

ارزیابی عددی ظرفیت بیرون کشش انکرهای ماریچ چندصفحه‌ای در پایدارسازی شیروانی‌ها

مقاله علمی _ پژوهشی

محمد عبدلی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

حمید مهرنهاد*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد حاذقیان، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hmehrnahad@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

صفحه ۲۹۰-۲۷۹

چکیده

امروزه روش‌های متعددی برای پایدارسازی گودهای ساختمانی و پایداری شیروانی‌ها در جاده‌ها وجود دارد. استفاده از انکرهای ماریچ چند صفحه‌ای در پایدارسازی شیروانی‌ها، یکی از روش‌هایی است که در سال‌های اخیر از اقبال عمومی بالایی برخوردار بوده است. گسترش استفاده از انکرهای ماریچ سبب مطالعه‌های متعدد آزمایشگاهی، عددی و میدانی در این زمینه شده است. مطالعه حاضر با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D به ارزیابی عددی سه‌بعدی ظرفیت باربری انکرهای ماریچ چندصفحه می‌پردازد. بدین منظور ابتدا یک آزمون صحت‌سنجی برای تایید روش مدل‌سازی انجام می‌شود. سپس با انجام یک مطالعه پارامتری گسترده، به مطالعه تاثیر پارامترهای مختلف بر ظرفیت باربری انکرهای ماریچ پرداخته می‌شود. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که ظرفیت باربری انکرهای ماریچ با افزایش تراکم خاک و قطر صفحات افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد افزایش چسبندگی خاک تاثیر چندانی بر ظرفیت باربری انکرهای ماریچ ندارد. همچنین نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که سهم باربری صفحات در صورتی که فاصله صفحات از پنج برابر قطر آنها بیشتر باشد، تقریباً یکسان است. در این حالت مکانیزم گسیختگی صفحه منفرد غالب است. اما در صورتی که فاصله صفحات از پنج برابر قطر آنها کمتر شود، سهم باربر صفحه اول (نزدیکترین صفحه به دیواره گود) افزایش و سهم باربری سایر صفحات کاهش می‌یابد. در این حالت، مکانیزم گسیختگی برشی استوانه‌ای غالب است. بنابراین از نتایج مطالعه حاضر می‌توان فاصله بحرانی بین صفحات را پنج برابر قطر صفحات دانست.

واژه‌های کلیدی: انکر ماریچ چند صفحه‌ای، ظرفیت باربری (بیرون‌کشش)، مدل‌سازی عددی، نرم‌افزار FLAC 3D

۱- مقدمه

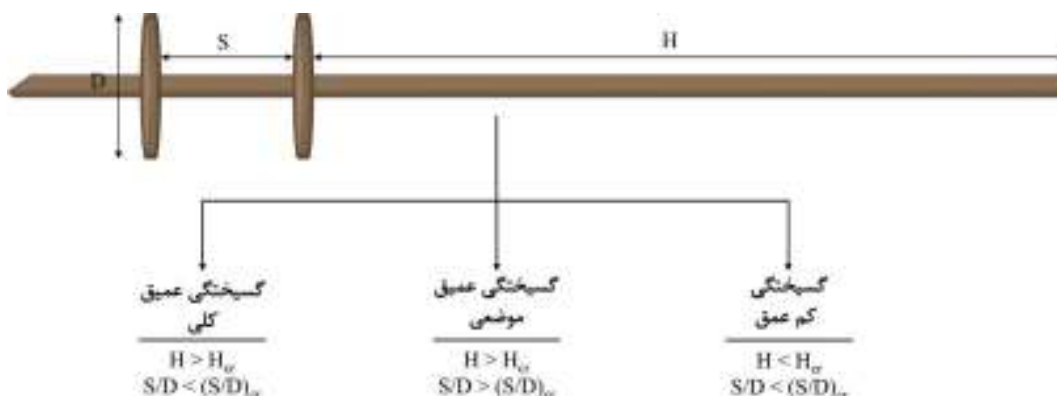
کمک کرده است. انکرهای ماریچ شامل یک شفت فولادی هستند که تعدادی صفحه ماریچ در قطرهای، ضخامت‌ها و فواصل متعد بر روی آن نصب می‌شوند. از انکرهای ماریچ تحت بارهای کششی، فشاری و دینامیکی استفاده می‌شود. نحوه گسیختگی انکرهای ماریچ در خاک به سه نوع گسیختگی کم عمق،

با گسترش دانش مهندسی خصوصاً در زمینه ژئوتکنیک، امروزه روش‌های متعددی برای پایدارسازی یک گود ساختمانی و یا یک شیروانی وجود دارد. نصب آسان، دوستدار محیط‌زیست بودن و بهره‌برداری فوری پس از نصب، به محبوبیت و گسترش استفاده از انکرهای ماریچ در راستای پایدارسازی گودها و شیروانی‌ها

می‌تواند رخ دهد. اگر فاصله بین صفحات از مقدار بحرانی بیشتر باشد، گسیختگی عمیق موضعی و اگر کمتر باشد، گسیختگی عمیق کلی رخ می‌دهد. در گسیختگی عمیق موضعی، هر صفحه ماریپیچ مانند یک پی منفرد مدفون به صورت مجزا در باربری نقش ایفا می‌کند. به این نوع مکانیزم گسیختگی، صفحه منفرد نیز اطلاق می‌شود. در مکانیزم گسیختگی صفحه منفرد، ظرفیت باربری انکر برابر با مجموع ظرفیت باربری صفحات بعلاوه مقاومت اصطکاکی جداره شفت با خاک در طول H خواهد بود. اما در گسیختگی عمیق کلی، فاصله بین صفحات ماریپیچ آن‌چنان کم است که گوه‌های گسیختگی صفحات بایکدیگر تداخل پیدا می‌کنند. در این نوع مکانیزم گسیختگی، یک بلوک خاک استوانه‌ای بین صفحه‌های ماریپیچ تشکیل می‌شود که به همراه آنها حرکت می‌کند. به این نوع مکانیزم گسیختگی، برش استوانه‌ای نیز اطلاق می‌شود. در مکانیزم گسیختگی برش استوانه‌ای، ظرفیت باربری انکر از مجموع ظرفیت باربری صفحه اول، مقاومت اصطکاکی جداره بلوک استوانه‌ای با خاک و همچنین مقاومت اصطکاکی جداره شفت با خاک در طول H محاسبه می‌شود.

(et al. 2014)، ابدرابو و الوکیلی (Abdrabbo and El Harnish and El wakili 2016)، هارنیش و النگار (Naggar 2017) و ساکر (Sakr 2009) اشاره کرد. در ادامه چند مورد از آنها بررسی می‌شود.

گسیختگی عمیق موضعی و گسیختگی عمیق کلی تقسیم می‌شود، که انواع این گسیختگی به نسبت فاصله صفحه‌های ماریپیچ از یکدیگر به قطر صفحات (S/D) و فاصله اولین صفحه ماریپیچ از سطح دیواره خارجی گود (H) بستگی خواهد داشت. شکل ۱ انواع گسیختگی یک انکر ماریپیچ را نشان می‌دهد. پارامترهای H_{cr} و $(S/D)_{cr}$ در شکل ۱ بترتیب فاصله بحرانی و نسبت بحرانی تعریف می‌شوند. همانطور که مشاهده می‌شود، انواع مکانیزم گسیختگی از مقایسه H و S/D با H_{cr} و $(S/D)_{cr}$ تعیین می‌شود. مقادیر متفاوتی برای H_{cr} و $(S/D)_{cr}$ در تحقیقات گذشته بدست آمده است. بعنوان مثال، در مطالعات کوآن و همکارانش (Kwon et al. 2019)، $H_{cr}=6D$ و $(S/D)_{cr}=3$ به دست آمده است. این مقادیر در مطالعات راوات و گوپتا نیز تایید شده است (Rawat and Gupta 2017). در دستورالعمل شرکت Chance (Chance 2004)، $H_{cr}=5D$ و $(S/D)_{cr}=3$ بیان شده است. با توجه به اینکه در انکرهای ماریپیچ، صفحات پشت گوه گسیختگی قرار می‌گیرند (معمولاً $H > H_{cr}$)، وقوع گسیختگی کم عمق نامحتمل است. اما گسیختگی عمیق موضعی یا کلی تاکنون مطالعات عددی، آزمایشگاهی و میدانی زیادی در زمینه انکرها و شمع‌های ماریپیچ صورت پذیرفته است که می‌توان به مطالعات محمودی مهریزی و همکارانش (Mahmoodi Perez and Mehrizi et al. 2014)، پرز و همکارانش (Perez and Sciavon 2018)، پاپادوپولو و همکارانش (Papadopoulou



شکل ۱. انواع گسیختگی انکر ماریپیچ در خاک بر حسب آرایش صفحه‌های ماریپیچ

نسبت به دست‌خوردگی ناحیه دوم دارای مقاومت و سختی کمتری است. در ادامه به کمک نرم‌افزار FLAC 3D یک مدل‌سازی عددی انجام پذیرفت تا نتایج به دست آمده از آزمایش سانتریفیوژ شبیه‌سازی شود. در شبیه‌سازی‌ها مشخص شد که میزان کاهش مدول الاستیسیته در محدوده اول دست‌خوردگی برابر ۱۰ درصد و در محدوده دوم دست‌خوردگی برابر ۲۰ درصد است. پاپادوپولو و همکارانش (Papadopoulou et al. 2014) با انجام مطالعه آزمایشگاهی بر روی ریزشمع ماریپیج با یک، دو و سه صفحه ماریپیج و شبیه‌سازی آن به کمک نرم‌افزار PLXIS 2D به این نتیجه رسیدند که چسبندگی خاک در خاک‌های چسبنده زمانی بر روی ظرفیت باربری نه‌ای تاثیرگذار است که تعداد صفحات ماریپیج بیشتر از یک عدد باشد. این موضوع برای ریزشمع ماریپیج تحت نیروی کششی و فشاری در خاک‌های چسبنده صادق است. مطالعه حاضر با استفاده از یک روش مدل‌سازی عددی سه‌بعدی به ارزیابی ظرفیت باربری (ظرفیت کششی) انکرهای ماریپیج می‌پردازد. بدین منظور، یک مطالعه پارامتری مبسوط انجام می‌شود تا تاثیر پارامترهای متفاوت شامل تراکم و چسبندگی خاک، سربار اعمالی، قطر و فاصله صفحات بر مقدار ظرفیت باربری انکرهای ماریپیج ارزیابی شود. همچنین سهم باربری صفحات و شفت مورد مطالعه قرار می‌گیرد که در تحقیقات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است. در مطالعه حاضر نشان داده می‌شود که با استفاده از سهم باربری صفحات می‌توان وقوع انواع مکانیزم گسیختگی (صفحه‌ای منفرد و برشی استوانه‌ای) در انکرهای ماریپیج چندصفحه را تشخیص داد.

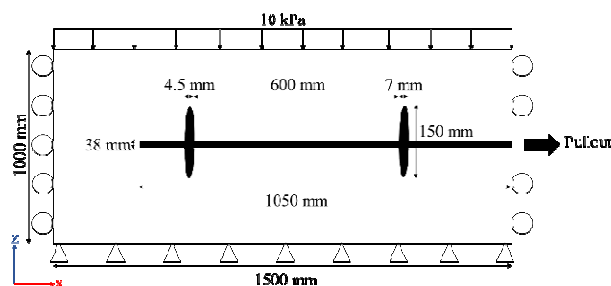
محمودی مهریزی و همکارانش (Mahmoodi Mehrizi et al. 2014) به بررسی پیشینه استفاده از انکرهای ماریپیج در پایدارسازی گودها پرداختند. طبق بررسی انجام شده در این مطالعه، دیوارهای حائل به کمک انکرهای ماریپیج به چهار روش مختلف ساخته می‌شوند که شامل: دوخت به پشت، مشبک، دیوار تقویتی و دیوار با پشته است. استفاده از دیوار حائل با روش دوخت به پشت به کمک انکرهای ماریپیج بسیار رایج است. از طرف دیگر، این مطالعه به بررسی شرایطی پرداخته است که نصب انکرهای ماریپیج در آن‌ها توصیه نمی‌شود. بعنوان مثال، نصب انکرهای ماریپیج در سنگ‌ها و خاک‌های دارای قلوه سنگ توصیه نمی‌شود، زیرا وجود این موانع در دل خاک می‌تواند سبب تغییر جهت انکرهای ماریپیج شود. پرز و همکارانش (Perez and Sciavon 2018) یک مطالعه آزمایشگاهی - عددی انجام دادند. در این مطالعه ابتدا یک نمونه کوچک شمع ماریپیج تک صفحه‌ای در داخل خاک قرار گرفت. به کمک آزمایش سانتریفیوژ نحوه دست‌خوردگی خاک در هنگام نصب شمع ماریپیج بررسی شد و با عکس‌برداری میکروتوموگرافیک، که به کمک اشعه ایکس انجام می‌گیرد، محدوده دقیق دست‌خوردگی مشخص شد. ناحیه دست‌خوردگی اول که بیشترین میزان دست‌خوردگی را دارا است، دقیقاً به اندازه قطر صفحه ماریپیج است و ناحیه دست‌خوردگی دوم که بین ناحیه دست‌نخورده و ناحیه دست‌خورده اول قرار دارد به اندازه $0.27D$ قطر صفحه ماریپیج است و به صورت یک حلقه با ضخامت $0.27D$ دقیقاً در محیط محدوده اول قرار می‌گیرد. مقاومت و سختی نواحی دست‌خورده کم‌تر از نواحی دست‌نخورده است، همچنین دست‌خوردگی ناحیه اول

۲- صحت‌سنجی

مخصوصاً، زاویه اصطکاک، چسبندگی و مدول الاستیسیته خاک بترتیب $17/4$ کیلونیوتن بر متر مکعب، $33/6$ درجه، صفر و 50 مگاپاسکال فرض شدند. شفت و صفحات فولادی الاستیک و با مدول الاستیسیته 200 گیگاپاسکال و ضریب پواسون $0/3$ فرض شدند. شایان ذکر است که برای شفت و صفحات بترتیب از المان‌های میله و لاینر (Itasca Consulting Group 2017) استفاده شد. مشخصات اندرکنشی المان‌های میله و لاینر با خاک براساس راهنمای نرم‌افزار FLAC 3D تعیین شد.

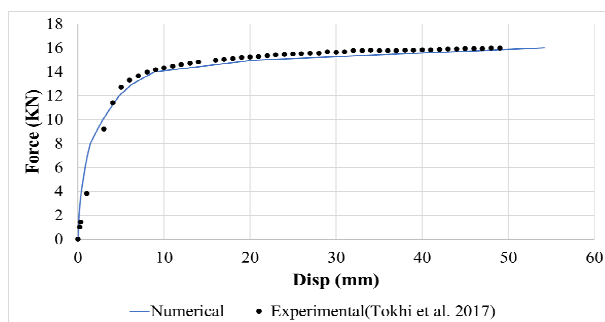
به منظور صحت‌سنجی روش مدل‌سازی عددی، یک آزمون آزمایشگاهی شامل کشش یک میخ ماریپیج دوصفحه که توسط تخی و همکارانش (Tokhi et al. 2017) انجام شده است، شبیه‌سازی شد. شکل ۲ (الف) جزئیات مدل صحت‌سنجی و شرایط مرزی را نشان می‌دهد. در مدل‌سازی عددی، تمامی مشخصات مدل شامل هندسه و مشخصات میخ ماریپیج، هندسه جعبه آزمایش، مشخصات خاک و همچنین سربار اعمال شده مشابه با آزمون صحت‌سنجی در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری موهر کولمب برای خاک در نظر گرفته شد. وزن

شد تا به تعادل برسد. مراحل اعمال بارگذاری تا جابجایی mm ۵۰ ادامه یافت. شکل ۲ (ب) منحنی‌های نیرو-جابجایی عددی و تجربی را مقایسه می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین آنها وجود دارد. این تطابق صحت روش مدل‌سازی و نرم‌افزار استفاده‌شده را تایید می‌کند.



الف

در ادامه روند شبیه‌سازی عددی توضیح داده می‌شود: در ابتدا تنش‌های اولیه در بلوک خاک ایجاد و سپس سربار به بالای بلوک خاک اعمال شد. بعد از به تعادل رسیدن نمونه خاک، میخ ماریچ به صورت گام‌به‌گام تحت کشش قرار گرفت. در هر گام، مقدار کیلونیوتن ۱ نیرو به سر میخ ماریچ اعمال و به مدل اجازه داده



ب

شکل ۲. الف) مشخصات مدل صحت‌سنجی و شرایط مرزی، ب) مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی عددی و آزمایشگاهی

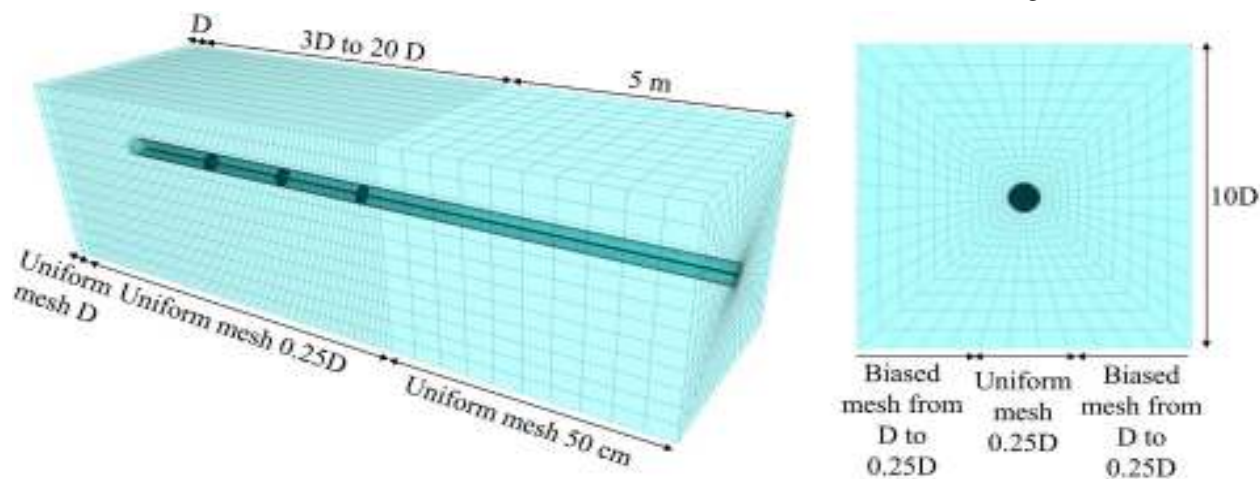
۳- توصیف مساله و فرضیات مدل‌سازی عددی

۳-۱- هندسه مدل و مشخصات خاک

خاک در نظر گرفته شد. مقدار زاویه اتساع خاک (ψ) برابر با 30° و ضریب پواسون $\nu = 0.3$ فرض شد که ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک است. مقدار ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون $K_0 = 1 - \sin \phi$ فرض شده است.

شکل ۳ ابعاد و الگوی مش‌بندی هندسه مدل را نشان می‌دهد. شرایط مرزی مشابه با آزمون صحت‌سنجی فرض شده است (شکل ۲، الف).

در مطالعه حاضر از ۵ نوع خاک استفاده شده است. جدول ۱ مشخصات آنها را نشان می‌دهد. مدل رفتاری موهركولمب برای



شکل ۳. هندسه و الگوی مش‌بندی مدل سه‌بعدی برای انگرهای ماریچ

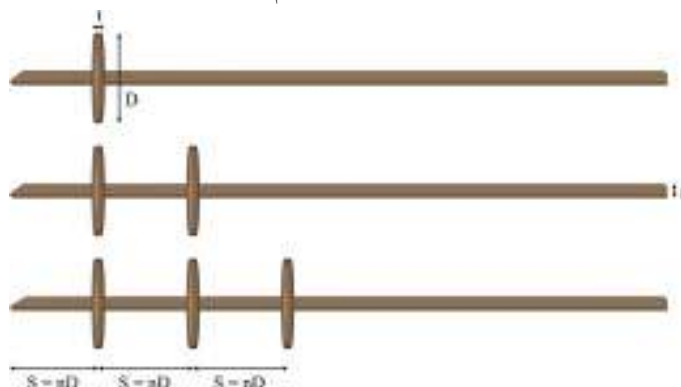
جدول ۱. مشخصات انواع خاک مورد استفاده در مطالعه حاضر

انواع خاک					تراکم خاک
۵	۴	۳	۲	۱	
خیلی متراکم	متراکم	متوسط	شل	خیلی شل	
۱۰۰	۸۵	۶۵	۳۵	۱۵	درصد تراکم نسبی (درصد)
۰/۵	۰/۵۶	۰/۶۴	۰/۷۶	۰/۸۴	نسبت تخلخل
۱۹/۰	۱۸/۳	۱۷/۴	۱۶/۲	۱۵/۵	وزن مخصوص (کیلو نیوتن بر متر مکعب)
۸۰	۶۵	۵۰	۲۵	۱۰	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)
۴۵	۴۱	۳۶	۳۰	۲۸	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)

۲-۳- مشخصات انکرهای مارپیچ

صفحات با قطر ۴۰-۶۰ سانتی متر و ۵۰-۶۰ سانتی متر به ترتیب ۵۷ و ۷۳ میلی متر فرض شد. شفت و صفحات مارپیچ به صورت الاستیک فرض شدند. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آنها بترتیب ۲۰۰ گیگا پاسکال و ۰/۳ فرض شدند. شایان ذکر است که برای شفت و صفحات بترتیب از المانهای میله و لاینر (Itasca Consulting Group 2017) استفاده شد. مشخصات اندرکنشی المانهای میله و لاینر با خاک براساس راهنمای نرم افزار FLAC3D تعیین شد.

در مطالعه حاضر، پنج قطر (D) ۶۰-۲۰ سانتی متر برای صفحات مارپیچ در نظر گرفته شده است. همچنین فاصله بین صفحات (S) یک تا هشت برابر قطر صفحات می تواند تغییر کند ($n=1-8, S=nD$). شکل ۴ نمای کلی از انکرهای مارپیچ تک صفحه، دو صفحه و سه صفحه را نشان می دهد. مطابق با راهنمای Chance (2004)، ضخامت صفحه های مارپیچ (t) با قطر ۴۰-۶۰ سانتی متر و ۵۰-۶۰ سانتی متر به ترتیب ۱۳ و ۱۹ میلی متر فرض شد. همچنین بعد شفت (الف) انکر برای



شکل ۴. نمای کلی از انکرهای مارپیچ مورد استفاده در مطالعه عددی حاضر

۳-۳- مطالعه پارامتری

مختلف در این مطالعه پارامتری را نشان می دهد. مشخصات مربوط به آنالیزهای مرجع پررنگ شده است. شایان ذکر است که مطالعه پارامتری جدول ۲ برای انکرهای تک، دو و سه صفحه انجام شده است.

به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف شامل نوع خاک، سربار، چسبندگی خاک، قطر و فاصله صفحات بر ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ تک، دو و سه صفحه، یک مطالعه پارامتری مبسوط با ۶۵ آنالیز انجام شد. جدول ۲ محدوده پارامترهای

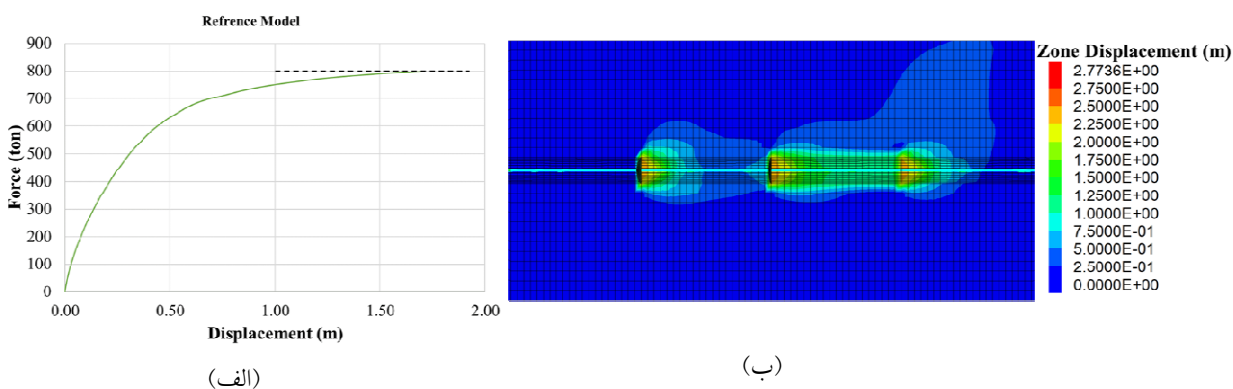
جدول ۲. محدوده پارامترهای مختلف در مطالعه پارامتری

۵ و ۴، ۳، ۲، ۱	نوع خاک
۳۴۵ و ۲۸۵، ۲۳۰، ۱۷۵، ۱۲۵	سربار (کیلوپاسکال)
صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰	چسبندگی خاک (کیلوپاسکال)
۶۰ و ۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰	قطر صفحه ماریپیچ (سانتی متر)
۸ و ۷، ۶، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱	نسبت فاصله صفحات به قطر صفحات ماریپیچ

۳-۴- روش انجام آنالیز عددی

نمودار نیرو-جابجایی ادامه می‌یابد. شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی و کانتور جابجایی کل در انتهای آنالیز برای مدل مرجع سه صفحه‌ای را نشان می‌دهد. مجانب نمودار نیرو-جابجایی (در اینجا حدود ۸۰۰ تن) را می‌توان به عنوان ظرفیت بیرون‌کشش (ظرفیت باربری) انکر در نظر گرفت.

شبیه‌سازی عددی عملیات کشش انکرهای ماریپیچ در سه گام انجام می‌شود: (۱) ابتدا سربار به سطح بالایی مدل اعمال می‌گردد و تنش‌های اولیه در بلوک خاک تولید می‌شود. (۲) انکر ماریپیچ در بلوک خاک فعال می‌شود. (۳) نیروی کششی به صورت مرحله‌ای به سر انکر اعمال می‌شود. عملیات کشش انکر تا مجانب شدن



شکل ۵. مدل مرجع سه صفحه‌ای: (الف) نمودار نیرو-جابجایی (ب) کانتور جابجایی کل در انتهای آنالیز

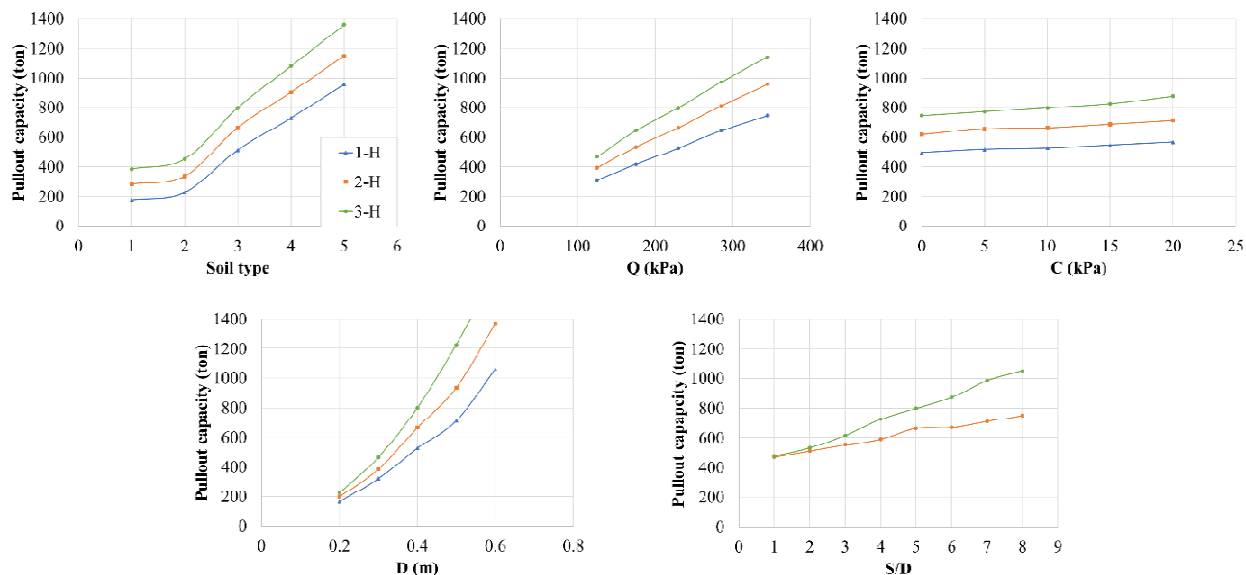
۴- بحث و نتایج

۱۳ درصد و انکرهای سه صفحه‌ای ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد تاثیر چسبندگی خاک بر روی ظرفیت باربری انکرهای ماریپیچ با افزایش تعداد صفحات افزایش می‌یابد. با افزایش قطر صفحات (D)، ظرفیت باربری انکرهای ماریپیچ افزایش می‌یابد. ظرفیت انکرهای ماریپیچ دو و سه صفحه‌ای در حالتی که نسبت فاصله بین صفحه‌های ماریپیچ به قطر صفحه‌های ماریپیچ (نسبت S به D) یک تا دو است، تقریباً برابر است. با افزایش S/D به ۳ و مقادیر بیشتر، ظرفیت باربری انکرهای سه صفحه‌ای از دو صفحه بزرگتر می‌شود.

شکل ۶ تغییرات ظرفیت بیرون‌کشش (ظرفیت باربری) انکرهای ماریپیچ تک (1-H)، دو (2-H) و سه صفحه (3-H) بر حسب پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ظرفیت باربری انکرهای ماریپیچ با افزایش تراکم خاک افزایش می‌یابد. نرخ این افزایش با تغییر نوع خاک از ۲ به ۳ شدت افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار سربار (Q)، ظرفیت بیرون‌کشش انکرها به طور پیوسته افزایش می‌یابد. با افزایش چسبندگی خاک (c) از صفر تا ۲۰ کیلوپاسکال، ظرفیت باربری انکرهای تک صفحه‌ای ۱۲ درصد، انکرهای دو صفحه‌ای

و شفت) و سه صفحه‌ای (صفحه اول، صفحه دوم و صفحه سوم) در انتهای کشش بر حسب S/D را نشان می‌دهد. اعداد داخل پراتز درصد سهم هر جز را نشان می‌دهند. در مطالعات گذشته کمتر سهم باربری صفحات مورد توجه قرار گرفته است.

هنگامی که یک انکر ماریپچ تحت کشش قرار می‌گیرد، نیروی کششی اعمال شده بین اجزای آن شامل صفحات (مقاومت پسیو صفحات با خاک) و شفت (نیروی اصطکاکی جداره شفت با خاک) توزیع می‌شود. جدول ۳ و جدول ۴ بترتیب سهم باربری هر جز از انکرهای ماریپچ دو صفحه‌ای (صفحه اول، صفحه دوم

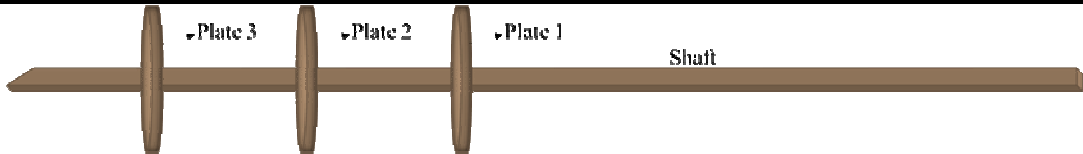


شکل ۶. تغییرات ظرفیت باربری انکرهای ماریپچ تک، دو و سه صفحه‌ای با تغییر پارامترهای مختلف

جدول ۳. سهم باربری اجزای ماریپچ دو صفحه‌ای برای S/D های مختلف

S/D	Plate 2 (ton)	Plate 1 (ton)	Shaft (ton)	Total force (ton)
8	229 (30%)	298 (40%)	224 (30%)	751
7	211 (30%)	285 (40%)	215 (30%)	711
6	204 (30%)	282 (42%)	185 (28%)	671
5	188 (28%)	285 (43%)	192 (29%)	665
4	134 (23%)	297 (50%)	160 (27%)	591
3	99 (18%)	301 (55%)	150 (27%)	550
2	72 (14%)	313 (61%)	125 (25%)	510
1	61 (13%)	293 (62%)	117 (25%)	471

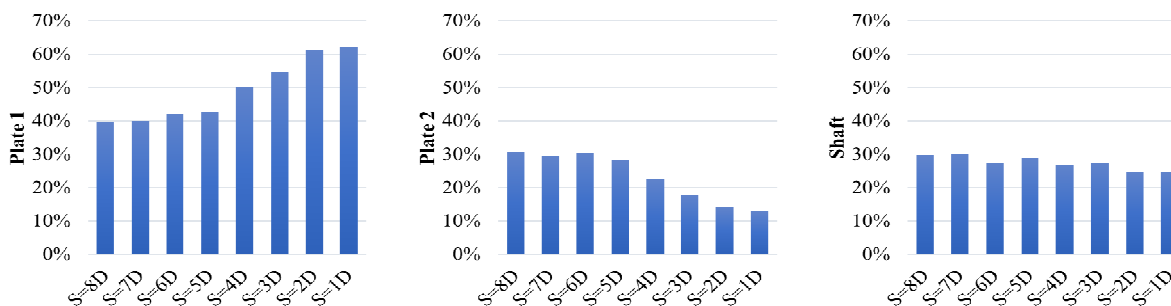
جدول ۴. سهم باربری اجزای انکرهای ماریچ سه صفحه‌ای برای S/D های مختلف



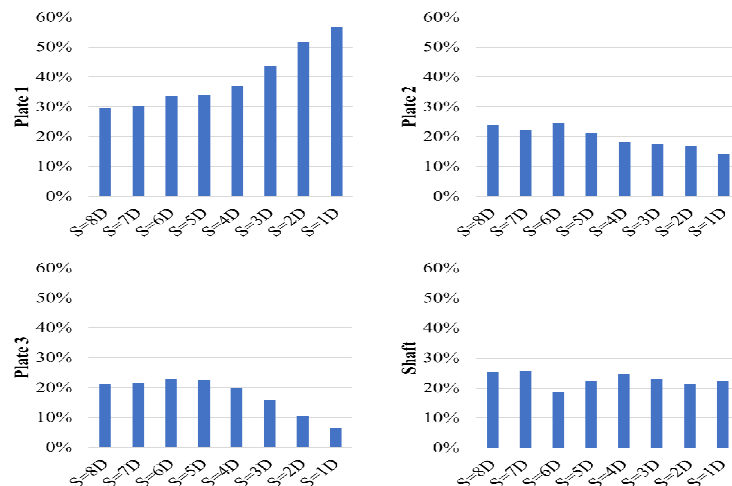
S/D	Plate 3 (ton)	Plate 2 (ton)	Plate 1 (ton)	Shaft (ton)	Total Force (ton)
8	223 (21%)	249 (24%)	311 (30%)	267 (25%)	1050
7	213 (22%)	220 (22%)	300 (30%)	253 (26%)	986
6	200 (23%)	213 (24%)	295 (34%)	164 (19%)	872
5	180 (23%)	170 (21%)	272 (34%)	177 (22%)	799
4	145 (20%)	132 (18%)	269 (37%)	179 (25%)	725
3	97 (16%)	109 (17%)	270 (44%)	140 (23%)	616
2	56 (11%)	90 (17%)	274 (51%)	111 (21%)	531
1	31 (6%)	68 (14%)	272 (57%)	106 (23%)	477

تغییر فاز می‌دهد. در این نوع مکانیزم گسیختگی، صفحه اول به‌مراه مقاومت اصطکاکی بلوک خاک استوانه‌ای گسیخته‌شده بیشترین تاثیر در ظرفیت باربری انکر را دارند. بنابراین بدیهی است که سهم باربری صفحه اول نسبت به سایر صفحات افزایش یابد. کانتورهای جابجایی کل برای انکرهای ماریچ دوصفحه و سه‌صفحه در شکل‌های ۹ و ۱۰ این نتیجه را تایید می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود، برای $S/D=2,4$ ، نواحی گسیختگی تشکیل شده در اطراف صفحات کاملاً در یکدیگر فرورفته‌اند که نشان‌دهنده نوع مکانیزم گسیختگی بلوکی استوانه‌ای است. برای $S/D=8$ ، این نواحی گسیختگی کاملاً از یکدیگر مجزا هستند که نشان‌دهنده نوع مکانیزم گسیختگی صفحه منفرد است. برای $S/D=5$ ، همانطور که مشاهده می‌شود، نواحی گسیختگی اطراف صفحات در حال جدایی از یکدیگر هستند. بنابراین $S/D=5$ را می‌توان مرز تغییر نوع مکانیزم گسیختگی از صفحه منفرد به بلوکی استوانه‌ای یا همان $(S/D)_{cr}$ دانست.

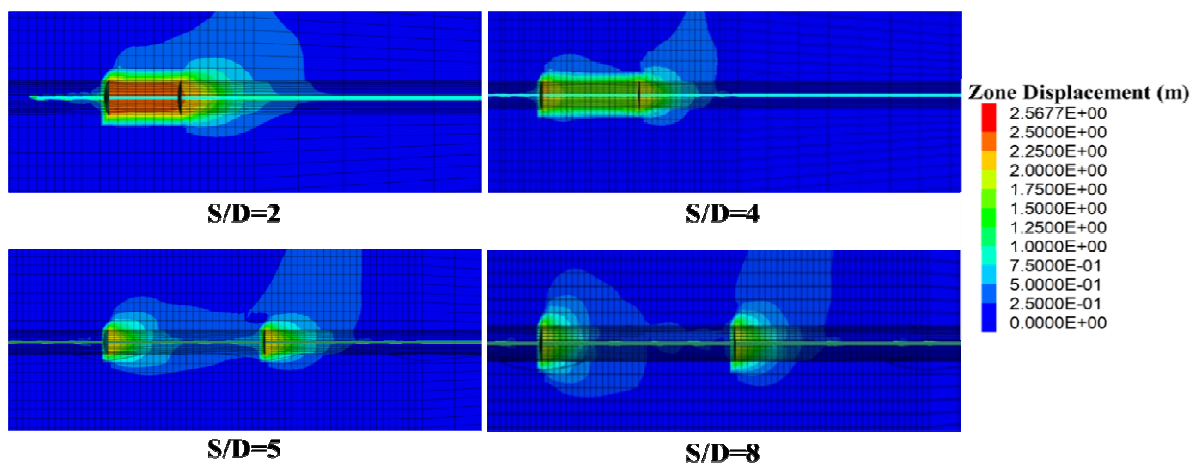
شکل ۷ و شکل ۸ بترتیب سهم باربری اجزای انکرهای ماریچ دوصفحه و سه‌صفحه برحسب S/D را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سهم باربری شفت با افزایش فاصله بین صفحات افزایش می‌یابد. در مجموع سهم باربری شفت در انکرهای ماریچ دوصفحه و سه‌صفحه کمتر از ۳۰ درصد است که با افزایش تعداد صفحات کاهش می‌یابد. علاوه بر این، سهم باربری صفحه اول از $S/D=8$ تا حدود $S/D=5$ ثابت می‌ماند. با کاهش بیشتر S/D، سهم باربری صفحه اول با نرخ قابل توجهی افزایش و سهم باربری سایر صفحات با نرخ قابل توجهی کاهش می‌یابد. این را می‌توان به تغییر نوع مکانیزم گسیختگی انکرهای چندصفحه از صفحه منفرد به برش استوانه‌ای دانست. برای $S/D=6-8$ ، مکانیزم گسیختگی غالب برای انکرهای ماریچ چندصفحه از نوع صفحه منفرد است. در این نوع مکانیزم گسیختگی، صفحات ماریچ به صورت پی‌های مجزا عمل می‌کنند و نیروی کششی انکر به صورت مساوی بین آنها تقسیم می‌شود. اما برای $S/D < 5$ مکانیزم گسیختگی غالب به برشی استوانه‌ای



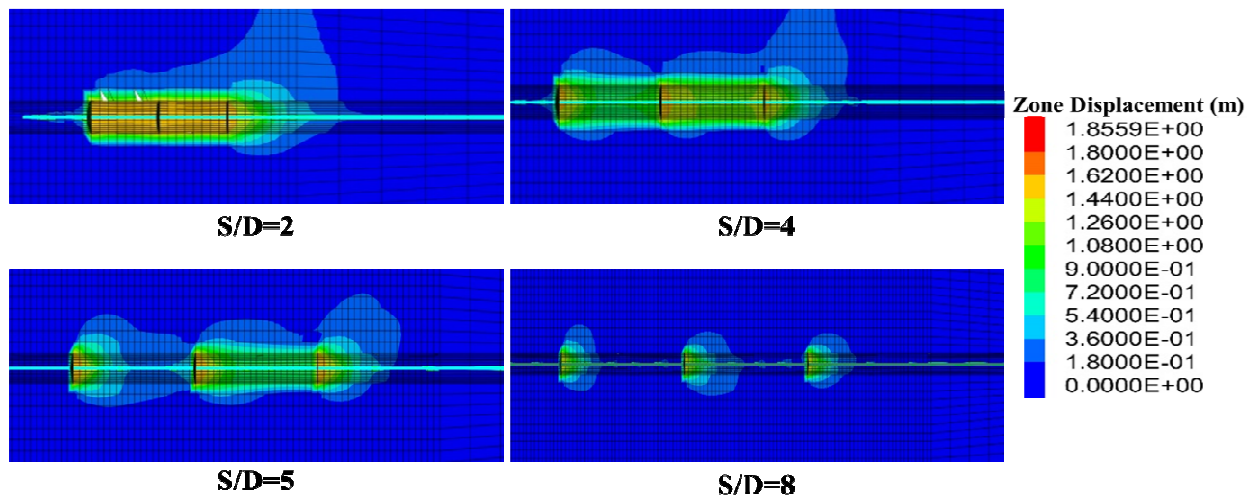
شکل ۷. سهم باربری اجزای انکرهای ماریچ دو صفحه‌ای برای S/D های متفاوت در انتهای تست کشش



شکل ۸. سهم باربری اجزای انکرهاى مارپیچ سه صفحه‌ای برای S/D های متفاوت در انتهای تست کشش



شکل ۹. کانتورهای جابجایی کل برای انکرهاى دو صفحه‌ای در انتهای تست کشش



شکل ۱۰. کانتورهای جابجایی کل برای انکرهاى سه صفحه‌ای در انتهای تست کشش

۵- نتیجه گیری

است که نشان‌دهنده وقوع مکانیزم گسیختگی صفحه منفرد است. اما با کاهش این نسبت به کمتر از ۵ ($S/D < 5$)، سهم باربری صفحه اول افزایش و سهم باربری سایر صفحات کاهش می‌یابد. این را می‌توان به تغییر نوع مکانیزم گسیختگی از صفحه منفرد به برشی استوانه‌ای نسبت داد. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که نسبت بحرانی فاصله صفحات به قطر $(S/D)_{cr} = 5$ است. از کانتورهای جابجایی کل در انتهای تست کشش نتیجه می‌شود که برای $S/D > 5$ ، نواحی گسیختگی در اطراف صفحات کاملاً از یکدیگر جدا می‌شوند (مکانیزم گسیختگی صفحه منفرد). اما برای $S/D < 5$ ، این نواحی کاملاً در یکدیگر تداخل پیدا می‌کنند (مکانیزم گسیختگی برشی استوانه‌ای). برای $S/D = 5$ ، نواحی گسیختگی در اطراف صفحات در حال جدا شدن از یکدیگر هستند (شرایط بحرانی). این نتایج با سهم باربری صفحات در انتهای تست کشش سازگار است.

مطالعه عددی حاضر با استفاده از یک روش مدل‌سازی سه‌بعدی و نرم‌افزار FLAC3D به مطالعه عددی ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ چندصفحه پرداخته است. بدین منظور، ابتدا روش مدل‌سازی عددی با انجام یک تست صحت‌سنجی تایید شد. سپس یک مطالعه پارامتری با ۶۵ آنالیز انجام و تاثیر پارامترهای مختلف شامل تراکم و چسبندگی خاک، سربار، قطر و فاصله صفحات مارپیچ بر ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ ارزیابی شد. همچنین سهم باربری اجزای انکر شامل صفحات و شفت مورد مطالعه قرار گرفت که کمتر در تحقیقات گذشته مورد توجه قرار گرفته است. نتایج مهم مطالعه حاضر عبارتند از: -ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ با افزایش تراکم خاک افزایش می‌یابد. همچنین افزایش سربار و قطر صفحه‌های مارپیچ موجب افزایش ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ می‌شود. -در مجموع، چسبندگی خاک تاثیر زیادی بر ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ ندارد. تاثیر چسبندگی خاک بر ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ با افزایش تعداد صفحات افزایش می‌یابد. -سهم باربری شفت در انکرهای مارپیچ چندصفحه کمتر از ۳۰٪ است که با افزایش تعداد و فاصله صفحات کاهش می‌یابد. -برای نسبت‌های فاصله صفحات به قطر بزرگتر از ۵ ($S/D > 5$) در انکرهای مارپیچ چندصفحه، سهم باربری صفحات تقریباً برابر

۶-مراجع

-Itasca Consulting Group, I., (2017), FLAC3D 6.0 user manual.

-Kwon, O., J. Lee, G. Kim, I. Kim and J. Lee, (2019), "Investigation of pullout load capacity for helical anchors subjected to inclined loading conditions using coupled Eulerian-Lagrangian analyses", Computers and Geotechnics 111, pp. 66-75.

-Mahmoodi Mehrizi, M. E., Y. Daghigh and J. Nazari Afshar, (2014), "A review on using Helical anchors in supporting excavations",

-Abdrabbo, F. and A. El wakili, (2016), "Laterally loaded helical piles in sand", Alexandria Engineering Journal 55(4), pp. 3239-3245.

-Chance, (2004), "Helical pier foundation system", USA, Chance company.

-Harnish, J. and M. H. El Nagggar, (2017), "Large-diameter helical pile capacity-torque correlations", Canadian Geotechnical Journal 54(7), pp. 968-986.

-Rawat, S. and A. K. Gupta, (2017), "Numerical modelling of pullout of helical soil nail", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 9(4), pp. 648-658.

-Sakr, M., (2009), "Performance of helical piles in oil sand", Canadian Geotechnical Journal 46(9), pp.1046-1061.

-Tokhi, H., G. Ren and J. Li, (2017), "Laboratory pullout resistance of a new screw soil nail in residual soil", 55(5), pp. 609-619.

Second National Conference of Construction and Investigation in Construction Project, Semnan. (in persian)

-Papadopoulou, K., H. Saroglou and V., Papadopoulos, (2014), "Finite element analyses and experimental investigation of helical micropiles." Geotechnical and Geological Engineering 32(4), pp. 949-963.

-Perez, Z. A. and J. A. Sciavon, (2018), "Numerical and experimental study on influence of installation effects on behaviour of helical anchors in very dense sand", 55.

Numerical Study of Pullout Capacity of Helical Multiple Anchors for Supporting Excavations

Mohammad Abdoli, M.Sc. Grad, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Hamid Mehrnahad, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Mohammad Hazeghian, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

E-mail: hmehrnahad@yazd.ac.ir

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT

Today there are numeral methods for supporting an excavation. Using of helical multiple anchors as excavation support has speared recently. Because of wide range of applications of helical anchors, a massive number of experimental, numerical, and field studies have been carried out. This study works on the pullout capacity of helical multiple anchors by using FLAC 3D software. First, a verification test is carried out in order to confirm the method of simulation. Then, with the help of an extensive parametric study, the effect of different parameters on pullout capacity is observed. This study indicates that sharp growth in loading capacity is observed due to an increase in density of soil and diameter of helical plates. In addition, the results show that changes in the cohesion of soil have a few effects on the loading capacity of helical anchors. Moreover, the share of loading on the plates keeps remains if the space between plates is five times of helical plate diameter and more. In this situation, the failure mechanism is individual plate. Nevertheless, if the space between plates is less than five times of helical plate diameter, the share of loading on the first helical plate (near to excavation) goes up, but the share of loading on the rest helical plates drops dramatically. In this situation, cylindrical shear is the main failure mechanism. Therefore, the current study results demonstrate that the critical space between helical plates is five times of helical plate's diameter.

Keywords: Helical Multiple Anchors, Loading Capacity (Pullout), Numerical Modeling, FLAC 3D Software