورهای جابه‌جایی برای میخ با فاصله صفحه 3d نشان دهنده عملکرد بینابینی این میخ بین دو روش صفحه منفرد و برش استوانه است.

۴- در این مطالعه مقایسه بین روش‌های مختلف محاسبه ظرفیت صورت گرفته که با توجه به ضریب اطمینان می‌توان روش آزمایشگاهی و عددی را روش‌های محاسبه کمترین ظرفیت و مطابق با واقعیت عنوان کرد.

۵- با توجه به معادلات بوسینسک، فاصله سه برابر قطر را می‌توان فاصله بهینه صفحات ماریچ در نظر گرفت.

۶- از نتایج مقاومت بیرون کشش برای میخ ۲ مشاهده شد که فاصله صفحه کم‌تر از سه برابر قطر باعث کاهش مقاومت می‌شود که این موضوع می‌تواند موثر از تداخل نواحی توزیع تنش صفحات باشد.

۷- نتایج مقاومت بیرون کشش میخ ۳ نشان می‌دهد که استفاده از تعداد صفحات زیاد با فاصله کم نمی‌تواند موجب افزایش مقاومت شود و تنها محدوده خطی منحنی بیرون کشش را افزایش می‌دهد و میخ را غیر اقتصادی می‌کند.

۸- از جمله محدودیت‌های مطرح برای بررسی اثر فاصله صفحه در این مدلسازی را می‌توان طول کم جعبه آزمایش دانست. می‌توان با افزایش طول جعبه در مدلسازی، شرایط را برای مطالعات بیشتر فراهم کرد.

References

[1] Wei W.B. & Cheng Y.M. 2010 Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods. *Computers and Geotechnics*, **37**, 602-618.

۷- مراجع

شکل ۱۶. تنش متوسط مقابل صفحات برای میخ ۱ در سربار ۷۵ کیلوپاسکال.

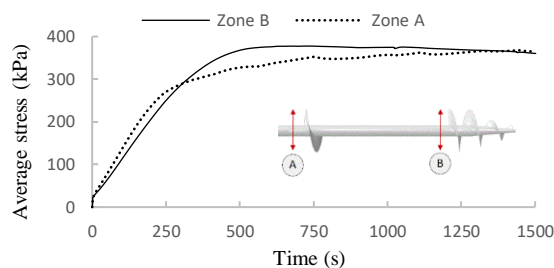


Fig. 16. Average stress (σ_{22}) in front of plate versus time for nail No. 1 in 75 kPa overburden pressure.

شکل ۱۷. تنش متوسط مقابل صفحات برای میخ ۳ در سربار ۷۵ کیلوپاسکال.

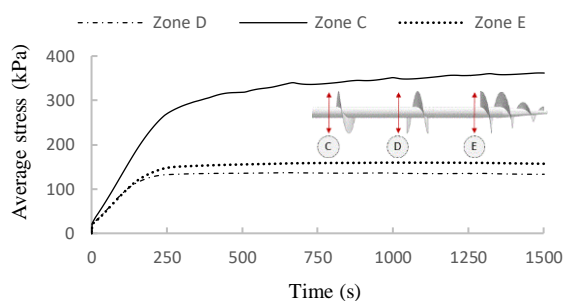


Fig. 17. Average stress (σ_{22}) in front of plate versus time for nail No. 3 in 75 kPa overburden pressure.

وضعیت تنش در شکل (۱۷) نشان دهنده کاهش عملکرد صفحه میانی و انتهایی است، در حالی که در میخ ۱ وضعیت تنش مقابل صفحات، نشان دهنده عملکرد برابر صفحات است. این مطلب یکی از دلایل مهم افزایش ظرفیت محاسبه شده در روش‌های تنوری است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک مدلسازی سه بعدی اجزاء محدود توسط نرم افزار آباکوس انجام شده است. در آن تعدادی آزمایش به منظور محاسبه مقاومت بیرون کشیدگی میخ ماریچ و چگونگی گسیختگی آن در ماسه سست، صورت پذیرفته و نتایج آن با تست‌های آزمایشگاهی و روش‌های تنوری مقایسه شده است. با توجه همگرایی مناسب بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی، در نهایت مطالعاتی روی اثر فاصله صفحه و تعداد صفحه ۲ با میخ دیگر صورت گرفته که نتایج آن به ترتیب زیر است:

- [15] Hong C.Y., Yin J.H. & Pei H.F. 2013 Comparative study on pullout behaviour of pressure grouted soil nails from field and laboratory tests. *J Central South Univ* , **20**:22, 85–92.
- [16] Yin J. , Zhou W. 2009 Influence of grouting pressure and overburden stress on the interface resistance of a soil nail. *J Geotech Geoenviron Eng*, **135** (9) , 1198–208 .
- [17] Bobbitt D.E. 1996 Chance soil screw retention wall system report. Retrieved from Centralia, Missouri.
- [18] Deardorff D. , Moeller M. & Walt E. 2010 Results of an instrumented helical soil nail wall earth retention conference 3. American Society of Civil Engineers, 262–9.
- [19] Carlos A., Lazarte Ph.D., P.E., Victor Elias P.E., David Espinoza R., Ph.D., P.E., Paul J. ,Sabatini, Ph.D., P.E. 2003 GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR NO. 7, Soil Nail Walls. Report No.FHWA0-IF-03-017 (March 2003).
- [20] Acceptance criteria for helical foundation system and devices 2003 , one of the evaluation reports from ICC evaluation service company (ICC-ES-A350).
- [21] Hamednasimi H., 2018 Thesis: Experimental study of overburden pressure, geometry, installation method, density and moisture content of soil effects on screw nail pullout resistance. Department of Geotechnical Engineering Faculty of Civil & Environmental Engineering Tarbiat Modares University. **(In Persian)**
- [22] Centralia H.C. 2014 Enclopedia of anchoring, Anchors and anchors tools. Hubbell / Chance — Cenrtralia (Mo 65240).
- [23] Su, L.J., Yin J. , Zhou W. 2010 Influences of overburden pressure and soil dilation on soil nail pull-out resistance. *Computers and Geotechnics*, **37**(4):555-564
- [24] Zhou W.H., Yin J.H. & Hong C.Y. 2010 Finite element modelling of pullout testing on a soil nail in a pullout box under different overburden and grouting pressures. *Canadian Geotechnical Journal*, **48**, 557–567 .
- [25] Xinyu Y., Shanyong W., Qiong W., Scott W., Daichao S. 2017. Numerical and experimental studies of the mechanical behaviour for compaction grouted soil nails in sandy soil, *Computers and Geotechnics*, volume **90** : 202-214.
- [26] Oliaei M., Norouzi B., Binesh S.M. 2019 Evaluation of soil-nail pullout resistance using mesh-free method , *Computers and Geotechnics*, volume **116** : 1-13.
- [27] Yuan J., Lin P., Mei G., Hu Y. 2019 Statistical prediction of deformations of soil nail walls , *Computers and Geotechnics*, volume **115** : 1-13.
- [2] Cartier G. & Gigan J.P. 1983 Experiments and observations on soil nailing structures. In: Paper presented at the 8th European conf. on soil mechanics and foundation engineering, Helsinki, Finland; Vol.2 , 473-476.
- [3] Heymann G. , Rohde A.W. , Schwartz K. & Fiedlaender E. 1992 Soil nail pullout resistance in residual soils. In: Paper presented at the proceedings, international symposium on earth reinforcement practice, Fukuoka, Japan, 487-492 .
- [4] Jewell R.A. 1990 Review of theoretical models for soil nailing. In: Paper presented at the proceedings, international reinforced soil conference, Glasgow, U.K. , 265–75.
- [5] Milligan G.W.E., Tei K., 1998 The pull-out resistance of model soil nails. *Soils Found* , **38**(2) , 179–90.
- [6] Pradhan B. , Tham L. , Yue Z. , Junaideen S. & Lee C. 2006 Soil–nail pullout interaction in loose fill materials. *Int J Geomech*, **6**(4), 238–47.
- [7] Schlosser F. 1982 Behavior and design of soil nailing. In: Paper presented at the proceedings, international symposium on recent development in ground improvement technique, Bangkok, Thailand.
- [8] Sharm M., Samanta M. & Sarkar S. 2017 A laboratory study on pullout capacity of helical soil nail in cohesionless soil. *Canadian Geotechnical Journal* , **54**(10) , 1482-1495.
- [9] Tokhi H. , Ren G. & Li J. 2016 Laboratory study of a new screw nail and its interaction in sand. *Computers and Geotechnics* , **78** , 144–154 .
- [10] Kovári K. 2003 History of the sprayed concrete lining method, part II: milestones up to the 1960s. *Tunn Undergr Space Technol*, **18**(1), 71–83.
- [11] Yeung, A.T., Cheng, Y.M., Lau, C.K., Mak, L.M., Yu, R.S.M., Choi, Y.K., and Kim, J.H. 2005. An innovative Korean system of pressure-grouted soil nailing as a slope stabilization measure. In Proceedings of the HKIE Geotechnical Division 25th Annual Seminar, Hong Kong, 4 May 2005. Geotechnical Division, Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong. pp. 43–49.
- [12] Junaideen S.M., Tham L.G., Law K.T., Lee C.F. & Yue Z.Q. 2004 Laboratory study of soil–nail interaction in loose, completely decomposed granite. *Can Geotech J*, **41** (2), 274–86.
- [13] Su L. , Chan T. , Yin J. , Shiu Y. & Chiu S. 2008 Influence of overburden pressure on soil–nail pullout resistance in a compacted fill. *J Geotech Geoenviron Eng* , **134** (9),1339–47.
- [14] Su, L.J., Chan, T.C.F., Shiu, Y.K., Cheung, T., and Yin, J.H. 2007. Influence of degree of saturation on soil nail pull-out resistance in compacted completely decomposed granite fill. *Canadian Geotechnical Journal*, **44**(11): 1314–1328.

Finite element modelling of pull-out test for helical soil-nail

S. Maaf¹, M. Oliyai^{2*}

1. M.Sc. Student (Geotechnical Engineering), Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University
maafsina@modares.ac.ir

2. Assistant Professor (Geotechnical Engineering), Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University

*M.Olyai@modares.ac.ir

Abstract

In recent decades, the use of an efficient and cost-effective method to provide soil stability has been a major challenge for civil engineers. With the increasing urban population, the need for underground spaces increases, and deep excavation is an inevitable affair in civil projects. Deep tunnels and large buildings require deep excavations, which must use some techniques to stabilize it. Soil-nailing (reinforcing soil at the site) due to the fast build, is a good way to provide stability. It can also be described as a top-down construction technique for the improvement of the behavioral properties of the in-situ soil mass. The soil-nailed system is formed by inserting relatively slender reinforcing bars into the slope. Depending upon the project cost, site accessibility, availability of working space, and the soil and groundwater conditions, soil-nails can be inserted into the ground. Soil-nail is generally known as conventional and injectable nails but nails with screw plates or "helical soil-nails" are also important due to the faster build and no need for groutings. Helical soil-nails are a new alternative to the conventional soil nails or tie-backs for stabilization of slopes, excavations, and embankments due to ease of installation, minimal site disturbance, and immediate loading capability. Helical soil-nails are installed by application of torque without a drill hole and derive its capacity from one or more helical plates attached to the nail. The shear strength-displacement behavior at the interface is an important parameter in the design of various geotechnical engineering projects, for example, soil-nails, retaining walls, shallow foundations, pile foundations, etc. In soil-nailing, the behavior of the interface between the soil and nail estimated by the pull-out test. The behavior of interface is governed by numerous factors, such as stress conditions, soil properties, method of installation, and soil-nail interface boundary conditions. The pull-out resistance is measured as the most important factor in the design of the nailing system, by the pull-out test. This study, because of limited learning of helical soil nail, aimed to investigate the pull-out resistance by a 3D finite element modeling with Abaqus software and compare its results with laboratory data. A review of the literature for the screw soil-nails, as well as a comparison of its performance with conventional soil nails, are discussed and numerical results of a series of pull-out tests on a screw soil-nail are presented. And a review of the overburden pressure and plate number and plate distance effect is followed. The results show that in helical soil-nail pull-out a high overburden pressure effect can be seen. A linear relationship between peak pull-out force and overburden pressure is observed for different methods of calculating the helical soil-nail capacity that it is indicating that it follow the Mohr-Coulomb failure criteria. Rupture surfaces occur at distances farther than the nail surface, and three times the diameter can be considered the optimal distance of the plates. Using fewer plate distances does not increase resistance, also using more plates with fewer distances does not increase resistance. A comparison of modeling and laboratory results indicates that modeling of the pull-out test can model the behavior of helical soil-nail and verify its performance in a field soil slope.

Keywords: finite element modelling, soil-nailing, helical soil-nail, pull-out test