

## مطالعه عددی تاثیر دست خوردگی خاک و زاویه انکر بر ظرفیت بیرون کشش

### انکرهای مارپیچ 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: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

صفحه ۱۳۰-۱۱۹

#### چکیده

در جهان امروزی، جاده‌ها به عنوان شریان‌های اصلی جامعه جهانی در نظر گرفته می‌شوند. یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای ساخت این شریان‌ها، پایدارسازی شیروانی‌های اطراف جاده‌ها است. استفاده از انکرهای مارپیچ چند صفحه‌ای در پایدارسازی شیروانی‌های اطراف جاده، یکی از شیوه‌هایی است که اخیراً مورد استفاده بسیاری از مهندسين راه و ژئوتکنیک قرار گرفته است. افزایش روز افزون استفاده از انکرهای مارپیچ موجب مطالعه‌های متعددی در زمینه‌های آزمایشگاهی، عددی و میدانی شده است. از این رو، این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D به بررسی عددی سه‌بعدی ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ چندصفحه تحت زاویه‌های نصب متفاوت در خاک ماسه‌ای می‌پردازد. همچنین در مطالعه حاضر تاثیر دست‌خوردگی خاک، که هنگام نصب انکرهای مارپیچ چند صفحه‌ای در خاک ایجاد می‌شود، بر روی ظرفیت باربری بیرون‌کشش این انکرها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا یک آزمون صحت‌سنجی برای تایید شیوه مدل‌سازی انجام می‌شود. سپس با انجام یک مطالعه پارامتری، تاثیر زاویه‌های نصب مختلف و همچنین دست‌خوردگی خاک بر ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ پرداخته می‌شود. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که بیشترین ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ تحت زاویه‌های ۵ و ۱۰ درجه حاصل می‌گردد. علاوه بر این، با اعمال و بررسی دست‌خوردگی خاک ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ به طور فزاینده‌ای کاهش یافت که میزان آن با توجه به تعداد صفحات مارپیچ نصب شده بر روی انکر مارپیچ و همچنین نوع خاک متغیر است.

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

دست‌خوردگی خاک

#### ۱- مقدمه

انکرهای مارپیچ جز جدیدترین و محبوب‌ترین روش‌ها است. نصب سریع و راحت و بهره‌برداری فوری پس از نصب، از

در سال‌های اخیر به منظور پایدارسازی گودهای ساختمانی و یا شیروانی‌ها روش‌های متعددی به وجود آمده است که در این میان

صفحه ماریپیج است و بیشترین دست‌خوردگی و تغییر پارامترهای مقاومتی خاک در این نواحی مشاهده می‌شود و ناحیه دوم دست‌خوردگی به اندازه ۰/۲۷ برابر قطر صفحه ماریپیج از لبه صفحه در نظر گرفته می‌شود که تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک در این ناحیه کمتر است.

تاکنون مطالعات عددی، آزمایشگاهی و میدانی بسیاری در حوزه انکرها و شمع‌های ماریپیج صورت پذیرفته است که در این میان می‌توان به مطالعات گرکانی و ملکی ( Garakani and Maleki 2019)، پرز و شیاون ( Perez and Sciavon 2018)، تخی و همکارانش ( Tokhi, H, Ren and Li 2018, Tokhi, Hamayon 2016, Tokhi, H, Ren and Wang, Merifield and Li 2016)، ونگ و همکارانش ( Wang, Merifield and Spagnoli and Gaudin 2013)، اسپگنولی و همکارانش ( Spagnoli and de Hollanda Cavalanti Tusha 2020)، شارما و گونر ( Sharma and Guner 2020)، هائو و همکارانش ( Hao, Wang, O'Loughlin and Guadin 2019) سرفونتین و همکارانش ( Cerfontaine, Knappett, Brown and Bradshaw 2019)، کلمنس و همکارانش و همچنین (Garcia 2019, Clemence and Iutenegger 2015) و ناگای و همکارانش ( Nagai, Tsuchiya and Shimada 2018) اشاره کرد. در ادامه چند مورد از این مطالعات بررسی می‌شود. گرکانی و ملکی ( Garakani and Maleki 2019) به کمک یک مدل‌سازی عددی سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS دست‌خوردگی خاک و ظرفیت باربری شمع ماریپیج را مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه مقایسه‌ای بین روابط تحلیلی، نتایج میدانی و آزمایشگاهی و همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی بود. در این مطالعه مشخص شد که با افزایش عمق قرارگیری صفحات ماریپیج، ظرفیت باربری شمع‌ها افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که افزایش قطر شفت شمع ماریپیج منجر به افزایش ظرفیت باربری شمع می‌شود. مطالعه پرز و شیاون ( Perez and Sciavon 2018) به صورت آزمایشگاهی - عددی انجام شد. در این مطالعه ابتدا یک نمونه کوچک شمع ماریپیج تک صفحه‌ای در داخل خاک قرار گرفت و با ایجاد شتاب مورد نیاز به کمک آزمایش سانتیفریوژ، ابعاد شمع و مدل‌سازی به حالت واقعی نزدیک‌تر شد. سپس نحوه

اصلی‌ترین دلایل محبوبیت و گسترش استفاده از انکرهای ماریپیج در راستای پایدارسازی گودها و شیروانی‌ها است. عدم استفاده از سیمان و یا سایر مواد افزودنی که خود سبب آلودگی خاک می‌شود، یکی از کلیدی‌ترین دلایل رشد کاربرد این انکرها در جهان است زیرا قابلیت نصب این انکرها در هر شرایط دمایی و در هر نوع خاکی با سطح آب زیرزمینی متفاوت را به وجود می‌آورد. انکر ماریپیج شامل یک شفت فولادی است که تعدادی صفحه ماریپیج در قطرها، ضخامت‌ها و فواصل متعادل بر روی آن تعبیه می‌شود. از انکرهای ماریپیج تحت بارهای کششی، فشاری و دینامیکی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان این المان‌ها را تحت عنوان شمع، ریزشمع و میخ ماریپیج مورد استفاده قرار داد.

انکرهای ماریپیج نیز همانند سیستم انکراژ تزریقی و همچنین میخ‌گذاری، قابلیت نصب در زاویه‌های مختلف را دارا هستند. در این میان همانطور که در انکراژ تزریقی و میخ‌گذاری، تغییر در زاویه نصب سبب ایجاد تغییرات بعضاً چشمگیری در ظرفیت باربری این سیستم‌ها می‌شود، نصب انکرهای ماریپیج در زوایای مختلف نیز سبب تغییر در ظرفیت باربری انکرها می‌شود. از سوی دیگر، طی عملیات نصب انکر ماریپیج، در خاک‌های اطراف انکر، دست‌خوردگی خاک ناشی از فرو رفتن شفت و همچنین پیچش صفحه‌های ماریپیج در خاک ایجاد می‌شود. دست‌خوردگی خاک که به اثر نصب نیز شهرت دارد حاصل اعمال نیروی فشاری و دورانی به طور همزمان برای قرار دادن انکر ماریپیج در عمق و محل مناسب است. پس از نصب انکر ماریپیج، پارامترهای مقاومتی خاک دست‌خورده دچار تغییر شده و کاهش می‌یابد. در واقع دست‌خوردگی خاک سبب افزایش تخلخل می‌شود که این موضوع منجر به کاهش پارامترهایی مانند چسبندگی، وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی می‌شود و به طور کلی مقاومت خاک ناحیه دست‌خورده کمتر از نواحی دست‌نخورده خواهد بود. در مطالعات گذشته ابعاد متفاوتی برای ناحیه دست‌خورده مطرح شده است که در این میان می‌توان به مطالعه گرکانی و ملکی ( Garakani and Maleki 2019) اشاره کرد که ابعاد ناحیه دست‌خوردگی را دو برابر قطر بزرگترین صفحه ماریپیج در نظر گرفتند. پرز و شیاون ( Perez and Sciavon 2018) دو ناحیه دست‌خوردگی برای شمع ماریپیج تعریف کردند. ابعاد ناحیه اول دست‌خوردگی به اندازه قطر

متراکم تحت دو حالت همگن و غیر همگن مورد بررسی قرار دادند. هدف این مطالعه بررسی تاثیر روش نصب شمع ماریپیج بر روی عملکرد آن بود. دست‌خوردگی خاک در هنگام نصب و پس از اعمال نیروی بیرون‌کشش در این مطالعه کاملاً مشهود بود. این مطالعه منجر به این نتیجه شد که تاثیر روش نصب بر روی ظرفیت بیرون‌کشش شمع ماریپیج قابل چشم‌پوشی نیست. همچنین مشخص شد با تغییر فشار خاک در نوک شمع، عملکرد شمع ماریپیج به طور چشمگیری تغییر خواهد کرد. مطالعه حاضر به کمک یک روش مدل‌سازی عددی سه‌بعدی به ارزیابی ظرفیت باربری (ظرفیت کششی) انکرهای ماریپیج می‌پردازد. بدین منظور، یک مطالعه پارامتری گسترده بر روی زاویه نصب انکرهای ماریپیج و همچنین دست‌خوردگی خاک بر اثر نصب انکرها انجام می‌گیرد تا تاثیر این پارامترها بر مقدار ظرفیت باربری انکرهای ماریپیج ارزیابی شود. در تحقیقات گذشته تاثیر زاویه نصب انکر ماریپیج بر روی ظرفیت باربری مورد مطالعه قرار نگرفته است و همچنین مطالعات بسیار محدودی در زمینه دست‌خوردگی خاک صورت پذیرفته است که در این میان نیاز به بسط مطالعات در این زمینه بسیار محسوس است.

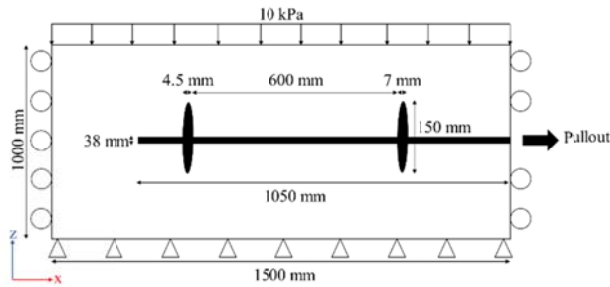
دست‌خوردگی خاک در هنگام نصب شمع ماریپیج بررسی شد و با عکس‌برداری میکروتوموگرافیک، که به کمک اشعه ایکس انجام می‌گیرد، ناحیه دقیق دست‌خوردگی خاک مشخص شد. ناحیه دست‌خوردگی اول که بیشترین میزان دست‌خوردگی را دارا است، دقیقاً به اندازه قطر صفحه ماریپیج است و ناحیه دست‌خوردگی دوم که بین ناحیه دست‌نخورده و ناحیه دست‌خورده اول قرار دارد به اندازه  $0.27$  قطر صفحه ماریپیج است و به صورت یک حلقه با ضخامت  $0.27$  دقیقاً در محیط محدوده اول قرار می‌گیرد. بر اساس مطالعات دقیق صورت گرفته مقاومت خاک در نواحی دست‌خورده کم‌تر از نواحی دست‌نخورده است، همچنین خاک دست‌خورده ناحیه اول نسبت به ناحیه دوم دارای مقاومت و سختی کمتری است. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D یک مدل‌سازی عددی انجام پذیرفت. 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. ناگای و همکارانش (Nagai, Tsuchiya and Shimada 2018) به کمک یک مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت باربری یک شمع ماریپیج تک صفحه‌ای را در دو نوع خاک ماسه‌ای سست و

## ۲- روش تحقیق

پاسکال و ضریب پواسون  $0.3$  فرض شدند. برای مدل‌سازی عددی سه بعدی شفت و صفحات بت‌رتیب از المان‌های میله و لاینر (Itasca Consulting Group 2017) استفاده شد. مشخصات اندرکنش المان‌های میله و لاینر با خاک طبق راهنمای نرم‌افزار FLAC 3D مشخص شد. در ادامه روند شبیه‌سازی عددی توضیح داده می‌شود: ابتدا تنش‌های اولیه در بلوک خاک ایجاد شد. سپس سربار به بالای بلوک خاک اعمال شد. بعد از مطمئن شدن از به تعادل رسیدن نمونه خاک، میخ ماریپیج به صورت مرحله‌ای تحت کشش قرار گرفت. در هر مرحله، مقدار ۱ کیلونیوتن نیرو به سر میخ ماریپیج اعمال و به مدل اجازه داده شد تا دوباره به تعادل برسد. تا زمانی که تغییر مکان ۵۰ میلی‌متر حاصل شود مراحل اعمال بارگذاری ادامه یافت. شکل ۱ (ب) منحنی‌های نیرو-تغییر مکان عددی و تجربی را مقایسه می‌کند. همانطور که مشهود است، مطابقت بسیار زیادی بین آنها

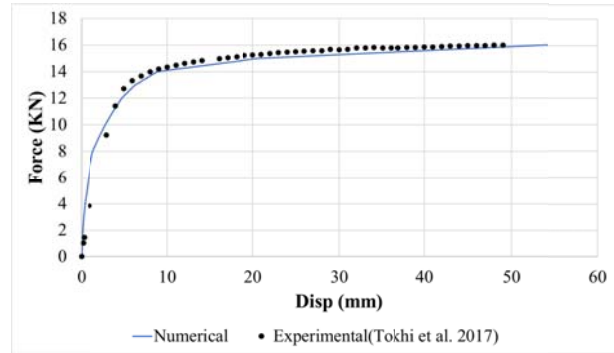
برای صحت‌سنجی روش مدل‌سازی عددی و روش تحقیق، شبیه‌سازی یک آزمون آزمایشگاهی شامل کشش یک میخ ماریپیج در صفحه که توسط تخی و همکارانش (Tokhi, H, Ren and Li 2018) انجام شده است، در دستور کار قرار گرفت که در شکل ۱ (الف) جزئیات مدل صحت‌سنجی و شرایط مرزی قابل مشاهده است. برای مدل‌سازی عددی، تمامی مشخصات مدل شامل هندسه و مشخصات میخ ماریپیج، ابعاد جعبه آزمایش، پارامترهای خاک و همچنین سربار اعمال شده طبق مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری خاک که مدل‌سازی بر اساس آن انجام شده است بر اساس مدل رفتاری موهر کولمب در نظر گرفته شد. پارامترهای خاک شامل وزن مخصوص، زاویه اصطکاک، چسبندگی و مدول الاستیسیته بت‌رتیب  $17/4$  کیلونیوتن بر متر مکعب،  $33/6$  درجه، صفر و  $50$  مگاپاسکال فرض شدند. برای مدل‌سازی عددی، شفت و صفحات ماریپیج فولادی الاستیک و با مدول الاستیسیته  $200$  گیگا

استفاده شده است.



الف

وجود دارد که خود تایید کننده صحت روش مدل سازی و نرم افزار



ب

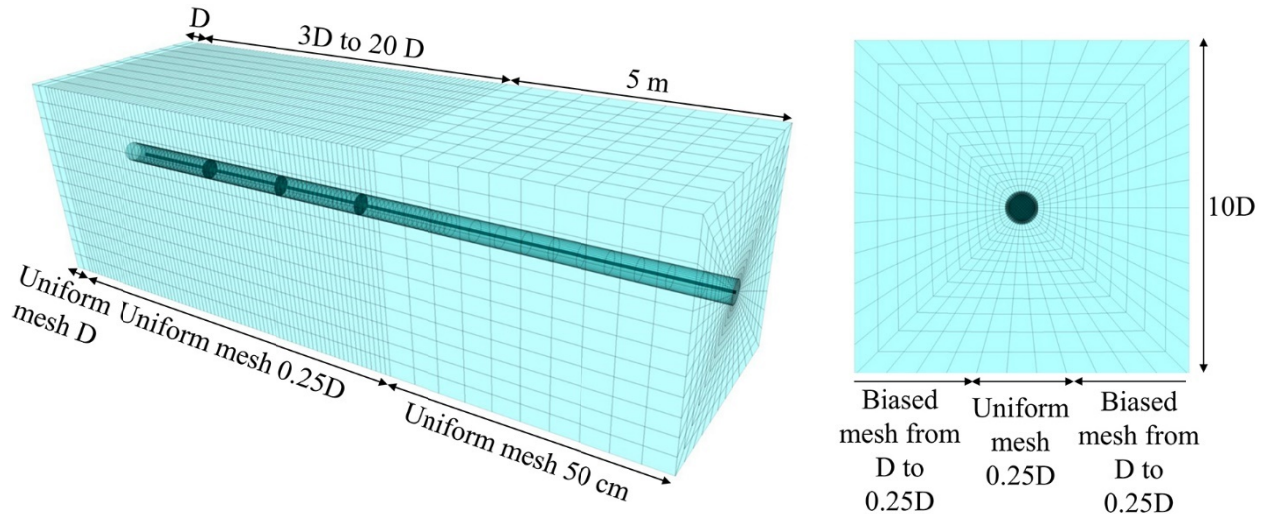
شکل ۱. الف) مشخصات مدل صحت سنجی و شرایط مرزی، ب) مقایسه منحنی های نیرو-تغییر مکان عددی و آزمایشگاهی

### ۳- توصیف مساله و فرضیات مدل سازی عددی

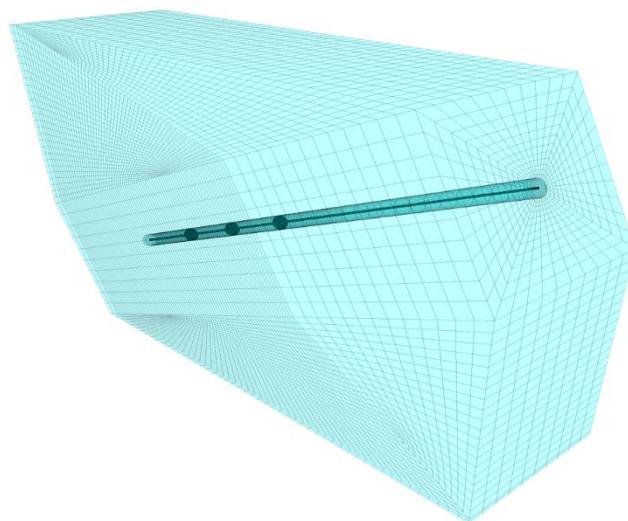
#### ۳-۱- هندسه مدل و مشخصات خاک

رفتاری موهرکولمب برای خاک در نظر گرفته شد. مقدار زاویه اتساع خاک ( $\psi$ ) برابر با  $30^\circ - \phi$  و ضریب پواسون  $0.3$  فرض شد که زاویه اصطکاک داخلی خاک است. مقدار ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون  $K_0 = 1 - \sin \phi$  فرض شده است. مقادیر و خصوصیات خاک براساس (Ameratunga, Sivakugan and Das 2016) انتخاب شده است.

شکل ۲ ابعاد و الگوی مش بندی هندسه مدل بدون زاویه یا تحت زاویه صفر درجه را نشان می دهد. شرایط مرزی مشابه با آزمون صحت سنجی فرض شده است (شکل ۱، الف). همچنین شکل ۳ دربردارنده مدل تحت زاویه  $25^\circ$  درجه است. در مطالعه حاضر از ۴ نوع خاک ماسه ای استفاده شده است که جدول ۱ نمایانگر مشخصات آنها است. همانند مدل صحت سنجی، مدل



شکل ۲. هندسه و الگوی مش بندی مدل سه بعدی برای انکرهای مارپیچ بدون زاویه



شکل ۳. هندسه و الگوی مش‌بندی مدل سه‌بعدی برای انکر ماریپیج با زاویه ۲۵ درجه

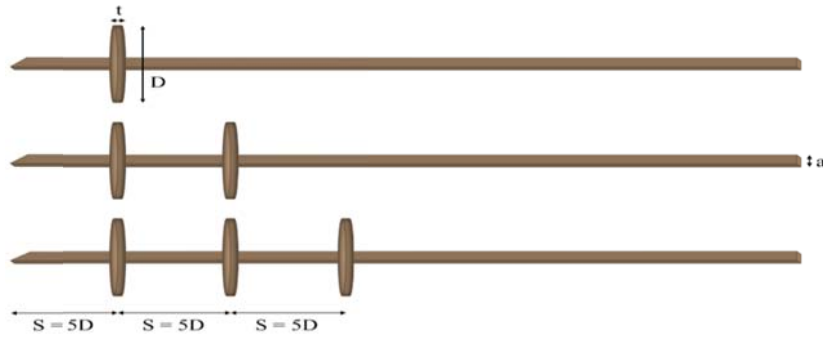
جدول ۱. مشخصات انواع خاک مورد استفاده در مطالعه حاضر

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

### ۳-۲- مشخصات انکرهای ماریپیج

الاستیک فرض شدند و مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آنها بترتیب ۲۰۰ گیگا پاسکال و ۰/۳ فرض شدند. همچنین شفت و صفحات بترتیب به کمک المان‌های میله و لاینر (Itasca Consulting Group 2017) شبیه‌سازی شدند. مشخصات اندرکنش المان‌های میله و لاینر با خاک براساس راهنمای نرم‌افزار FLAC3D تعیین شد.

در مطالعه حاضر، قطر صفحه‌های ماریپیج (D) ۴۰ سانتی‌متر فرض شده است. همچنین فاصله بین صفحات (S) پنج برابر قطر صفحات در نظر گرفته شده است (S=5D). شکل ۴ نمایانگر تصویر کلی از انکرهای ماریپیج تک‌صفحه، دو صفحه و سه صفحه است. براساس راهنمای Chance (2004)، ضخامت صفحه‌های ماریپیج (t) ۱۳ میلی‌متر و همچنین بعد شفت (الف) انکر ۵۷ میلی‌متر فرض شد. شفت و صفحات ماریپیج به صورت



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

### ۳-۳- مطالعه پارامتری

نمایانگر محدوده پارامترهای مختلف در این مطالعه پارامتری است. مطالعه پارامتری جدول ۲ برای انکرهای تک، دو و سه‌صفحه انجام پذیرفته است.

برای بررسی اثر زاویه‌های نصب مختلف و همچنین اثر نصب انکر مارپیچ، که منجر به دست‌خوردگی خاک می‌شود، بر ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ تک، دو و سه‌صفحه، یک مطالعه پارامتری گسترده با ۳۶ آنالیز انجام شد. جدول ۲

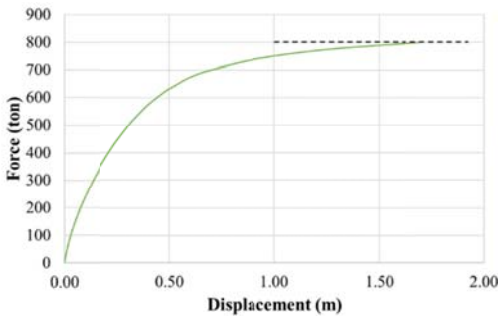
جدول ۲. محدوده پارامترهای مختلف در مطالعه پارامتری

نوع خاک	۱، ۲، ۳ و ۴
زاویه نصب ( $\theta$ )	۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵

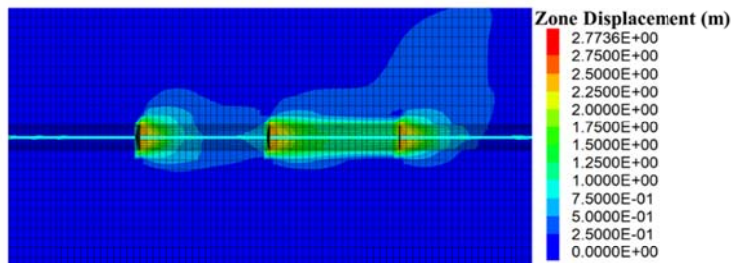
### ۳-۴- روش انجام آنالیز عددی

می‌یابد. شکل ۵ نمودار نیرو-تغییر مکان و کانتور جابجایی کل در انتهای آنالیز برای مدل سه‌صفحه‌ای بدون زاویه (زاویه نصب صفر درجه) را نشان می‌دهد. بجانب شدن نمودار نیرو-جابجایی (در اینجا حدود ۸۰۰ تن) را می‌توان بعنوان ظرفیت بیرون‌کشش (ظرفیت باربری) انکر بدون زاویه در نظر گرفت.

مدلسازی عددی عملیات کشش انکرهای مارپیچ در سه مرحله صورت می‌گیرد: (۱) مرحله اول، مرحله اعمال سربار به سطح بالایی مدل است و در ادامه تنش‌های اولیه در بلوک خاک ایجاد می‌شود. (۲) انکر مارپیچ در بلوک خاک ایجاد می‌شود. (۳) نیروی کششی به صورت مرحله‌ای به سر انکر اعمال می‌شود. عملیات کشش انکر تا بجانب شدن نمودار نیرو-تغییر مکان ادامه



(الف)



(ب)

شکل ۵. مدل سه‌صفحه‌ای بدون زاویه نصب: الف) نمودار نیرو-تغییر مکان ب) کانتور جابجایی کل در انتهای آنالیز

#### ۴- بحث و نتایج

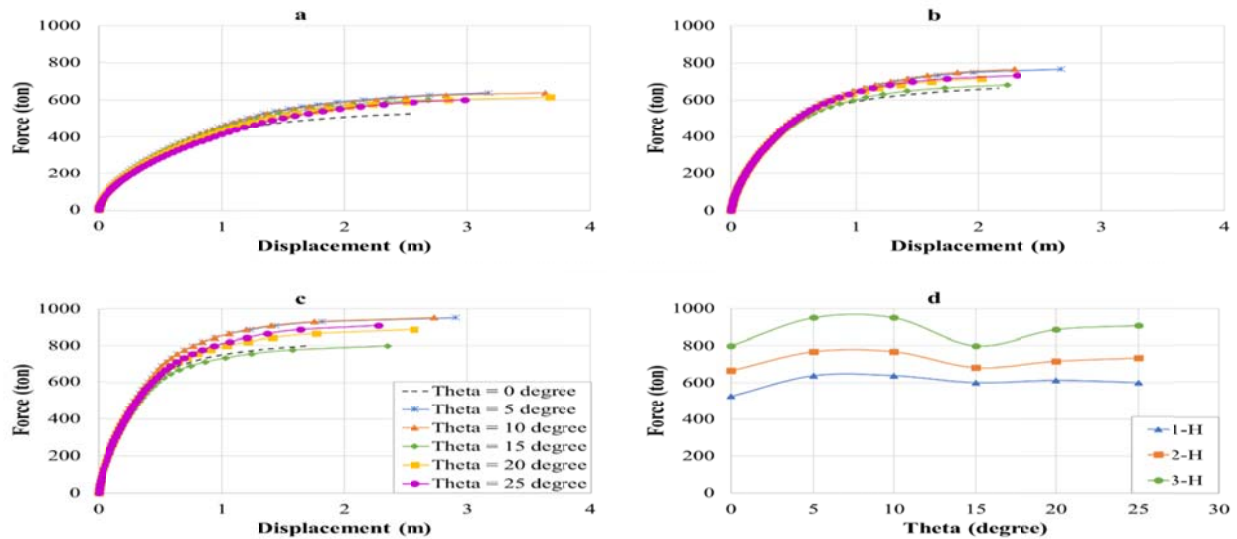
زاویه نصب در خاک قرار دارد. طبق شکل ۶ بیشترین ظرفیت بیرون‌کشش در هر سه انکر تک، دو و سه صفحه‌ای در زاویه نصب ۵ و ۱۰ درجه رخ می‌دهد و کمترین میزان ظرفیت بیرون‌کشش در زاویه ۱۵ درجه برای هر سه نوع انکر قابل مشاهده است. در انکرهای مارپیچ تک صفحه‌ای ظرفیت باربری در زاویه ۱۵ درجه، ۶ درصد کمتر از زاویه ۵ و ۱۰ درجه است. در حالی که، در انکرهای دو صفحه‌ای این مقدار به ۱۱ درصد و در انکرهای مارپیچ سه صفحه‌ای اختلاف بیشترین و کمترین ظرفیت باربری به ۱۶ درصد می‌رسد. بنابراین، پیشبینی می‌شود که در انکرهای مارپیچ با تعداد صفحه‌های بیشتر از سه، کمترین ظرفیت بیرون‌کشش در زاویه نصب ۱۵ درجه رخ دهد و همچنین می‌توان انتظار داشت که بیشترین ظرفیت باربری در زاویه نصب ۵ و ۱۰ درجه نمایان شود. بنابراین بهتر است که انکرهای مارپیچ با هر تعداد صفحه مارپیچ در زاویه ۵ و ۱۰ درجه نصب شوند تا بیشترین میزان ظرفیت بیرون‌کشش حاصل گردد.

در این بخش به دست‌خوردگی خاک بعد از نصب انکرهای مارپیچ پرداخته می‌شود که در اصطلاح به این موضوع اثر نصب گفته می‌شود. به دلیل وجود فاصله داخلی در هر صفحه و همچنین اعمال گشتاور و نیروی فشاری به انکر مارپیچ جهت نصب در خاک، خاک دچار دست‌خوردگی می‌شود. در منابع مختلف به شیوه‌های مختلفی ضعیف شدن خاک را بعد از دست‌خوردگی مورد مطالعه قرار دادند. به عنوان مثال گرکانی و ملکی (Garakani and Maleki 2019) قطر بخش دست‌خورده در خاک را دو برابر قطر صفحه مارپیچ (2D) در نظر گرفتند. از طرف دیگر پرز و شیاون (Perez and Sciavon 2018) با انجام مطالعات دقیق آزمایشگاهی و به کمک تست سانتریفیوژ و مدلسازی عددی سه بعدی، ابعاد دست‌خوردگی خاک را  $0.27D$  از لبه صفحه مارپیچ در نظر گرفتند و برای خاک دست‌خورده مشخصاتی را اعلام کردند. در این مطالعه عددی، ابعاد بخش دست‌خورده خاک که حاصل از نصب انکر مارپیچ است، براساس یافته‌های پرز و شیاون (Perez and Sciavon 2018) و همچنین در نظر گرفته شده است. برای بررسی دست‌خوردگی خاک ۱۲ آنالیز صورت پذیرفته است. در شکل ۷ میزان دست‌خوردگی خاک بر اثر نصب

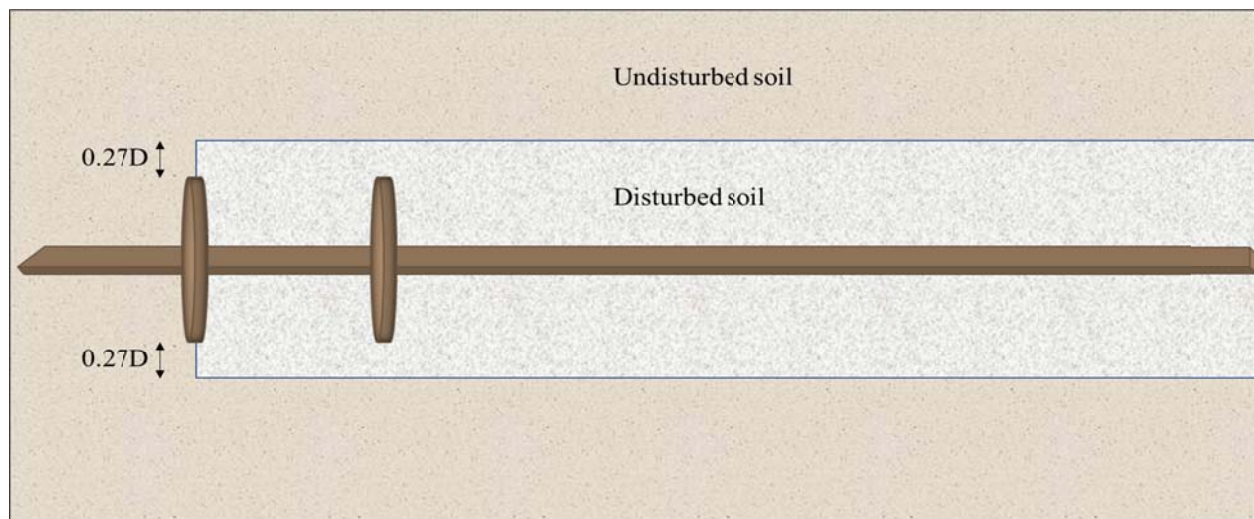
شکل ۶ تغییرات ظرفیت بیرون‌کشش (ظرفیت باربری) انکرهای مارپیچ تک (1-H)، دو (2-H) و سه صفحه (3-H) بر حسب زاویه‌های نصب مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد صفحات، ظرفیت باربری انکرهای مارپیچ به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در انکرهای مارپیچ تک صفحه (1-H) عملکرد تمامی انکرهای با و بدون زاویه تا نیروی ۳۰۰ تنی تقریباً مشابه است، ولی بعد از افزایش نیروی بیرون‌کشش بیش از ۳۰۰ تن، رفتار انکرهای مارپیچ تحت زاویه‌های مختلف شروع به تغییر می‌کند. بیشترین ظرفیت باربری این انکرها در زاویه نصب ۵ و ۱۰ درجه مشاهده می‌شود. نکته بسیار مهم این است که کمترین ظرفیت باربری کششی، در انکرهای تک صفحه با زاویه نصب ۲۵ درجه مشاهده می‌گردد. بنابراین، در حالت کلی ظرفیت باربری کششی انکر مارپیچ بدون زاویه از ظرفیت باربری انکر مارپیچ زاویه‌دار کمتر است. در انکرهای مارپیچ دو صفحه‌ای نیز بیشترین ظرفیت باربری کششی زمانی رخ می‌دهد که انکر تحت زاویه ۵ و ۱۰ درجه قرار داشته باشد. همچنین کمترین ظرفیت باربری در زاویه نصب ۱۵ درجه مشاهده می‌گردد. این در حالی است که عملکرد انکرهای دو صفحه‌ای در زاویه ۱۵ درجه و صفر درجه بسیار مشابه یکدیگر بوده و تقریباً ظرفیت باربری‌های مشابهی را دارا هستند. به عبارت دیگر اختلاف ظرفیت باربری انکر دو صفحه‌ای در زاویه ۱۵ درجه و صفر درجه تنها ۲/۵ درصد است، همچنین اختلاف تغییر مکان آن‌ها ۳/۲ درصد است. در شکل ۶ تاثیر زاویه نصب انکر سه صفحه‌ای در خاک بر روی ظرفیت بیرون‌کشش این انکرها مشخص است. مانند انکرهای مارپیچ تک و دو صفحه‌ای، بیشترین ظرفیت بیرون‌کشش در انکرهایی با زاویه ۵ و ۱۰ درجه مشاهده می‌شود. نکته قابل تامل در این دسته از آنالیزها این است که کمترین میزان ظرفیت باربری در حالتی مشاهده می‌شود که زاویه انکر ۱۵ درجه است و مقدار ظرفیت بیرون‌کشش در این حالت حتی کمتر از حالتی است که زاویه قرارگیری انکر در خاک، صفر درجه و یا به اصطلاح بدون زاویه نصب باشد. در تمام حالاتی که انکر تحت زاویه بین ۵ تا ۲۵ درجه قرار دارد، مقدار جابجایی لازم برای گسیخته شدن انکر مارپیچ سه صفحه‌ای در خاک بیشتر از حالتی است که انکر بدون

است. در تمام آنالیزهای انجام شده جهت بررسی دست‌خوردگی خاک، مقدار چسبندگی خاک صفر کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. مقدار سربار اعمالی در تمام مدل‌ها ۲۳۰ کیلوپاسکال و نسبت فاصله صفحه ماریپیج به قطر صفحه‌ها در تمام آنالیزها پنج برابر قطر صفحه ماریپیج (5D) است. بررسی دست‌خوردگی خاک برای مدل‌هایی با زاویه صفر درجه نسبت به افق انجام گرفته است.

انکر ماریپیج مشاهده می‌شود. برای مشخصات مکانیکی خاک دست‌خورده، محافظه‌کارانه‌ترین حالت ممکن انتخاب شده است. در این حالت، خاک‌های مورد بررسی بعد از دست‌خوردگی به ضعیف‌ترین حالت ممکن تبدیل می‌شوند. به عبارت دیگر، خاک‌های بسیار متراکم، متراکم، تراکم متوسط و سست، بعد از دست‌خوردگی همگی به خاک بسیار سست تبدیل می‌شوند. برای مطالعه دست‌خوردگی خاک در انکرهای ماریپیج تک، دو و سه صفحه‌ای، از صفحه ماریپیج با قطر ۴۰ سانتی‌متری استفاده شده



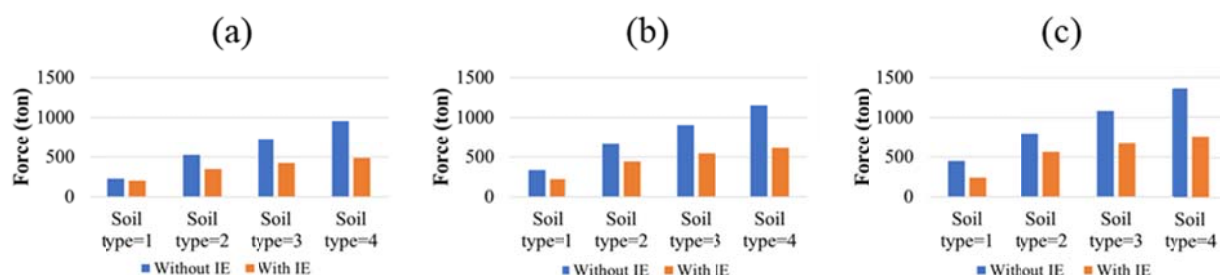
شکل ۶. تغییرات ظرفیت باربری انکرهای ماریپیج (a) تک صفحه‌ای، (b) دو صفحه‌ای و (c) سه صفحه‌ای با تغییر زاویه نصب و (d) مقایسه زاویه‌های نصب در هر سه نوع انکر با یکدیگر



شکل ۷. محدوده دست‌خوردگی خاک پس از نصب انکر ماریپیج

است. در انکرهای تک صفحه کمترین کاهش ظرفیت باربری در خاک ۱ و به میزان ۱۱ درصد است و بیشترین میزان آن ۴۹ درصد و برای خاک نوع ۴ است. این کاهش ظرفیت باربری برای انکرهای دو صفحه‌ای ۳۴ درصد و ۴۷ درصد به ترتیب برای خاک نوع ۱ و نوع ۴ است و این شرایط برای انکرهای سه صفحه‌ای نیز قابل مشاهده است. همچنین افزایش تعداد صفحات سبب افزایش ظرفیت باربری انکرها در هر دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن دست‌خوردگی می‌شود.

در شکل ۸ میزان نیروی لازم جهت بیرون‌کشش انکر ماریپیج تک، دو و سه صفحه قابل مشاهده است. چهار نوع خاک با مشخصات ذکر شده در بخش ۳ پس از دست‌خوردگی به خاک شل با وزن مخصوص ۱۵/۵ کیلوگرم بر متر مکعب و زاویه اصطکاک داخلی ۱۰ درجه تبدیل می‌شوند. در شکل ۸ دو حالت دست‌خورده و دست‌نخورده در خاک‌ها نشان داده شده است و همانطور که مشخص است در تمام حالات، دست‌خوردگی خاک سبب کاهش ظرفیت باربری می‌شود. بیشترین کاهش ظرفیت باربری در خاک نوع ۴ و کم‌ترین در خاک نوع ۱ رخ داده



شکل ۸. تغییرات ظرفیت باربری انکرهای ماریپیج قبل و پس از اعمال اثر نصب (a) تک صفحه‌ای، (b) دو صفحه‌ای و (c) سه صفحه‌ای

## ۵- نتیجه‌گیری

-بیشترین ظرفیت باربری بیرون‌کشش در انکرهای تک، دو و سه صفحه در زاویه‌های ۵ و ۱۰ درجه مشاهده و کمترین ظرفیت باربری در زاویه نصب ۱۵ درجه حاصل شد.  
-با در نظر گرفتن اثر نصب، دست‌خوردگی خاک سبب کاهش ظرفیت باربری انکرهای ماریپیج می‌شود که در این میان بیشترین کاهش ظرفیت باربری پس از دست‌خوردگی در خاک نوع ۱ و بیشترین در خاک نوع ۴ مشاهده می‌شود.  
-افزایش تعداد صفحه‌های ماریپیج، افزایش ظرفیت باربری انکرهای ماریپیج را در پی دارد.

این مطالعه عددی با کمک یک روش مدل‌سازی سه‌بعدی و نرم‌افزار FLAC3D به بررسی و مطالعه عددی ظرفیت باربری انکرهای ماریپیج پرداخته است. بدین منظور، در ابتدا با انجام یک تست صحت‌سنجی روش مدل‌سازی عددی تایید شد. سپس یک مطالعه پارامتری با ۳۶ آنالیز انجام و تاثیر زاویه‌های نصب مختلف و همچنین دست‌خوردگی خاک، که در اثر نصب انکر ماریپیج در خاک رخ می‌دهد، بر ظرفیت باربری انکرهای ماریپیج ارزیابی شد. نتایج مهم مطالعه حاضر عبارتند از:  
-با افزایش زاویه نصب انکرهای ماریپیج در خاک ظرفیت باربری بیرون‌کشش انکرها افزایش پیدا می‌کند.

- capacity of helical anchors in sand: interaction between helices. 56. 1534-1543.
- Garcia, L. D. C. (2019). Assessment of Helical Anchors Bearing Capacity For Offshore Aquaculture Applications. The university of Maine.
- Nagai, H., Tsuchiya, T. & Shimada, M. (2018). Influence of installation method on performance of screwed pile and evaluation of pulling resistance. 58. 355-369.
- Itasca Consulting Group, I. (2017). FLAC3D 6.0 User Manual.
- Chance. (2004) Chance Technical Design Manual. USA. Chance company.
- Wang, D., Merifield, R. & Gaudin, C. (2013). Uplift behaviour of helical anchors in clay. 50. 575-584.
- Spagnoli, G. & De Hollanda Cavalanti Tusha, C. (2020). A review on the behavior of helical piles as a potential offshore foundation system. 38, 1-24.
- Sharma, A. & Guner, S. (2020). System-level modeling methodology for capturing the pile cap, helical pile group, and soil interaction under uplift loads. 220.
- Ameratunga, J., Sivakugan, N. & Das, M. B. (2016). Correlation of Soil And Rock Properties In Geotechnical Engineering. Springer.
- Cerfontaine, B., Knappett, J. A., Brown, M. J. & Bradshaw, A. (2019). Effect of soil deformability on the failure mechanism of shallow plate or screw anchors in sand. 109. 34-45.
- Clemence, S. P. & Lutenecker, A. J. (2015). Industry survey of state of practice for helical piles and tiebacks. 9. 12-41.
- Hao, D., Wang, D., O'loughlin, C. D. & Guadin, C. (2019). Tensile monotonic
- Perez, Z. A. & Sciavon, J. A. (2018). Numerical and experimental study on influence of installation effects on behaviour of helical anchors in very dense sand. 55. 1067-1080.
- Tokhi, H., Ren, G. & Li, J. (2018). Laboratory pullout resistance of a new screw soil nail in residual soil. 55. 609-619.
- Tokhi, H. (2016). A study of new screw soil nail.
- Tokhi, H., Ren, G. and Li, J. (2016). Laboratory study of a new screw nail and its interaction in sand. 78. 144-154.

# Numerical Study of Installation Effect and Inclination Angle on the Pullout Capacity of Helical Multiple Anchors on Excavation Support

*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: June 2023- Accepted: November 2023

## **ABSTRACT**

In today's world, roads are considered the main arteries of the global community. One of the most typical methods to build these routes is stabilizing the excavations on two sides of the roads. Using multiple helical anchors in excavation stabilization is one of the means recently used by many road and geotechnical engineers. The increasing use of multiple helical anchors has led to several laboratories, numerical, and field studies. Therefore, this study employed the FLAC 3D software also a three-dimensional numerical investigation of bearing capacity under different inclination angles in sandy soil. In the present study, the effect of soil installation, which is caused by installing helical anchors in the soil, has been studied on the load-bearing capacity of these helical anchors. For this purpose, first, a verification test is done to validate the modeling approach. Then, by performing a parametric analysis, the effects of different inclination angles, as well as the installation effect on the bearing capacity of the multiple helical anchors, are studied. The present study results show that the maximum bearing capacity of the helical anchors is achieved by the angle of 5 and 10 degrees. In addition, by investigating the installation effect, the bearing capacity of the helical anchors has been significantly reduced with respect to the number of helical plates and the density of soil.

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