

ارزیابی قابلیت استفاده از مهارهای چندصفحه‌ای بازشونده در خاک‌های دانه‌ای سست و متراکم

حمیدرضا محمدخانی فرد^۱ امیر علی زاد^{۲*} مهسا امجدی^۳

۱- کارشناسی ارشد، گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
پست الکترونیک: hamid.818@hotmail.com

۲- امیر علی زاد*، استادیار، گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران،
ایران، پست الکترونیک: a.zad@iauctb.ac.ir

۳- مهسا امجدی، کارشناسی ارشد، گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران،
ایران، پست الکترونیک: mah.amjady@gmail.com

چکیده:

امروزه بشر برای تأمین انرژی به فکر ایجاد سازه‌ها و سکوهایی بر روی دریا و خشکی افتاده است. تاکنون مهارهای مختلفی با شکل‌های متفاوت به‌منظور استحکام و پایداری سازه‌ها، برای استفاده در دریا و خشکی معرفی شده است. یکی از مهارهای جدید معرفی شده در زمینه ژئوتکنیک دریایی، مهارهای صفحه‌ای بازشو هستند که در مقایسه با مهارهای رایج مورداستفاده دیگر دارای مزیت‌های مهمی نظیر نصب، قفل و فعال‌شدگی در خاک با نیروی کمتر می‌باشند. از آنجایی که این مهارها به‌تازگی توسعه داده شده‌اند، عملکرد این مهارها تحت اثر شرایط مختلف به‌طور کامل موردبررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این تحقیق، رفتار مهارهای چندصفحه‌ای با قابلیت باز شوندگی صفحات در خاک و میزان ظرفیت باربری آن‌ها با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی موردبررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای مختلف مانند میزان تراکم خاک و تأثیر فاصله صفحات از یکدیگر بر سرعت بازشدگی صفحات در خاک، عمق فعال‌شدگی نهایی مسلح‌کننده‌ها و ظرفیت باربری نهایی مهار بررسی شده است. در ابتدا مهار تک‌صفحه‌ای با مهار معادل دوصفحه‌ای با مساحت یکسان مورد مقایسه قرار گرفته است. سپس عملکرد مهار دوصفحه‌ای در ۵ تراکم مختلف در آزمایشگاه موردبررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در تراکم‌های بالا، مهارهای تک‌صفحه‌ای دارای ظرفیت باربری بیشتری در مقایسه با مهارها دوصفحه‌ای بودند. همچنین به‌طور معکوس، مهارهای صفحه‌ای دوتایی دارای ظرفیت باربری بیشتری نسبت به مهارهای صفحه‌ای تکی در خاک‌های با تراکم پایین‌تر بودند. علاوه بر این میزان تأثیر ۴ فاصله بین صفحات مهار دوصفحه‌ای بر روی ظرفیت باربری نهایی مهار موردبررسی قرار گرفته و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده تأثیر تغییر فاصله صفحات به‌مراتب بیشتر از تأثیر تغییر تراکم خاک بوده است.

واژگان کلیدی: مهارهای چندصفحه‌ای، فراساحلی و ساحلی، مهارهای صفحه‌ای بازشو، تراکم خاک

انواع مختلفی از مهارها در دریا مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر یک از مهارها برای نصب شرایط متفاوتی دارند. در مواردی نیز این شرایط باعث هزینه‌بر شدن استفاده از آن‌ها می‌شود. از این رو، محققین بسیاری کوشیدند تا با بررسی پارامترهایی نظیر عمق نفوذ، سرعت بازشدگی و قفل‌شدگی آن و ظرفیت باربری نهایی در شرایط مختلف، بهترین نوع از مهارها را معرفی کنند. مهارهای متعددی از لحاظ شکل ظاهری پیشنهاد شده است که این تغییرات ظاهری باعث تفاوت ظرفیت باربری آن‌ها شده است. از جمله مهارهای مکانیکی بکار رفته در خشکی و دریا می‌توان به مهارهای صفحه‌ای ساده افقی، شیب‌دار و عمودی، مهارهای درجا، مهارهای چندصفحه‌ای، مهارهای متقاطع، مهارهای بازشونده، مهارهای مارپیچ، مهارهای زاویه‌دار، مهارهای با بارگذاری عمودی (VLA)، مهارهای با صفحه مکش تعبیه‌شده (SEPLA)، مهارهای صفحه‌ای با عمق قرارگیری زیاد (DEPLA) مانند مهارهای Omni-max و مهارهای دینامیکی، مهارهای حجمی (caisson)، مهارهای گرانشی جاذبه اشاره نمود [۸-۱].

غالی و همکاران [۸] به بررسی عملکرد مهارهای مارپیچ در خاک ماسه‌ای متراکم و سست با زاویه پیچش متفاوت پرداختند. آن‌ها بیان کردند که سازوکار ایجاد گسیختگی با بار، عمق قرارگیری مهار و زاویه برش خاک رابطه دارد. همچنین، عمق تشکیل گوه گسیختگی در ماسه متراکم بیشتر از ماسه سست بود. لوتنگر [۹] در پژوهشی تأثیر اندازه و فاصله صفحات در مهارهای مارپیچ را بررسی کرد. این محقق بیان داشت که در خاک‌های ماسه‌ای با افزایش تعداد صفحات مارپیچ تأثیر آن‌ها کمتر می‌شود که احتمالاً به دلیل نزدیک شدن فاصله بین آن‌ها می‌باشد. همچنین، بهترین فاصله بین صفحات، ۳ برابر عرض آن‌ها می‌باشد.

سوها و همکارانش [۱۰] در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر افزایش تعداد صفحات بر ظرفیت مهارهای مارپیچ پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن ۱۲ نوع مهار مختلف و تراکم‌های نسبی مختلف خاک ماسه‌ای اظهار داشتند که اضافه کردن صفحات مارپیچ دوم و سوم در خاک‌های متراکم‌تر باعث کاهش ظرفیت باربری خاک می‌شود. میتال و موخرجی [۱۱] تأثیر تعداد صفحات مارپیچ و عمق مدفون‌شدگی صفحات بر ظرفیت باربری مهارهای مارپیچ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش تعداد صفحات مارپیچ، افزایش عمق و تیغه‌های مارپیچ (screw blades) باعث افزایش ظرفیت باربری مهارهای مارپیچ می‌شوند. سرفونتین و همکارانش [۱۲] به بررسی تأثیر مشخصات مختلف خاک بر گوه گسیختگی مهارهای مارپیچ و صفحه‌ای پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییر شکل عمودی افقی خاک، توزیع تنش را در امتداد گوه شکست اصلاح می‌کند و تنش‌های نرمال و برشی را افزایش می‌دهد.

کومار و کوزر [۱۳] به بررسی ظرفیت باربری چند مهار با صفحه‌های افقی و با عمق کم در خاک پرداختند. آن‌ها بیان کردند اگر فاصله مهارهای قرار گرفته در کنار یکدیگر از دو برابر عمق قرارگیری در تانژانت زاویه اصطکاک داخلی خاک بیشتر باشد، هیچ تداخلی بین گوه‌های گسیختگی ایجاد نمی‌شود. اما اگر فاصله قرارگیری صفحات کمتر از حد ذکر شده باشد، بین گوه‌های گسیختگی تداخل ایجاد می‌شود و ظرفیت باربری کاهش پیدا می‌کند.

یانگ و همکاران [۱۴] تأثیر وجود صفحه بازشونده بر رفتار مهارهای مکشی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که صفحات با سطح زاویه‌دار دارای ظرفیت باربری بیشتری نسبت به صفحه‌ای مهار بدون زاویه بودند. همچنین، وجود زاویه باعث می‌شود که مهار برای رسیدن به سطح خاصی از چرخش، مسافت بیشتری را طی کند و یا عمق مدفون‌شدگی کمتری در بالای آن قرار گیرد. برار و بانرجی [۱۵] تأثیر تراکم نسبی، اندازه‌ی فنجان‌ی شکل پایین مهار و عمق مهار بر ظرفیت باربری شکل خاصی از مهارهای

فنجانی شکل در سه نوع خاک مختلف را مورد مطالعه قراردادند. نتایج آن‌ها بیان کرد که با افزایش تراکم نسبی، ظرفیت باربری مهار افزایش یافته است. همچنین، افزایش اندازه فنجان شکل مهار باعث افزایش باربری مهار خواهد شد.

دباز و همکاران [۱۶] به بررسی مدل‌های مختلف مهارها نظیر شمع‌های کوبشی، مهارهای دینامیکی، مهارهای با صفحات زاویه‌دار، کیسون‌ها و مهارهای عمودی قرار داده شده در خاک برای یافتن مناسب‌ترین مهار برای توربین‌ها پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که مهارهای مکنده راحت‌تر در جایگاه خود قرار می‌گیرند و هزینه کمتری نسبت به مهارهای حمل‌شونده دارند اما نسبت به مهارهای دارای زاویه و یا دینامیکی هزینه بیشتری دارند.

اسپانولی و همکاران [۱۷] تأثیر سه نسبت متفاوت اندازه صفحه و شفت بر ظرفیت باربری مهارهای پیچشی مدفون در خاک ماسه‌ای با زاویه‌های ۳۰ تا ۴۵ درجه تحت اثر نیروهای بیرون‌کشش ۵ MN تا ۲۵ MN را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش قطر مهارهای مارپیچ‌گشتاور نیروهای مهار نیز افزایش پیدا می‌کند. لیانگ و همکاران [۱۸] به بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر عمق مسلح‌کننده، پهنا و زاویه مهار و مقدار فرسایش خاک در کنار سه‌پایه مهار بر ظرفیت پیچشی مهارهای سه‌پایه برای توربین‌ها بادی در دریا پرداختند. نتایج این پژوهش بیانگر این بود که ارتفاع و عمق مهار نسبت به ارتفاع فونداسیون تأثیر کمتری در ظرفیت باربری دارد؛ مخصوصاً در مهارهای لاغرتر که در سازه‌های فراساحلی استفاده می‌شوند. افزایش عمق فرسایش عامل مهمی است که باعث کاهش ظرفیت باربری خاک می‌شود. همچنین، افزایش پهنا و کاهش زاویه اصطکاک نیز باعث کاهش ظرفیت باربری می‌شود.

ویسنت و کیم [۱۹] به بررسی و ارزیابی ظرفیت باربری باکت‌انکرها در راستای عمود و افقی پرداختند. در این پژوهش از باکت‌انکرهایی به ابعاد ۲۰ و ۳۰ m با نسبت مدفون‌شدگی برابر با ۰/۳ تا ۱ استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد ظرفیت باربری عمودی در خاک متراکم ۱/۵ تا ۲ برابر بیشتر از خاک نیمه متراکم و سست می‌باشد و زمانی که ابعاد مهار از ۲۰ به ۳۰ افزایش پیدا می‌کند، ظرفیت باربری عمودی نیز ۳ برابر افزایش می‌یابد.

بلندنظر و همکاران [۲۰] مقاومت بیرون‌کشیدگی مهارهای چند صفحه‌ای عمودی منفرد و گروهی در خاک درشت دانه را در آزمایشگاه بررسی کردند. مقاومت بیرون‌کشیدگی مهارهای تک، دو و سه صفحه‌ای برای ارزیابی تأثیر اضافه صفحات بر مقاومت بیرون‌کشیدگی، مورد تحلیل قرار گرفت و همچنین مهارها بصورت دوتایی و همزمان با نسبت فاصله بر عرض مهار ۲، ۳ و ۴ مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که مهارهای قائم تک صفحه‌ای با افزایش یک و دو صفحه اضافی به ترتیب ۱۲۶ و ۱۹۷٪ بر مقاومت بیرون‌کشیدگیشان افزوده می‌شود.

جلالی مقدم و همکاران [۲۱] برای اولین بار در یک مطالعه آزمایشگاهی به معرفی نسل جدیدی از مهارهای مکانیکی با نام مهارهای صفحه‌ای بازشو^۲ پرداختند که در این نوع از مهار، صفحات متحرک بوده و در هنگام نصب مسلح‌کننده و نفوذ آن‌ها به درون خاک، بسته است. با رسیدن صفحات به عمق مدفون‌شدگی طراحی، تحت حداقل بیرون‌کشش، صفحات باز شده و مسلح‌کننده فعال می‌شود. آن‌ها در پژوهش خود بر روی مهارهای صفحه‌ای بازشو تک صفحه‌ای مواردی همچون شکل صفحه و زاویه انحنای صفحات (از ۱/۳ ابتدایی و ۱/۳ انتهایی) را بر روی سرعت فعال‌شدگی مسلح‌کننده، عمق مدفون‌شدگی نهایی، قابلیت مقاومت و تحمل مسلح‌کننده تحت بیرون‌کشش ثابت، سرعت بیرون‌کشش، و چگونگی بسیج‌شدگی توده خاک فعال در بالای صفحات را مورد بررسی

¹ Bucket anchors

² Expandable Mechanical Plate Anchors (EMPLAs)

قراردادند و بهترین زاویه و بهترین شکل مهار را برای استفاده در پایدارسازی پلتفرم‌های احداث‌شده در ساحل و دریا معرفی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بهترین عملکرد در ظرفیت باربری در میان صفحات متعلق به صفحه دایره‌ای شکل بود.

روی و همکاران [۲۲] تأثیر تحکیم بر مهارهای صفحه‌ای افقی مدفون در ماسه متراکم و نیمه متراکم را با استفاده از آزمایش سانتریفیوژ موردبررسی قراردادند. نتایج این پژوهش نشان داد که با تغییر شرایط تحکیم از زهکشی شده به زهکشی نشده، ظرفیت باربری مهارهای صفحه‌ای ۴/۸ تا ۵/۵ برابر افزایش یافته بود.

روی و همکاران [۲۳] با استفاده از آزمایش سانتریفیوژ و مدلسازی عددی، تأثیر مایل بودن بار بر مهارهای صفحه‌ای افقی مدفون در ماسه را مورد ارزیابی قراردادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افقی‌تر شدن شیب بار، ظرفیت باربری مهارهای صفحه‌ای افزایش می‌یابد.

گائو و همکاران [۲۴] تأثیر پارامترهایی نظیر نسبت مدفون‌شدگی مهار، تعداد و محل قرارگیری لایه‌های ژئوگرید بر شکل گوه گسیختگی و ظرفیت بیرون کشیدگی مهارهای صفحه‌ای تقویت‌شده با ژئوگرید را با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی موردبررسی قراردادند. نتایج این پژوهش نشان داد که در خاک تقویت‌شده، افزایش نسبت مدفون‌شدگی ظرفیت باربری نهایی مهار صفحه‌ای را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد و بر روی قفل و بست بین خاک و ژئوگریدها تأثیر می‌گذارد.

راویشانکار و همکاران [۲۵] با استفاده از آزمایش‌های چرخه‌ای بیرون کشیدگی، رفتار مهارهای صفحه‌ای مدفون در رس غیرمسلح و رس مسلح شده را مورد ارزیابی قراردادند. نتایج بیانگر این بود که مهار تقویت‌شده، ظرفیت بیرون کشیدگی استاتیکی و چرخه‌ای بالاتر با میزان جابجایی کمتر مهار را نشان می‌دهد.

ژوانگ و همکاران [۲۶] رفتار بیرون کشش مهار صفحه‌ای مایل مدفون در ماسه تحت تأثیر بیرون کشش محوری را با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی در شرایط ۱g بررسی کردند. نتایج این پژوهش بیان‌کننده این موضوع بود که با افزایش شیب اعمال بار به سمت محور عمود، ظرفیت بیرون کشش مهار افزایش می‌یابد.

تیلک و سامادها [۲۷] ظرفیت بیرون کشش نهایی مهارهای چندصفحه‌ای دایره‌ای مایل مدفون در ماسه را با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی موردبررسی قراردادند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش نشست مدفون‌شدگی مهارهای دو و سه‌صفحه‌ای، ظرفیت بیرون کشش نهایی این مهارها افزایش می‌یابد.

ژائو و همکاران [۲۸] با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 3D، تأثیر ناهمگنی خاک بر مقاومت بیرون کشش مهار صفحه‌ای افقی کم‌عمق را بررسی کردند. نتایج این پژوهش بیانگر این بود که ناهمگنی و رفتار غیرخطی خاک، عامل مهم تعیین شکل گوه گسیختگی مهار صفحه‌ای می‌باشند.

امجدی و همکاران [۲۹] به بررسی رفتار مهارهای چند صفحه‌ای به صورت عددی پرداختند و روش‌های المان محدود، المان محدود توسعه یافته و اجزای مجزا را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد که روش المان محدود توسعه یافته پیش‌بینی دقیق‌تری از رفتار این مهارها دارد. در این تحقیق پارامترهایی مانند هندسه مهار، تراکم خاک، فاصله بین صفحات و تعداد صفحات مورد ارزیابی قرار گرفته بودند. نتایج مدلسازی عددی نشان داد که با افزایش تعداد صفحات، ظرفیت بیرون کشیدگی از حالت تک صفحه‌ای به حالت دو صفحه‌ای افزایش می‌یابد، اما با تغییر از حالت مهار دو صفحه‌ای به حالت مهار سه صفحه‌ای، تغییر چندانی در ظرفیت بیرون کشیدگی ایجاد نمیشود.

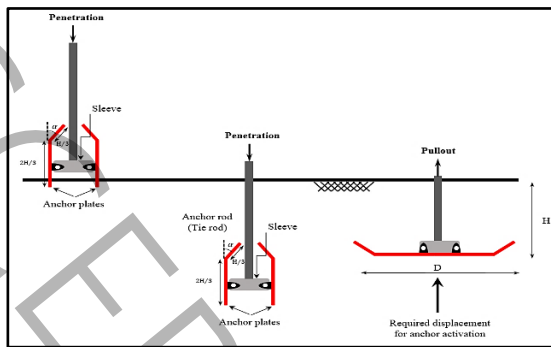
در پژوهش قبلی انجام شده توسط جلالی مقدم و همکاران [۳۰] بر روی مهارهای صفحه‌ای بازشو، تأثیر شکل صفحات و زاویه و جهت انحنای صفحات بر ظرفیت بیرون کشیدگی مهارهای صفحه‌ای بازشو در خاک‌های دانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است؛ اما اثر پارامترهای دیگر بر عملکرد و ظرفیت بیرون کشیدگی این مهارها در خاک‌های دانه‌ای مورد بررسی قرار نگرفته است. از این رو در این پژوهش، به بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر تراکم خاک، تأثیر تعداد صفحات و فواصل صفحات بر عملکرد مهارهای صفحه‌ای بازشو پرداخته شد. همچنین، برای بررسی تأثیر پارامترهای ذکر شده بر رفتار مهارهای صفحه‌ای بازشو از مدلسازی فیزیکی استفاده شده است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مهارهای چندصفحه‌ای بازشونده

برای مدلسازی میله مهاری مسلح کننده از یک میله به قطر ۳۰ mm و طول ۱۰۰۰ mm استفاده شده است. ابعاد انتخابی برای میله مهاری بر اساس پژوهش انجام گرفته توسط جلالی مقدم و همکاران [۳۰] به گونه‌ای انتخاب شد که میله مهاری در طول آزمایش دچار کمناش و خم‌شدگی نشود. بر روی این میله سوراخ‌هایی به منظور وصل کردن صفحه‌ها در ارتفاع‌های تعیین شده تعبیه گردیده است و همچنین یک غلاف متحرک و یک غلاف ثابت نیز بر روی میله مهاری وجود دارد؛ این غلاف‌ها به وسیله وصله‌هایی به صفحات مهاری متصل می‌شوند. غلاف ثابت برای حالت تک‌صفحه‌ای در انتهای میله مهاری قرار می‌گیرد و غلاف متحرک برای حالت دوصفحه‌ای بر روی میله مهاری مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱).

صفحات مهاری از جنس فولاد و به ضخامت ۳ mm برای جلوگیری از لهیدگی انتخاب شده‌اند [۳۰]. اندازه صفحه‌ها در دو حالت تک‌صفحه‌ای و دوصفحه‌ای با یکدیگر برابر بوده و ابعادی که برای حالت‌های تک‌صفحه‌ای و دوصفحه‌ای مورد استفاده قرار گرفته به ترتیب اندازه‌های $28/3 * 28/3$ و $20 * 20$ cm هستند (مساحت کل $= 800 \text{ cm}^2$). صفحه‌های $20 * 20$ که حالت مهاری دوصفحه‌ای را تشکیل می‌دهند معادل مهاری تک‌صفحه‌ای با ابعاد $28/3 * 28/3$ هستند. صفحات مورد استفاده در مدلسازی فیزیکی دارای انحنای ۴۵ درجه در $1/3$ انتهایی خود بودند زیرا نتایج پژوهش قبلی انجام شده توسط جلالی مقدم و همکاران [۳۰] نشان داده بود که صفحات با انحنای ۴۵ درجه دارای بیشترین ظرفیت باربری بودند. به منظور اتصال صفحه‌ها به میله مهاری از ۴ بست استفاده شده است که بر روی صفحه‌ها در دو وجه بست‌ها جوش خورده است. بست‌ها با پیچ به یک قطعه دایره شکل توخالی متحرک و ثابت (غلاف نگه‌دارنده) بر روی میله مهاری متصل می‌شوند. قطعه متحرک در ارتفاع مورد نظر بر روی میله مهاری که از قبل سوراخ‌هایی برای پیچ و اتصال قطعه متحرک بر روی آن در نظر گرفته شده است پیچ می‌گردد تا از حرکت غلاف پس از انتخاب فاصله مورد نظر جلوگیری شود. در شکل (۱) مهارها در حالت دوصفحه‌ای نشان داده شده است. صفحات در حالت دوصفحه‌ای در ۴ فاصله مختلف $1/5B$ ، $1B$ ، $2/5B$ ، $3/5B$ و $4/5B$ قرار داده شدند که B اندازه عرض صفحه‌ها (۲۰ cm) می‌باشد.



(C) تصویر شماتیک



(b) مهار با صفحات بسته



(a) مهار با صفحات باز

شکل (۱) مهارهای چندصفحه‌ای بازشونده
Figure(1) Expandable Plate Anchors

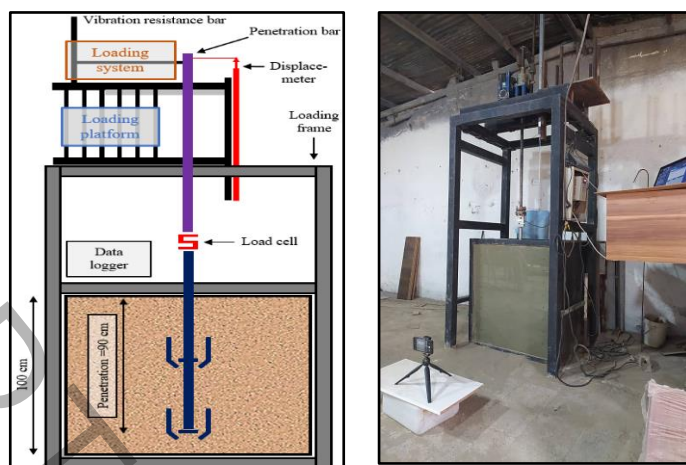
۲-۲- محفظه آزمایش و خاک

محفظة آزمایش‌ها شامل یک محفظه خاک به ابعاد $1 \times 1 \times 1$ (م^۳) و یک چهارچوب بارگذاری آهنی برای قرارگیری دستگاه بارگذاری در ارتفاع است. دستگاه بارگذاری از یک موتور با قدرت ۱/۵ اسب بخار (۱/۵hp) با سرعت ۱۴۲۰ rpm، گیربکس با قدرت ۷/۵kg و یک داده‌بردار^۳ برای کنترل سرعت و استخراج تشکیل شده است. مقدار نیرو به وسیله یک نیروسنج^۴ ۲ton با دقت ۰/۱g اندازه‌گیری می‌شود. همچنین، برای اندازه‌گیری مقدار جابجایی صفحه‌ها از یک خط‌کش عددی^۵ به اندازه ۱m و دقت ۰/۱mm استفاده شده است. یک میله برای انتقال نیرو از داخل گیربکس عبور کرده و در پایین به نیروسنج متصل می‌شود. در قسمت پایین نیروسنج، میله مهار قرار گرفته است و بر روی میله مهار نیز صفحه‌ها نصب شده‌اند. نیروسنج و خط‌کش هر دو به یکدیگر جفت شده‌اند تا نتایج کاملاً دقیقی به دست آید. دستگاه داده‌بردار سرعت موتور را کنترل کرده تا سرعت از حد مجاز کمتر و یا بیشتر نشود. برای بالا بردن دقت اندازه‌گیری از یک نمایشگر برای اندازه‌گیری نیرو استفاده شده است.

³ Data Logger

⁴ Load Cell

⁵ Digital Ruler



شکل (۲) محیط آزمایشگاهی و ابزار گذاری‌های جانبی به منظور قرائت دقیق نتایج
 (a) محیط آزمایشگاهی (b) تصویر شماتیک

Figure (2) Experimental test details including soil chambers and data acquisition system

از آنجایی که مطالعات مشابه پیشین در بستر خاک خشک انجام شده بود، لذا در این پژوهش نیز از خاک ماسه‌ای و خشک در تمامی آزمایش‌ها استفاده شد [۳۰، ۳۱]. بر اساس روش طبقه‌بندی خاک متحد (USCS)، خاک از نوع ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات خاک ارائه شده است. مقاومت برشی خاک بر اساس آزمایش برش مستقیم و برای تراکم از آزمایش تراکم نسبی خاک استفاده شده است. [۳۲-۳۴].

جدول (۱) مشخصات خاک
 Table(1) Soil specifications

شرح	حداکثر زاویه اصطکاک، ϕ (°)	ضریب یکنواختی، C_u	ضریب انحناء، C_c	اندازه ذرات، D_{30} (mm)	اندازه ذرات، D_{10} (mm)	اندازه ذرات، D_{60} (mm)	حداقل چگالی، γ_{min} (gr/cm^3)	حداکثر چگالی، γ_{max} (gr/cm^3)
مقدار	۲۸	۲/۰۴	۰/۸۵	۰/۲۰۸	۰/۱۵۸	۰/۳۲۲	۱/۴	۱/۷

۳-۲- نحوه انجام آزمایش

روند انجام آزمایش برای تمامی مهارها یکسان بوده و شامل نصب غلاف و صفحات، پیچ نمودن صفحات مهاری به غلاف و نفوذ می‌باشد. به منظور به دست آوردن تراکم یکنواخت، محفظه به ده قسمت مساوی با ارتفاع ۱۰۰ mm تقسیم شد. برای به دست آوردن وزن خاک در تراکم مورد نظر ابتدا تراکم خاک بر اساس وزن مخصوص محاسبه گردید؛ نحوه محاسبه به منظور بود که وزن خاک

موردنیاز متناسب با تراکم‌های ۳۵، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰٪ با دانستن 1m^3 مکعب لایه خاکریزی و وزن مخصوص، مقادیر وزن هر لایه 100mm خاک تعیین گردید؛ سپس خاک به صورت لایه به لایه در محفظه آزمایش ریخته و کوبیده شد تا در انتها مقدار وزن محاسبه شده در محفظه قرار گیرد. پس از پر کردن محفظه و رسیدن به تراکم موردنظر در هر آزمایش، نصب مسلح کننده انجام گرفت. مسلح کننده‌ها در ابتدا به صورت بسته وارد خاک شده و در ارتفاع 100mm بالاتر از کف محفظه قرار می‌گیرند. با شروع آزمایش، موتور با سرعت ثابت 1mm/s شروع به حرکت رو به بالا کرده و هم‌زمان قرائت نیرو و کرنش انجام شد و نتایج آن‌ها به صورت نمودار ثبت می‌شد. سرعت حرکت موتور برای تمام حالت آزمایش ثابت در نظر گرفته شده است زیرا افزایش سرعت باعث افزایش ظرفیت باربری خواهد شد [۳۵]. بر روی میله مهار سوراخ‌هایی به قطر 5mm و در ارتفاع موردنظر ایجاد شد که برای اتصال صفحه‌ی دوم از آن‌ها استفاده می‌شود. صفحه دوم بر روی یک غلاف قرار گرفته بود و این غلاف به وسیله پیچ به سوراخ‌های ایجاد شده متصل شد تا از عدم جابجایی صفحه‌های مهار اطمینان حاصل گردد. ترتیب انجام آزمایش‌ها بدین گونه بود که در ابتدا آزمایش‌های بر روی مهار تک‌صفحه‌ای در خاک با تراکم‌های ۳۵، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰٪ و سپس آزمایش‌ها بر روی مهار دو صفحه‌ای با فاصله بین صفحات کم (100mm) تا فاصله بین صفحات زیاد (400mm) انجام شد. نسبت H/D برای حالت تک‌صفحه‌ای برابر $3/1$ و برای دو صفحه‌ای برابر $4/5$ بود که این نسبت جز مهارهای کم عمق می‌باشد (نسبت H/D انکر عمیق برابر $H/D \geq 6$ است که با افزایش این نسبت ظرفیت باربری نیز افزایش پیدا خواهد کرد [۳۶، ۳۷]).

۴-۲- دسته‌بندی آزمایش‌ها

در مهارهای تک‌صفحه‌ای از صفحه‌ای به ابعاد $28/3\text{ cm} * 28/3\text{ cm}$ و در حالت دو صفحه‌ای از دو صفحه به اندازه $20\text{ cm} * 20\text{ cm}$ استفاده شده است. اندازه مساحت تک‌صفحه‌ای معادل با مجموعه صفحات مسلح کننده دو صفحه‌ای بوده است تا بتوان ظرفیت باربری مشابهی را برای آن‌ها لحاظ نمود. پارامترهای متغیر در آزمایش‌ها شامل تراکم خاک و همچنین تعداد صفحه‌ها است. در جدول (۲) به نام‌گذاری آزمایش‌ها بر اساس نوع پارامترهای مورد ارزیابی در آزمایش‌ها اشاره شده است.

جدول (۲) نام‌گذاری آزمایش‌ها

Table(2) Experimental test details

تراکم (%)	(mm فاصله صفحات)	مساحت صفحه (mm^2)	تعداد صفحه‌ها	برچسب آزمایش
۳۵٪	-	$283 * 283\text{ mm}^2$	۱	DR35
۵۰٪				DR50
۶۰٪				DR60
۷۰٪				DR70
۸۰٪				DR80
۳۵٪	۱۰۰ mm			0.5BDR35
۵۰٪				0.5BDR50
۶۰٪				0.5BDR60
۷۰٪				0.5BDR70
۸۰٪				0.5BDR80

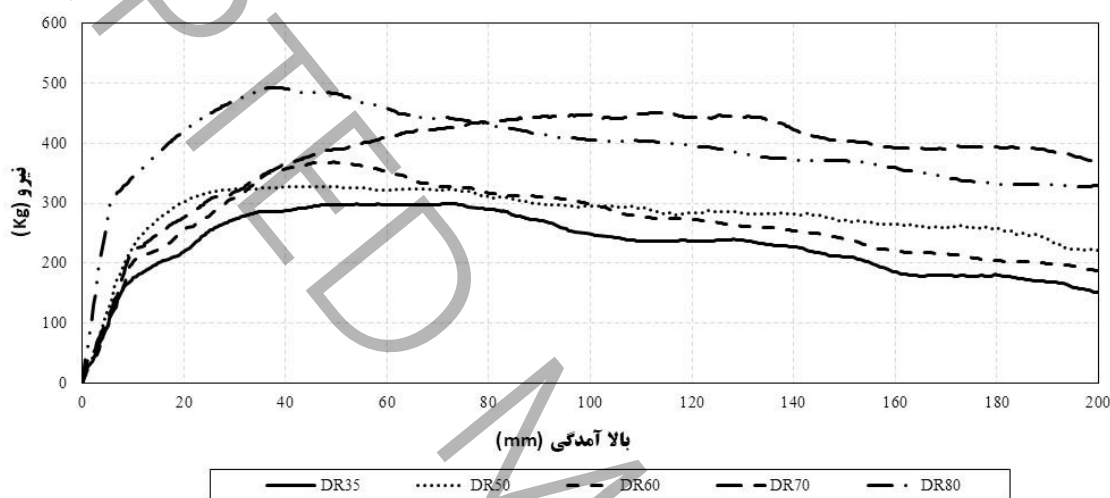
1BDR35	۲	۲۰۰*۲۰۰ mm ²	۲۰۰ mm	%۳۵
1BDR50				%۵۰
1BDR60				%۶۰
1BDR70				%۷۰
1BDR80				%۸۰
1.5BDR35			۳۰۰ mm	%۳۵
1.5BDR50				%۵۰
1.5BDR60				%۶۰
1.5BDR70				%۷۰
1.5BDR80				%۸۰
2BDR35			۴۰۰ mm	%۳۵
2BDR50				%۵۰
2BDR60				%۶۰
2BDR70				%۷۰
2BDR80				%۸۰

۳- نتایج

۳-۱- مهارهای تک صفحه‌ای

در شکل (۳) نتایج آزمایش‌های بیرون کشش بر روی مهارهای تک صفحه‌ای با ابعاد ۲۸/۳ * ۲۸/۳ cm و تحت پنج تراکم مختلف ۳۵، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰٪ نشان داده شده است. به طور کلی با افزایش تراکم خاک، ظرفیت باربری نیز افزایش پیدا می‌کند به طوری که در تراکم‌های بالا بیشینه ظرفیت باربری بیشتری به دست آمده است. با افزایش تراکم خاک از ۳۵ به ۵۰٪، ۵۰ به ۶۰٪، ۶۰ به ۷۰٪ و ۷۰ به ۸۰٪ بیشینه ظرفیت باربری مهار به ترتیب ۹٪، ۱۱٪، ۱۸٪ و ۸٪ افزایش یافته است. همچنین، با افزایش تراکم خاک از ۳۵ به ۶۰٪، ۳۵ به ۷۰٪ و ۸۰٪ نرخ افزایش بیشینه ظرفیت باربری مهار به ترتیب ۲۳/۹٪، ۵۲/۴٪ و ۶۵/۷٪ بود. میزان افزایش ظرفیت باربری بین تراکم‌های ۷۰ تا ۸۰٪ مقدار کمتری بوده است. در تراکم بین ۳۵ و ۵۰٪ مقدار ظرفیت باربری حدود ۹٪ افزایش یافته است که می‌توان بیان کرد در حالت‌های خیلی متراکم و حالت سست، تأثیر چشمگیری بر روی افزایش ظرفیت باربری مهار تک صفحه‌ای نداشته است و تأثیر آن کمتر از ۱۰٪ بوده است. همچنین رفتار نمودارهای بار-جابجایی در تراکم‌های ۳۵، ۵۰ و ۶۰٪ نزدیک به هم می‌باشند. نکته قابل توجه دیگر این است که در تراکم ۸۰٪، بعد از رسیدن به بیشینه ظرفیت باربری نمودار دارای افت قابل ملاحظه‌ای می‌شود به طوری که در ادامه روند آزمایش، بیشینه ظرفیت باربری مهار در تراکم ۷۰٪ از تراکم ۸۰٪ بیشتر بود. در تراکم ۷۰٪ بعد از رسیدن به بیشینه ظرفیت باربری که تقریباً برابر با بیشینه مقدار در تراکم ۸۰٪ است، ظرفیت باربری کششی دچار افت محسوسی می‌شود. سرعت باز شدن مهار در تراکم ۸۰٪ از بقیه تراکم‌ها بیشتر بوده است. به طور کلی در هر پنج میزان تراکم بررسی شده، بعد از رسیدن ظرفیت باربری به بیشینه مقدار، روند افت ظرفیت باربری رخ داده است. در تراکم ۸۰٪ بیشینه ظرفیت باربری در عمق ۸۶۰ mm ایجاد شده است که نسبت به تراکم‌های دیگر در عمق بیشتری اتفاق افتاده بود. در تراکم‌های ۷۰، ۶۰، ۵۰ و ۳۵٪ بیشینه نیروها به ترتیب پس از طی بیرون کشش ۱۱۶، ۵۰/۱، ۴۳/۸ و ۷۲/۴ mm رخ داده است که می‌توان بیان کرد که در خاک متراکم ۸۰٪ باز شدگی مهار زودتر اتفاق می‌افتد. با دقت در اعداد بیان شده می‌توان برداشت کرد که در تراکم ۷۰٪ جابجایی

بیشتری برای رسیدن به بیشینه نیروها موردنیاز بوده است اما این جابجایی بیشتر باعث کاهش ظرفیت باربری نشده است به طوری که ظرفیت باربری در این تراکم با ظرفیت باربری در تراکم بالاتر یعنی ۸۰٪ اختلاف چندانی دارد. نکته حائز اهمیت از مقایسه عمق بازشدگی مهارها آن است که بیرون کشش ۱۱۶mm، جابجایی بیشینه در حصول اطمینان از قطعیت باز شدن صفحات و باز شدن مسلح کننده می باشد. به عبارت دیگر، در این فاصله، صفحات متحرک مهاری به صورت کامل باز شده اند و کاملاً از راستای عمودی (موازی با میله مهار) به راستای افقی (عمود بر میله مهار) در خاک چرخیده اند. به طور کلی سرعت باز شدن مهارها تأثیر بسزایی در دستیابی به بیشینه ظرفیت باربری و نیروی مقاومت نهایی مهارها داشته است.

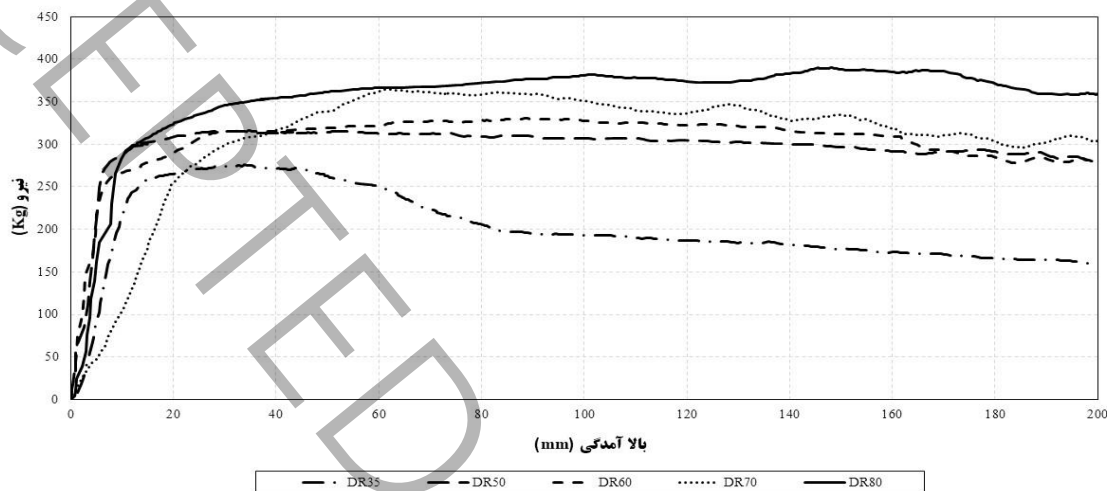


شکل (۳) نمودارهای ظرفیت باربری-بیرون کشش برای آزمایش‌های DR35 تا DR80
 Figure (3) Pull out capacity versus displacement of single plate anchor with DR35 to DR80

۲-۳- مهارهای دوصفحه‌ای با فواصل ۲B

در شکل (۴) نتایج آزمایش‌های بیرون کشیدگی مهارهای دوصفحه‌ای بافاصله بین صفحات برابر ۴۰۰mm نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش تراکم نسبی خاک موجب افزایش ظرفیت باربری مهارها می‌شود. با افزایش تراکم خاک از ۳۵ به ۵۰٪، ۵۰ به ۶۰٪، ۶۰ به ۷۰٪ و ۷۰ به ۸۰٪ ظرفیت باربری مهارهای دوصفحه‌ای بافاصله ۲B به ترتیب ۱۴/۷٪، ۴٪، ۱۳/۸٪ و ۳/۹٪ افزایش یافته است. همچنین، با افزایش تراکم خاک از ۳۵ به ۶۰٪، ۶۰ به ۷۰٪ و ۷۰ به ۸۰٪ بیشینه ظرفیت باربری مهارهای دوصفحه‌ای بافاصله ۲B به ترتیب ۱۹/۷٪، ۳۶/۳٪ و ۴۱/۷٪ افزایش یافته است. عمق لازم برای بازشدگی مهارها نیز در تراکم‌های ۳۵، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰٪ به ترتیب ۲۶/۸، ۷۴/۷، ۹۲/۹، ۶۲/۴ و ۱۴۵mm می‌باشد. پس با انتخاب تراکم ۷۰٪ می‌توان نتیجه مناسبی را در این حالت به دست آورد زیرا اختلاف چشم‌گیری بین ظرفیت باربری در این تراکم و تراکم بالاتر وجود ندارد و بازشدگی مهار نیز طی مسافت کمتری ایجاد شده است. همچنین، می‌توان بیان کرد تراکم‌های ۳۵٪ و ۷۰٪ تراکم‌های مناسبی برای قرینه و هم‌زمان باز شدن صفحات در این حالت هستند. در خاک سست با تراکم نسبی ۳۵٪، بعد از رسیدن ظرفیت باربری به بیشینه مقدار خود،

نمودار به شدت افت پیدا می کند، درحالی که در تراکم های نسبی بیشتر، بعد از رسیدن به بیشینه ظرفیت باربری، روند افزایش ظرفیت باربری ادامه داشته است. در تراکم ۳۵٪ می توان گفت باز شدن صفحه ی دوم تأثیر زیادی بر روی مهار نداشته است و نقش اصلی در باربری مسلح کننده را صفحه مهاری عمیق تر ایفا کرده است. به همین دلیل ظرفیت باربری در فاصله کمتری رخ داده است چون حداکثر ظرفیت باربری تنها به مهار عمیق تر مربوط می باشد.



شکل (۴) نمودارهای ظرفیت باربری-بیرون کشش برای آزمایش های 2BDR35 تا 2BDR80

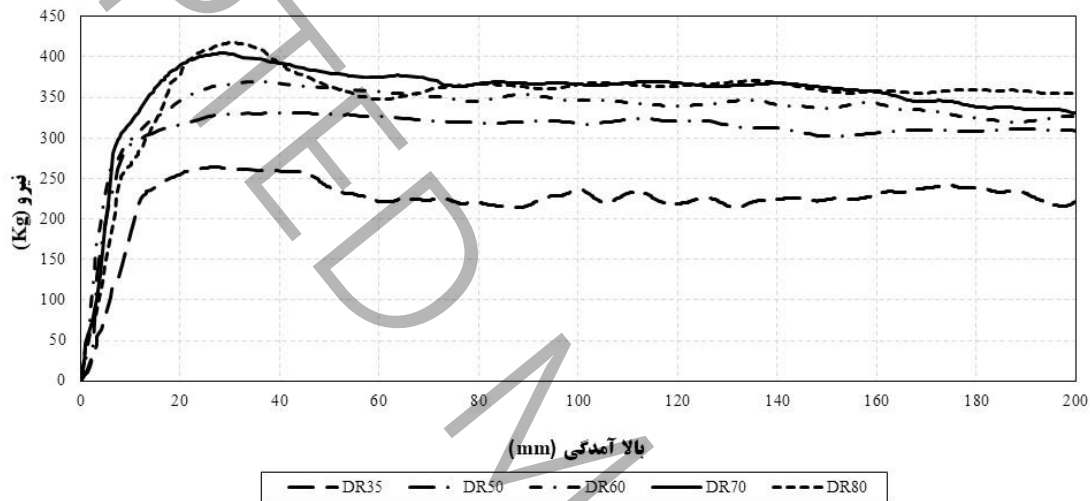
Figure (4) Pull out capacity versus displacement of double plate anchor with 2B distance with DR35 to DR80

۳-۳- مهارهای دوصفحه ای با فواصل ۱/۵B

نتایج آزمایش های مهار دوصفحه ای بافاصله بین صفحه های ۱/۵ برابر عرض صفحه در شکل (۵) نشان داده شده است. همان گونه که از شکل مشخص است، رفتار بیرون کشش مهارها در خاک هایی با تراکم های ۸۰٪ و ۷۰٪ و ۶۰٪ شبیه هم هستند و می توان این گونه استدلال نمود که با کاهش فاصله صفحات از ۲B به ۱/۵B سازوکار بازشدگی و قفل شدگی مسلح کننده در خاک های نیمه متراکم و متراکم نزدیک به یکدیگر خواهد بود. اختلاف بین ظرفیت باربری تراکم ۸۰٪ و ۷۰٪ و نیز ۷۰٪ و ۶۰٪ تقریباً ۳٪ می باشد. اختلاف بین تراکم ۶۰٪ و ۵۰٪ حدود ۸٪ و اختلاف بین تراکم ۵۰٪ و ۳۵٪ حدود ۲۲٪ است. با افزایش تراکم خاک از ۳۵٪ به ۷۰٪ و ۳۵٪ به ۸۰٪ بیشینه ظرفیت باربری مهارهای دوصفحه ای بافاصله ۱/۵B به ترتیب ۳۹/۷٪، ۵۶/۷٪ و ۶۱/۷٪ افزایش می یابد. عمق لازم برای بازشدگی مهارها نیز در تراکم های ۳۵، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰٪ به ترتیب ۲۰/۹، ۳۷/۱، ۳۱/۸، ۲۰/۴ و ۲۶/۵mm بود. که این عمق بازشدگی، کمتر از حالت های تک صفحه ای و دو صفحه بافاصله بین صفحات ۲B است. با بررسی اعداد بیان شده این نتیجه حاصل می گردد که بین تراکم های ۷۰ و ۸۰ و ۶۰٪ اختلاف نیروها چشمگیر نبوده و در تراکم ۷۰٪ مهار زودتر از بقیه تراکم ها باز شده است. باین حال عمق بازشدگی تفاوت چندانی با تراکم ۸۰٪ ندارد و مهار در هر دو حالت تراکم در فاصله ۲cm باز شده است. نمودارها یک روند و رفتار مشابهی در طول پروسه انجام آزمایش ها دارند و دارای شیب ثابتی پس از رسیدن به ظرفیت باربری بیشینه هستند. در تراکم ۸۰٪ مشهود است که شیب نمودار بلافاصله پس از پیک اول رو به پایین حرکت کرده که با باز شدن

صفحه‌ی دوم مجدداً مسلح کننده باربر شده و تا انتهای 200 mm بیرون کشش در همان نیروی ثابت باقی می‌ماند. در تراکم 0.5% بیشینه ظرفیت باربری بعد از جابجایی حدود $37/1\text{ mm}$ اتفاق می‌افتد که این فاصله نسبت به حالت‌های دیگر تراکم، بیشتر بوده و حدود 10 mm از تراکم‌های بالاتر بیشتر است.

بهترین تراکم برای مهار دوصفحه‌ای برای فاصله بین صفحات $1.5B$ را می‌توان تراکم 0.7% عنوان کرد زیرا هم اختلاف اندازه نیرو با تراکم 0.8% بسیار کم است (حدود 3% اختلاف نیرو دارند) و هم مهار در فاصله کمتری در خاک باز شده است. نکته دیگر که می‌توان برای این فاصله $1.5B$ بیان داشت این است که در تمامی تراکم‌ها هر دو صفحه بافاصله زمانی یکسانی باز شده‌اند که این می‌تواند علت اصلی در عدم کاهش ظرفیت باربری مسلح کننده‌ها در طول پروسه انجام آزمایش‌ها باشد.



شکل (۵) نمودارهای ظرفیت باربری-بیرون کشش برای آزمایش‌های $1.5BDR35$ تا $1.5BDR80$

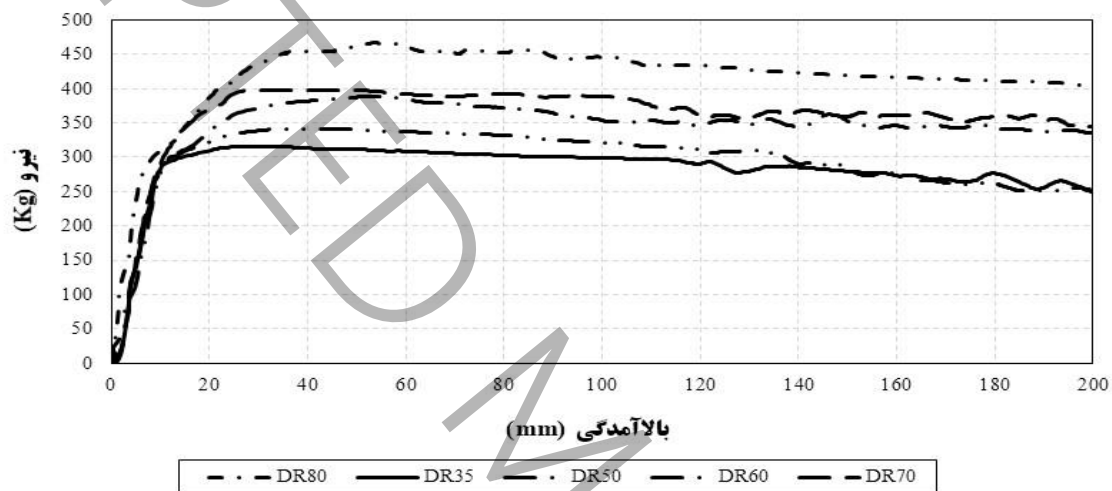
Figure (5) Pull out capacity versus displacement of double plate anchor with 1.5B distance with DR35 to DR80

۳-۴- مهارهای دوصفحه‌ای با فواصل $1B$

در شکل (۶) نمودارهای بار-بیرون کشش برای حالت دوصفحه‌ای بافاصله‌ی بین صفحه‌های 200 mm نشان داده شده است. نکته مهم در این نمودار وجود شیب ثابت و بدون افت در تراکم‌های مختلف است که می‌توان علت آن را نزدیک شدن زیاد صفحات به یکدیگر ذکر کرد. با افزایش تراکم خاک از 35% به 50% ، 60% به 70% و 70% به 80% بیشینه ظرفیت باربری مهارهای دوصفحه‌ای بافاصله $1B$ به ترتیب 8% ، 11% ، 2% و 14% افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش تراکم خاک از 35% به 60% ، 70% و 35% به 80% بیشینه ظرفیت باربری مهارهای دوصفحه‌ای بافاصله $1B$ به ترتیب $23/5\%$ ، $26/1\%$ و $47/4\%$ افزایش یافته است. مهار در تراکم‌های 80% ، 70% ، 60% ، 50% و 35% به ترتیب بعد از گذشت $54/4$ ، $36/1$ ، $54/9$ ، $43/8$ و $33/7\text{ mm}$ باز شده است و به‌مانند فاصله

صفحات ۱/۵B، مهار در تراکم ۰.۷۰٪ در بیرون کشش کمتری نسبت به تراکم‌های دیگر باز شده است. در سمت مقابل، ظرفیت باربری مسلح کننده در این تراکم اختلاف بسیار چشمگیری با تراکم ۰.۸۰٪ دارد.

بازشدگی کامل مهار بافاصله صفحات ۱/۵B، بین ۳۰ و ۶۰ mm بوده است. تراکم ۰.۶۰ و ۰.۸۰٪ تقریباً در یک بیرون کشش باز شده‌اند اما اختلاف بین ظرفیت باربری آن‌ها حدود ۰.۱۶٪ می‌باشد که این نشان‌دهنده تأثیر تراکم در میزان ظرفیت باربری مهار می‌باشد. همچنین در تراکم‌های ۰.۷۰٪ و ۰.۳۵٪ نیز مهار تقریباً در یک بیرون کشش ثابت فعال شده است ولی اختلاف بین ظرفیت باربری مهار حدود ۰.۲۰٪ می‌باشد. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان نتیجه گرفت در فاصله ۱/۵B صفحات، تراکم ۰.۸۰٪ بهترین تأثیر را بر عملکرد باربری مهار داشته است. با این حال، لزوماً تراکم بیشتر باعث افزایش سرعت بازشدگی در این فاصله نخواهد شد.



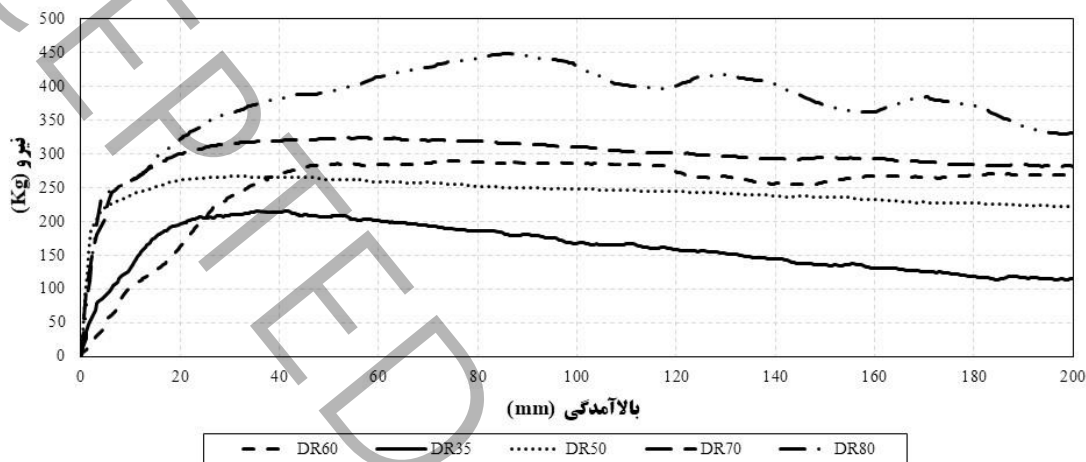
شکل (۶) نمودارهای ظرفیت باربری-بیرون کشش برای آزمایش‌های 1BDR35 تا 1BDR80

Figure (6) Pull out capacity versus displacement of double plate anchor with 1B distance with DR35 to DR80

۵-۳- مهارهای دوصفحه‌ای با فواصل ۰/۵B

در شکل (۷) نمودارهای بار-بیرون کشش برای مهارهای دوصفحه‌ای بافاصله بین صفحات ۱۰۰ mm نشان داده شده است. نکته مهم در این حالت تفاوت آشکار نمودارها با افزایش تراکم‌ها است. اختلاف ظرفیت باربری بین تراکم ۰.۷۰٪ و ۰.۸۰٪ حدود ۰.۲۶٪ می‌باشد که نسبت به فواصل صفحات قبلی (۲B، ۱/۵B و B) بیشتر است. همچنین در تراکم ۰.۸۰٪، یک سیر ملایم صعودی در ظرفیت باربری مهار تا اواسط آزمایش مشاهده شد. این روند در حالی بود که در تراکم‌های ۰.۵۰، ۰.۶۰ و ۰.۷۰٪ نمودارها تقریباً تحت یک شیب یکسانی دچار افت ظرفیت باربری کششی می‌شوند. در تراکم ۰.۳۵٪، افت قابل ملاحظه در ظرفیت باربری مسلح کننده بلافاصله پس از بیشینه ظرفیت باربری مشاهده شد. اختلاف ظرفیت باربری بین تراکم‌های ۰.۳۵، ۰.۵۰، ۰.۶۰ و ۰.۷۰٪ به ترتیب ۰.۲۰٪، ۰.۹٪ و ۰.۹٪ بود. مهار در تراکم ۰.۸۰٪ پس از طی بیرون کشش ۸۹/۸ cm باز شده و این میزان بیرون کشش در تراکم‌های ۰.۷۰، ۰.۶۰٪، ۰.۵۰ و ۰.۳۵٪ به ترتیب

برابر ۵۶/۱، ۷۲/۴، ۴۲/۶، ۴۱/۲mm بوده است. بیشترین فاصله طی شده برای بازشدگی مهار در تراکم ۸۰٪ و کمترین فاصله در تراکم ۳۵٪ رخ داده است. با توجه به بالای ۵۰mm بودن جابجایی موردنیاز در تراکم‌های بالا می‌توان بیان کرد که در این نوع از مهار به علت کم بودن فاصله بین صفحه‌ها، صفحه انتهایی خاک کمتری را درگیر می‌کند و به عبارتی اندرکنش مخربی میان صفحات ایجاد می‌شود که این می‌تواند ناشی از تداخل سطوح گسیختگی صفحه انتهایی با صفحه بالایی باشد.



شکل (۷) نمودارهای ظرفیت باربری-بیرون کشش برای آزمایش‌های 0.5BDR80 تا 0.5BDR35

Figure (7) Pull out capacity versus displacement of double plate anchor with 0.5B distance with DR35 to DR80

۴- جمع‌بندی مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی

با توجه به نمودارها می‌توان بیان داشت که حالت تک‌صفحه‌ای زودتر به بیشینه ظرفیت باربری خود می‌رسد ولی در حالت‌های دوصفحه‌ای این امر زمان بیشتری می‌برد. در مقابل، در حالت دوصفحه‌ای، به علت تفاوت زمانی باز شدن صفحه پایین با بالا زمان بیشتری برای رسیدن به ظرفیت باربری نهایی نیاز است. همین امر باعث شده است که در حالت‌هایی که مسلح‌کننده تک‌صفحه‌ای می‌باشد بعد از رسیدن به بیشینه ظرفیت باربری نمودار با شیب بیشتری نسبت به حالت دوصفحه‌ای افت کند و در حالت دوصفحه‌ای تقریباً با شیب خیلی ملایم‌تر نمودار تنزل کرده و در مواقعی نیز تفاوت زیادی بین بیشینه ظرفیت باربری و نیروی قرائت‌شده در ادامه آزمایش وجود ندارد. این موضوع بیان‌گر تأثیر وجود صفحه دوم در ثابت نگه‌داشتن نیروی مسلح‌کننده تحت یک بیرون‌کشش ثابت خواهد بود.

رفتار بار-بیرون کشش مسلح‌کننده‌های دوصفحه‌ای این‌گونه است که هرچقدر فاصله صفحه‌ها کم می‌شود، بیشینه ظرفیت باربری افزایش پیدا می‌کند؛ اما در حالتی که فاصله صفحه‌ها نصف عرض آن‌ها است، تنها در تراکم اول که بالاترین تراکم است این اتفاق می‌افتد و در بقیه تراکم‌ها ظرفیت باربری به دست آمده در این فاصله کمتر از مقدار ظرفیت باربری حالت‌های دیگر می‌شود. می‌توان این نتیجه را گرفت که فاصله ۰/۵B صفحات تأثیر مخربی بر روی عملکرد مهار و بازشدگی صفحات خواهد داشت.

در حالت تک صفحه‌ای، نمودارها دارای نوسان کمتری نسبت به مهارهای دوصفحه‌ای می‌باشند که می‌توان این موضوع را این گونه بیان کرد که در حالت دوصفحه‌ای فاصله‌ی زمانی بیشتری برای باز شدن صفحه‌ها مورد نیاز است و صفحه‌ها هم‌زمان باهم باز نمی‌شوند. در تراکم بالا با وجود اینکه ظرفیت باربری بیشینه برای حالت تک صفحه‌ای بوده اما نمودارهای مهارهای تک صفحه‌ای برتری خود را حفظ نمی‌کنند و دچار یک افت باربری قابل ملاحظه‌ای در ادامه بیرون کشش‌ها می‌شوند. به عبارت دیگر، با باز شدن صفحه‌ی دوم در حالت دوصفحه‌ای ظرفیت باربری مهار مجدداً افزایش یافته و از مهار تک صفحه‌ای پیشی می‌گیرد.

در جدول (۳) بیشینه ظرفیت باربری کششی مهارها در تراکم‌های مختلف ارائه شده است. می‌توان این نتیجه را برداشت کرد که مهار تک صفحه‌ای در تراکم‌های بالا بهتر از مهار دوصفحه‌ای عمل می‌کند، اما در تراکم‌های پایین مهارهای دوصفحه‌ای در حالتی که فاصله بین صفحه‌ها $1/5B$ باشد، بالاترین ظرفیت باربری را نتیجه می‌دهند. با توجه به این موضوع می‌توان بهترین فاصله بین مهار دوصفحه‌ای را فاصله‌ی $1B$ و $1/5B$ بیان کرد. همان‌طور که مشخص است در فاصله $0/5B$ بیشینه ظرفیت‌های باربری کاهش چشمگیری دارند که می‌توان نتیجه گرفت فاصله صفحه بالا آن قدر به صفحه پایین نزدیک شده که باعث عدم بازشدگی مناسب توده خاک بالای صفحه انتهایی و یا تداخل این توده با صفحه بالای خود شده است.

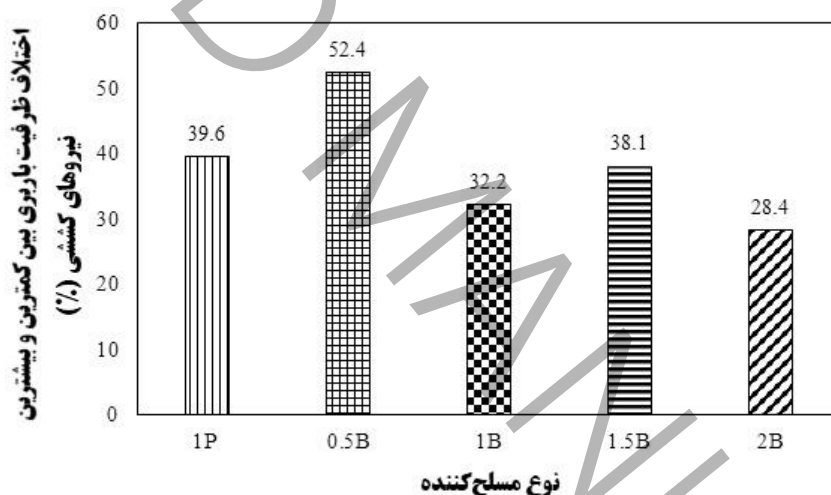
جدول (۳) بیشینه ظرفیت باربری به دست آمده از مهارها

Table (3) The maximum pull capacity

درصد تراکم نسبی، %	تک صفحه‌ای	دوصفحه‌ای فاصله $0/5B$	دوصفحه‌ای فاصله $1B$	دوصفحه‌ای فاصله $1/5B$	دوصفحه‌ای فاصله $2B$
۸۰	۴۹۹	۴۵۰	۴۶۹	۴۱۹	۳۹۴
۷۰	۴۵۹	۳۳۱	۴۰۱	۴۰۶	۳۷۹
۶۰	۳۷۳	۲۹۸	۳۹۳	۳۶۳	۳۳۳
۵۰	۳۳۱	۲۶۹	۳۴۷	۳۳۳	۳۱۹
۳۵	۳۰۱	۲۱۴	۳۱۸	۲۵۹	۲۷۸

بیشترین تأثیر تراکم لزوماً باعث به دست آوردن بیشترین ظرفیت باربری حداکثر نخواهد شد. بیشترین ظرفیت باربری حداکثر بر اساس بیشترین مساحت مؤثر صفحات ایجاد خواهد شد و زمانی که مساحت‌ها برابر می‌باشند، می‌توان به تأثیر فاصله‌های صفحات پرداخت. همچنین بیشترین تأثیر تراکم در افزایش نیروها در تراکم‌های ۷۰ و ۸۰٪ بر روی حالت دوصفحه‌ای زمانی که فاصله بین صفحات نصف عرض می‌باشد، بوده است. کمترین تأثیر بر روی مهار دوصفحه‌ای زمانی که فاصله بین صفحات $1/5$ برابر عرض می‌باشد، بیشترین تأثیر تراکم در افزایش نیروها در تراکم‌های ۳۵ و ۵۰٪ بر روی حالت دوصفحه‌ای زمانی که فاصله بین صفحات $1/5$ برابر عرض می‌باشد، بود. کمترین تأثیر بر روی حالت دوصفحه‌ای در حالتی که فاصله بین صفحات نصف عرض بود، مشاهده شد. بدین ترتیب، بیشترین تأثیر تراکم برای تراکم‌های $60\% - 70\%$ و $50\% - 60\%$ مربوط به مهار تک صفحه‌ای و به اندازه ۱۸ و ۱۱٪ می‌باشد و کمترین تأثیر تراکم برای تراکم‌های $60\% - 70\%$ و $50\% - 60\%$ به ترتیب مربوط به مهار دوصفحه‌ای با فاصله بین صفحات B (۲٪) و مهار دوصفحه‌ای با فاصله بین صفحات $2B$ (۴٪) می‌باشند.

در شکل (۸) میزان اختلاف بین کمترین نیرو و بیشترین نیروی ایجاد شده بر روی مهارهای تک و دوصفحه‌ای نشان داده شده است. مشاهده شد که افزایش تراکم بیشترین تأثیر را بر روی افزایش ظرفیت باربری بر روی حالت دوصفحه‌ای بافاصله بین صفحات ۰/۵B داشته است و کمترین تأثیر بر روی حالت دوصفحه‌ای بافاصله بین صفحات ۲B است. در حالت تک‌صفحه‌ای افزایش تراکم باعث افزایش نیرو به میزان ۳۹/۶٪ شده است که با مقایسه باحالت‌های دیگر (نمودار شکل ۸) می‌توان بیان کرد که مقدار افزایش در این حالت (حالت تک‌صفحه‌ای) بیشتر از تمامی مهارهای دوصفحه‌ای بوده است (به جز حالت دوصفحه‌ای بافاصله بین صفحات نصف عرض که در این حالت تأثیر تراکم در افزایش نیرو حدود ۵۲/۴٪ که ناشی از عدم باز شدن صفحات به صورت پیوسته در تراکم ۳۵٪ می‌باشد). همان‌گونه که بیان شد، بالاترین نیروی به دست آمده در حالت دوصفحه‌ای حالت‌های ۱B و ۰/۵B بوده است که با توجه به نمودار شکل (۸) مشخص شد که مقدار تأثیر تراکم در افزایش نیرو در حالت ۱B از حالت ۱/۵B کمتر بوده است. باین حال، مقدار نیروی کسب شده در مهار ۱B به اندازه ۱۰٪ بیشتر از حالت ۱/۵B بوده است. در حالت تک‌صفحه‌ای اختلاف بین کمترین نیرو و بیشترین نیرو در تراکم‌های مختلف ۳۹/۶٪ بوده که بیشتر از حالت ۱B نیز می‌باشد. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان نتیجه گرفت فاصله نسبت به تراکم نقش مؤثرتری در افزایش ظرفیت باربری داشته است؛ زیرا بیشترین اختلاف بین نیروها ناشی از افزایش تراکم در حالت ۰/۵B ایجاد شده است. این موضوع را می‌توان با مقایسه بین حالت ۱B و ۱/۵B نیز بیان کرد (اختلاف بین کمترین نیرو و بیشترین نیرو در حالت ۱/۵B از حالت ۱B بیشتر است).



شکل (۸) تأثیر تعداد و فاصله صفحات بر ظرفیت باربری مهارها

Figure (8) The effect of the number and distance of plate anchors on Pull out capacity

در جدول (۴) ظرفیت باربری باقیمانده در مسلح کننده‌ها نشان شده است. در حالت دوصفحه‌ای با کاهش تراکم، مقاومت نهایی نیز کاهش پیدا می‌کند، اما در حالت تک‌صفحه‌ای این کاهش ظرفیت باربری نهایی بدین گونه وجود ندارد که بیانگر این موضوع است با افزایش سطح مقطع، مقدار خاکی که پشت صفحه‌های مهار در حالت بسته قرار می‌گیرد، بیشتر است و در نتیجه ظرفیت باربری بیشتری برای جلوگیری از باز شدن صفحه‌های مهار به مهار اعمال می‌شود. در تراکم‌های بالا، بالاترین ظرفیت باربری نهایی مربوط

به مهار دوصفحه‌ای بافاصله صفحات ۱B می‌باشد. این در حالی است که در تراکم‌های پایین، مهارهای بافاصله صفحات ۱/۵B دارای عملکرد بهتری در تحمل نیروی کششی دائمی بوده‌اند.

جدول (۴) ظرفیت باربری نهایی مهارها
Table4- The residual pull capacity

دوصفحه‌ای فاصله ۴۰۰mm	دوصفحه‌ای فاصله ۳۰۰mm	دوصفحه‌ای فاصله ۲۰۰mm	دوصفحه‌ای فاصله ۱۰۰mm	تک‌صفحه‌ای به عرض ۲۸۳mm	درصد تراکم نسبی %
۳۵۵	۳۵۳	۴۰۳	۳۲۹	۳۳۱	۸۰
۳۰۰	۳۲۷	۳۴۳	۲۷۹	۳۶۱	۷۰
۲۸۳	۳۲۶	۳۳۵	۲۵۹	۱۷۱	۶۰
۲۷۸	۳۰۴	۲۵۰	۲۲۱	۲۲۰	۵۰
۱۵۷	۲۴۱	۲۵۲	۱۱۳	۱۵۳	۳۵

به‌طور کلی سرعت باز شدن مهارها رکن اساسی را در مقدار ظرفیت باربری مهارها دارد و هر عاملی که سرعت باز شدن مهارها را تغییر دهد، می‌تواند بر روی ظرفیت باربری نیز تأثیر مستقیم و اصلی را داشته باشد؛ تأثیری که حتی بیشتر از عواملی مانند مساحت و تراکم نیز خواهد بود. در جدول (۵) بیرون کشش‌های موردنیاز و عمق مدفون‌شدگی نهایی برای باز شدن مهارهای تک صفحه و دو صفحه با فواصل صفحات مختلف، برای تراکم‌های مختلف، آورده شده است. بیشترین جابجایی برای بازشدگی مهارها، برای مهار دوصفحه‌ای بافاصله بین صفحات ۲B بوده (حدود ۱۴۵mm در تراکم ۰/۸۰) و کمترین جابجایی برای مهار دوصفحه‌ای بافاصله بین صفحات ۱/۵B می‌باشد (حدود ۲۰/۴mm در حالت تراکم ۰/۷۰). با مقایسه جابجایی موردنیاز برای حالت تک‌صفحه‌ای و دوصفحه‌ای می‌توان این نتیجه را برداشت کرد که عموماً جابجایی موردنیاز در حالت تک‌صفحه‌ای بیشتر از دوصفحه‌ای می‌باشد، به‌جز حالتی که فاصله بین صفحات دو برابر عرض است که علت آن را می‌توان کم بودن خاک بالای صفحه بالایی (صفحه نزدیک به سطح زمین) بیان کرد. با میانگین‌گیری بین فاصله‌های مختلف هر مهار در تراکم‌های مختلف و زمانی که مهار باز شده و به بیشینه نیروی خود رسیده است، می‌توان به بررسی کلی سرعت بازشدگی مهار پرداخت. هدف از میانگین‌گیری این است که بتوان تأثیر فاصله‌ها را در سرعت بازشدگی مهار بدون در نظر گرفتن تأثیر مستقیم تراکم بر روی بازشدگی مهار بررسی کرد. میانگین فاصله بازشدگی مهار در حالت تک‌صفحه‌ای باحالت دوصفحه‌ای در حالتی که فاصله بین صفحات نصف عرض صفحات است، تقریباً برابر است که علت آن را می‌توان کم بودن فاصله بین دو صفحه در حالت ۰/۵B دانست به‌طوری‌که همین امر باعث شده صفحه پایین نتواند سرعت لازم را برای باز شدن داشته باشد. با مقایسه بین حالت ۰/۵B و ۲B (به‌عنوان کمترین و بیشترین فاصله قرارگیری بین صفحات مهارها) مشاهده می‌شود که عدد به‌دست‌آمده در حالت ۰/۵B کمتر از حالت ۲B می‌باشد (در حالت دوصفحه‌ای به‌طور میانگین ۸۰mm برای بازشدگی مهار نیاز است که بیشترین جابجایی نیز متعلق به این نوع مهار می‌باشد) به‌طور کلی از میانگین بازشدگی مهارها می‌توان نتیجه گرفت مهار بافاصله بین صفحات ۱/۵B بسیار سریع‌تر از مهارهای دیگر باز می‌شود. پس‌از آن، مهار بافاصله بین صفحات B، مهار بافاصله بین صفحات ۰/۵B، مهار تک‌صفحه‌ای، و مهار دوصفحه‌ای بافاصله بین صفحات ۲B قرار دارند. اختلاف بین بیشترین

سرعت بازشدگی با کمترین سرعت بازشدگی حدود ۶۵٪ می‌باشد که اختلاف بسیار زیادی بوده که این تأثیر فاصله بین صفحات و گوه تشکیل شده بر روی آن‌ها تحت تغییر تراکم خاک را نشان می‌دهد.

جدول (۵) بیرون کشش‌های موردنیاز برای بازشدگی مهارها و عمق‌های مدفون‌شدگی نهایی آن‌ها

Table(5) Required distance for explanation of the anchors

برچسب آزمایش	تراکم	مقدار جابجایی متوسط انکر برای به دست آمدن حداکثر نیرو انکر (Δ_{max}) (mm)	حداکثر جابجایی مهارها ($\Delta_{ultimate}$) (mm)	میانگین حداکثر مسافت طی شده (mm)	عمق لازم بازشدگی مهارها (mm)
DR35	٪۳۵	۷۲/۵	۲۰۰	۶۳/۶	۸۲۷/۵
DR50	٪۵۰	۴۳/۸	۲۰۰		۸۵۶/۲
DR60	٪۶۰	۵۰/۱	۲۰۰		۸۴۹/۹
DR70	٪۷۰	۱۱۶/۳	۲۰۰		۷۸۳/۷
DR80	٪۸۰	۳۵/۴	۲۰۰		۸۶۴/۶
2BDR35	٪۳۵	۲۶/۸	۲۰۰	۸۰/۲۴	۸۷۳/۲
2BDR50	٪۵۰	۷۴/۱	۲۰۰		۸۲۵/۹
2BDR60	٪۶۰	۹۲/۹	۲۰۰		۸۰۷/۱
2BDR70	٪۷۰	۶۲/۴	۲۰۰		۸۳۷/۶
2BDR80	٪۸۰	۱۴۵	۲۰۰		۷۵۵
1.5BDR35	٪۳۵	۲۰/۹	۲۰۰	۲۷/۳۴	۸۷۹/۱
1.5BDR50	٪۵۰	۳۷/۱	۲۰۰		۸۶۲/۹
1.5BDR60	٪۶۰	۳۱/۸	۲۰۰		۸۶۸/۲
1.5BDR70	٪۷۰	۲۰/۴	۲۰۰		۸۷۹/۶
1.5BDR80	٪۸۰	۲۶/۵	۲۰۰		۸۷۳/۵
1BDR35	٪۳۵	۳۳/۷	۲۰۰	۴۴/۵۸	۸۶۶/۳
1BDR50	٪۵۰	۴۳/۸	۲۰۰		۸۵۶/۲
1BDR60	٪۶۰	۵۴/۹	۲۰۰		۸۴۵/۱
1BDR70	٪۷۰	۳۶/۱	۲۰۰		۸۶۳/۹
1BDR80	٪۸۰	۵۴/۴	۲۰۰		۸۴۵/۶
0.5BDR35	٪۳۵	۴۱/۲	۲۰۰	۶۰/۴۲	۸۵۸/۸
0.5BDR50	٪۵۰	۴۲/۶	۲۰۰		۸۵۷/۴
0.5BDR60	٪۶۰	۷۲/۴	۲۰۰		۸۲۷/۶
0.5BDR70	٪۷۰	۵۶/۱	۲۰۰		۸۴۳/۹
0.5BDR80	٪۸۰	۸۹/۸	۲۰۰		۸۱۰/۲

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با انجام بیرون کشش‌های آزمایشگاهی بر روی مهارهای چندصفحه‌ای بازشونده، میزان تأثیر تراکم خاک و فاصله صفحات از یکدیگر بر روی عملکرد کلی مهارها نظیر سرعت قفل‌شدگی و بازشدگی آن‌ها در خاک و به دنبال آن ظرفیت باربری نهایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که:

- در حالتی که تراکم برابر ۸۰٪ می‌باشد، بیشترین ظرفیت باربری به دست آمده مربوط به حالت تک‌صفحه‌ای است که برابر ۴۹۹ Kg می‌باشد این مقدار ۶/۰۱۲٪ بیشتر از بالاترین ظرفیت باربری به دست آمده در حالت دو صفحه‌ای می‌باشد. اما در حالتی که تراکم نسبی ۳۵٪ است و خاک در شرایط سست می‌باشد ظرفیت باربری در حالت تک‌صفحه‌ای برابر ۳۰۱ Kg است که ۵/۳۴٪ کمتر از حالت دو صفحه‌ای می‌باشد. در نتیجه می‌توان بیان کرد که در تراکم‌های بالا مهار تک‌صفحه‌ای دارای ظرفیت باربری بالاتری خواهد بود اما در تراکم‌های پایین ظرفیت باربری مهار دو صفحه‌ای (به شرط انتخاب درست فاصله) بیشتر خواهد شد.
- در حالت مهار تک‌صفحه‌ای پس از رسیدن به ظرفیت حداکثر با شیب بیشتری نسبت به حالت دو صفحه‌ای دچار افت می‌شود. در تراکم‌های ۸۰، ۷۰، ۶۰، ۵۰ و ۳۵٪ در حالت دو صفحه‌ای نمودار تقریباً با شیب خیلی ملایم‌تری پایین می‌آید و در بعضی از حالت‌های تراکم تفاوت زیادی بین ظرفیت باربری حداکثر و ظرفیت باربری کل نمودار وجود ندارد که بیانگر تأثیر وجود صفحه دوم در ثابت شدن شیب نمودار و جلوگیری از افت ظرفیت باربری است.
- در تراکم ۸۰٪، در حالت دو صفحه‌ای که فاصله صفحه‌ها نصف عرض آن‌ها است، فضای خالی کمتری شکل می‌گیرد که این موضوع در بقیه تراکم‌ها در این حالت اتفاق نمی‌افتد. همچنین، در صفحه‌های تک‌صفحه‌ای 283 mm^2 و حالتی که فاصله بین صفحه‌ها ۲۰۰ mm می‌باشد، بالاترین ظرفیت باربری ایجاد شده است. با دقت به حالت دو صفحه‌ای زمانی که فاصله بین صفحه‌ها ۲۰۰ mm می‌باشد و بررسی تأثیر تراکم بر روی افزایش ظرفیت باربری در این حالت که ۳۲/۲٪ می‌باشد. می‌توان بیان کرد که فاصله صفحه‌ها تأثیر بیشتری نسبت به تراکم بر روی ظرفیت باربری دارد.
- با توجه به نمودار حالت مهار تک‌صفحه‌ای 283 mm^2 می‌توان بیان کرد تراکم تأثیر بیشتری بر روی حالت تک‌صفحه‌ای دارد. بیشترین تأثیر تراکم بر روی ۵B است که باعث افزایش حدود ۵۲/۴٪ نیرو شده است. علت آن را می‌توان وجود فاصله کم بین صفحه‌ها دانست که با تراکم بیشتر ذرات خاک بیشتری بین دو صفحه قرار خواهند گرفت و از ایجاد فضای خالی بین صفحه‌ها جلوگیری می‌شود. به طور کلی، با مقایسه حالت تک‌صفحه‌ای معادل و حالت دو صفحه‌ای در نمودارهای تراکم در حالت‌های ۸۰، ۷۰، ۶۰، ۵۰ و ۳۵٪ می‌توان بیان کرد که در حالت دو صفحه‌ای بالا رفتن تراکم لزوماً باعث به دست آوردن بیشترین ظرفیت باربری نخواهد شد.

۵_ منابع

- [۱] R.L. Copstead, D.D. Studier, An earth anchor system: installation and design guide. (۱۹۹۰)
- [۲] J.T. Shelton, OMNI-Maxtrade anchor development and technology, in: OCEANS 2007, IEEE, 2007, pp. 1-10.
- [۳] M. Randolph, S. Gourvenec, D. White, M. Cassidy, Offshore geotechnical engineering, Spon Press New York, 2011.

- [٤] B.M. Das, S.K. Shukla, Earth anchors, J. Ross Publishing, 2013.
- [٥] C. Gaudin, C. O'Loughlin, M. Randolph, M. Cassidy, D. Wang, Y. Tian, J. Hambleton, R. Merifield, Advances in offshore and onshore anchoring solutions, Australian Geomechanics, 49(4) (2014) 59-72.
- [٦] C. O'Loughlin, A. Blake, M. Richardson, M. Randolph, C. Gaudin, Installation and capacity of dynamically embedded plate anchors as assessed through centrifuge tests, Ocean Engineering, 88 (2014) 204-213.
- [٧] C. O'Loughlin, D. White, S. Stanier, Novel anchoring solutions for FLNG-Opportunities driven by scale, in: Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference, 2015.
- [٨] A. Ghaly, A. Hanna, M. Hanna, Uplift behavior of screw anchors in sand. I: dry sand, Journal of Geotechnical Engineering, 117(5) (1991) 773-793.
- [٩] A.J. Lutenegeger, Behavior of multi-helix screw anchors in sand, in: Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Toronto, Ont.[CD ROM], 2011.
- [١٠] C.d.H.C. Tsuha, N. Aoki, G. Rault, L. Thorel, J. Garnier, Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests, Canadian Geotechnical Journal, 49(9) (2012) 1102-111.
- [١١] S. Mittal, S. Mukherjee, Vertical uplift capacity of a group of helical screw anchors in sand, Indian Geotechnical Journal, 43(3) (2013) 238-250.
- [١٢] B. Cerfontaine, J.A. Knappett, M.J. Brown, A.S. Bradshaw, Effect of soil deformability on the failure mechanism of shallow plate or screw anchors in sand, Computers and Geotechnics, 109 (2019) 34-45.
- [١٣] J. Kumar, K. Kouzer, Vertical uplift capacity of a group of shallow horizontal anchors in sand, Géotechnique, 58(10) (2008) 821-823.
- [١٤] M. Yang, C.P. Aubeny, J.D. Murff, Behavior of suction embedded plate anchors during keying process, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(2) (2012) 174-183.
- [١٥] A. Bera, U. Banerjee, Uplift capacity of model bell shaped anchor embedded in sand, International Journal of Geotechnical Engineering, 7(1) (2013) 84-90.
- [١٦] B.D. Diaz, M. Rasulo, C.P. Aubeny, C.M. Fontana, S.R. Arwade, D.J. DeGroot, M. Landon, Multiline anchors for floating offshore wind towers, in: OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, IEEE, 2016, pp. 1-9.
- [١٧] G. Spagnoli, C. de Hollanda Cavalcanti Tsuha, P. Oreste, C. Mauricio Mendez Solarte, Estimation of uplift capacity and installation power of helical piles in sand for offshore structures, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 144(6) (2018) 04018019.
- [١٨] F. Liang, H. Zheng, H. Zhang, On the pile tension capacity of scoured tripod foundation supporting offshore wind turbines, Applied Ocean Research, 102 (2020) 102323.
- [١٩] S. Vicent, S.-R. Kim, Evaluation of horizontal and vertical bearing capacities of offshore bucket work platforms in sand, Applied Ocean Research, 101 (2020) 102198.
- [٢٠] V. Bolandnazar, M. Hajjalilue, J. Safadost, Experimental investigation bearing pull-out of single and grupe multi plate anchors in granular soil, in: The fourth national conference of geotechnical engineering of Iran 1398 (in persian).
- [٢١] N. Dastaran, M. Jalali Moghadam, A. Zad, Introduction and Determination of the New Generation of Mechanical Anchors for Using As a Geotechnical Supporting System Journal of civil and environmental engineering of Tabriz University, 51.3(104) (2021) 55-66 (in persian).
- [٢٢] A. Roy, S.H. Chow, M.F. Randolph, C.D. O'loughlin, Consolidation effects on uplift capacity of shallow horizontal plate anchors in dilating sand, Géotechnique, 72(11) (2022) 957-973.
- [٢٣] A. Roy, C.D. O'loughlin, S.H. Chow, M.F. Randolph, Inclined loading of horizontal plate anchors in sand, Géotechnique, 72(12) (2022) 1051-1067.

- [24] Y.-X. Gao, H.-H. Zhu, Y.-F. Ni, C. Wei, B. Shi, Experimental study on uplift behavior of shallow anchor plates in geogrid-reinforced soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 50(5) (2022) 994-1003.
- [25] S. Ravishankar, S. Banerjee, Sarvesh, S. Mukherjee, Static, cyclic, and post-cyclic pullout response of horizontal plate anchors in reinforced soft clay, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 8(3) (2022) 37.
- [26] P.-Z. Zhuang, H.-Y. Yue, X.-G. Song, H. Yang, H.-b. Zhang, H.-S. Yu, Pullout behaviour of inclined shallow plate anchors in sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 59(2) (2022) 239-253.
- [27] V.B. Tilak, N.K. Samadhiya, Pullout capacity of Circular Multi-plate Inclined Anchors in Sand: An Experimental Study, *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(4) (2023) (2023)
- [28] L. Zhao, X. Gong, S. Hu, Y. Tan, Z. Zhao, Effects of Heterogeneity and Nonlinearity on Uplift Characteristics of Shallow Horizontal Anchor Plates, *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(2) (2023) 1615-1634.
- [29] M. Amjadi, H.R. Mohammadkhanifard, A. Tohidi, A. Zad, Comparing pull-out capacity of expandable anchors using discrete/coupled Eulerian element methods versus finite element technique, *Marine Georesources & Geotechnology*, (2023) 1-16.
- [30] M.j. Moghadam, N. Dastaran, A. Zad, Introducing expandable mechanical plate anchors for onshore and offshore anchoring. (2023)
- [31] A. Bradshaw, J. Giampa, H. Gerkus, S. Jalilvand, J. Fanning, S. Nanda, R. Gilbert, K. Gavin, V. Sivakumar, Scaling considerations for 1-g model horizontal plate anchor tests in sand, *Geotechnical Testing Journal*, 39(6) (2016) 1006-1014.
- [32] S.T.M.f.M.I.D.a.U.W.o.S.a.C.o.R.D. ASTM D4254-16, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org, in, 2016.
- [33] S.T.M.f.M.I.D.a.U.W.o.S.U.a.V.T. ASTM D4254-16, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org, in, 2016.
- [34] S.T.M.f.D.S.T.o.S.U.C.D.C. ASTM D3080-04, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004, www.astm.org, in, 2004.
- [35] M.E. Bychkowski, Pullout resistance of soil anchors in cohesionless soil under varying velocities by experimental methods. (2016)
- [36] W.H. Baker, R.L. Konder, Pullout load capacity of a circular earth anchor buried in sand, *Highway Research Record*, (108) (1966)
- [37] M.S. Keskin, Model studies of uplift capacity behavior of square plate anchors in geogrid-reinforced sand, *Geomechanics & engineering*, 8(4) (2015) 595-613.

Evaluating the capacity of the Multi-Plate Mechanical Anchors in Granular Soils

Abstract

Nowadays, humans have thought of creating structures and platforms onshore and offshore to provide energy. Until now, various anchors with different shapes have been introduced for strength and stability of platforms, for offshore and onshore applications. In this research, a new type of expendable multi-plate anchors is proposed with the ability to expand the plates in the soil with lower energy. As these anchors are recently introduced, their bearing capacity has not been extensively evaluated. In this research, the behavior of these anchors was investigated experimentally. The evaluated parameters are soil compaction and distance between plates on the maximum pull-out capacity of them. Firstly the performance of single plate anchors was compared with the double plate anchors with equivalent areas then the effect of above mentioned parameters was determined for double plate anchors. Based on the experimental results, single-plate shows higher bearing capacity in high soil compaction, but in low soil compaction, the bearing capacity of the double plate capacity is increased. The effect of the distance between the plates on the final bearing capacity has been far greater than the effect of the change in soil density. Also, 4 different soil compaction and distance between two plates for a double plate were investigated. Overall the effects of distance between two plates have more impact on bearing capacity in comparison to soil compaction.

Keywords: Multi-Plate Mechanical Anchor; Onshore and Offshore, Expandable Plate Anchors. Soil Compaction