



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

Hamid reza Mohammadkhanifard ^{1b}, AmirAli zad *^{1b}, Mahsa Amjadi ^{1b}

Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran

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

Review History:

Received: Apr. 28, 2023

Revised: Apr. 23, 2024

Accepted: May, 05, 2024

Available Online: May, 21, 2024

Keywords:

Multi-Plate Mechanical Anchor

Onshore and Offshore

Expandable Plate Anchors

Soil Compaction

1- Introduction

Different types of mooring systems are utilized in the sea, each designed for varying installation conditions. In some cases, these conditions make their use cost-effective. Consequently, many researchers have endeavored to identify the best type of mooring system by examining parameters such as penetration depth, opening speed, locking mechanism, and final load capacity under different conditions. Various mooring systems have been proposed based on their apparent shape, which has led to differences in their load-carrying capacity. Among the mechanical mooring systems used both on land and at sea, we can mention simple horizontal, inclined, and vertical flat plate moorings, fixed moorings, multi-page moorings, cross moorings, opening moorings, spiral moorings, angle moorings, vertically loaded moorings (VLA), moorings with embedded suction plate (SEPLA), deep placement flat plate moorings (DEPLA) such as Omnimax moorings, and dynamic moorings, volume moorings (caisson), gravitational attraction moorings, and so forth [1-6].

Kumar and Kozar[7] investigated the load-bearing capacity of several mooring systems with shallow horizontal plates in soil. They stated that if the distance between mooring systems placed next to each other is more than twice

the depth of placement in the tangent of the internal friction angle of the soil, no interference occurs between the rupture discs. However, if the spacing of the plates is less than the specified amount, interference occurs between the rupture discs, leading to a reduction in load-bearing capacity.

Amjadi et al [8] numerically examined the behavior of multi-page mooring systems and evaluated methods such as finite element analysis, extended finite element analysis, and separate elements. The comparison of numerical and experimental results showed that the extended finite element method provides a more accurate prediction of the behavior of these mooring systems. In this study, parameters such as the geometry of the mooring, soil density, spacing between plates, and the number of plates were evaluated. Numerical modeling results indicated that with an increase in the number of plates, the outward extension capacity increases from a single plate state to a double plate state, but there is little change in the outward extension capacity when transitioning from a double plate mooring to a triple plate mooring.

2- Methodology

The mooring plates are made of steel and have a thickness of 3mm to prevent deformation. The size of the plates in both single-plate and double-plate conditions is the same, and

*Corresponding author's email: a.zad@iauctb.ac.ir.



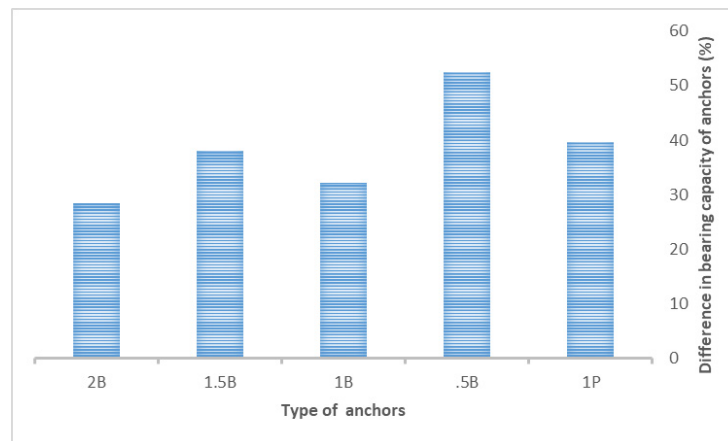


Fig. 1. Difference in bearing capacity of anchors and type of anchors

the dimensions used for the single-plate and double-plate conditions are 28.3 * 28.3 cm and 20*20 cm (total area = 800 cm²). The 20*20 cm plates form the double-plate mooring system, equivalent to a single-plate mooring system with dimensions of 28.3 * 28.3 cm. To connect the plates to the mooring rod, 4 rivets were used, which are welded on both sides of the plates. These rivets are connected to a circular-shaped movable and fixed holder piece on the mooring rod using screws. The movable piece is screwed onto the mooring rod at the desired height, where previously drilled holes for screwing and connecting the movable piece on it have been considered to prevent movement of the sleeve after selecting the desired distance. The test chamber consists of a soil box with dimensions of 1*1*1 (m³) and a steel frame for positioning the loading device at a specific height. The loading device is equipped with a 1.5 horsepower (hp 5/1) motor operating at 1420 rpm, a gearbox with a power of 5.7 kg, and a data logger for controlling speed and data extraction. The force is measured by a force sensor with a capacity of 2 tons and a precision of 1/0 g. Furthermore, a digital ruler with a length of m1 and a precision of mm1/0 is used to measure the displacement of the plates. A rod transfers the force from within the gearbox to the bottom, where it is connected to the force sensor. At the bottom of the force sensor, the mooring rod is positioned, and the plates are mounted on the mooring rod. Both the force sensor and the digital ruler are paired to ensure highly accurate results. The data logger regulates the motor speed to prevent it from exceeding or falling below the permissible limits. To enhance measurement accuracy, a display is used for measuring force.

3- Results and Discussion

In Figure 1, the difference between the minimum and maximum forces applied on single and double-plate mooring systems is depicted. It was observed that the increase in density had the greatest impact on increasing the load-bearing

capacity on the double-plate condition with a plate spacing of .5B, and the least impact on the double-plate condition with a plate spacing of 2B. In the single-plate condition, the increase in density resulted in a force increase of 39.6%, which, when compared with other conditions (as shown in Figure 1), indicates that the increase in this condition (single-plate condition) was greater than all double-plate conditions (except for the double-plate condition with half-width spacing, where the effect of density on force increase was approximately 52.4%, due to the inability of the plates to open continuously at a density of 35%). As mentioned, the highest force achieved in the double-plate condition was in states 1B and .5B, as indicated by Figure 1, showing that the effect of density on force increase in state 1B was less than in state 1.5B. However, the force obtained in mooring B1 was 10% higher than in-state 1.5B. In the single-plate condition, the difference between the minimum and maximum forces varied by 39.6% across different densities, which was greater than in-state 2B. Considering the information provided, it can be concluded that the distance relative to density plays a more significant role in increasing load-bearing capacity; since the greatest difference between forces was caused by the increase in density in state .5B. This can also be illustrated by comparing state 1B and 1.5B (the difference between the minimum and maximum forces in state 1.5B was greater than in state 1B).

In summary, the rate at which mooring systems open is a fundamental factor in determining the load-bearing capacity of these systems, and any factor that changes the rate of opening can directly and significantly affect the load-bearing capacity; an effect that will be even greater than factors such as area and density. The greatest displacement for the opening of mooring systems occurred in the double-plate mooring system with a plate spacing of B2 (approximately mm145 at a density of 80%), and the least displacement for the double-plate mooring system with a plate spacing of B5/1 (approximately

mm⁴/20 at a density of 70%). By comparing the displacement required for the single-plate and double-plate conditions, it can be inferred that generally, the displacement required in the single-plate condition is greater than in the double-plate condition, except in a case where the spacing between the plates is twice the width, which can be attributed to the lesser amount of soil above the upper plate (the plate closest to the ground level). By averaging the different spacings of each mooring system at various densities and when the mooring system has opened and reached its maximum force, a general examination of the opening rate of the mooring system can be conducted.

4- Conclusions

In the single-plate mooring system, after reaching its maximum capacity, it experiences a steeper decline compared to the double-plate system. In densities of 80%, 70%, 60%, 50%, and 35%, the double-plate system's diagram descends at a much gentler slope, and in some density conditions, there is no significant difference between the maximum load-bearing capacity and the total load-bearing capacity of the diagram, indicating the stabilizing effect of the second plate on the slope of the diagram and preventing the decline in load-bearing capacity.

Based on the diagram of the single-plate mooring system with dimensions of 283*mm², it can be stated that density has a greater impact on the single-plate condition. The greatest effect of density on β is about 52.4%, which increases the force. The reason for this can be attributed to the small spacing between the plates, which allows more soil particles

to be placed between the two plates with higher density, preventing the formation of empty spaces between the plates.

References

- [1] Copstead, R.L., An earth anchor system: installation and design guide. Vol. 9324. 1993: USDA Forest Service, Technology & Development Program.
- [2] Shelton, J.T. OMNI-Maxtrade anchor development and technology. in OCEANS 2007. 2007. IEEE.
- [3] Randolph, M. and S. Gourvenec, Offshore geotechnical engineering. 2017: CRC press.
- [4] Das, B.M. and S.K. Shukla, Earth anchors. 2013: J. Ross Publishing.
- [5] O'Loughlin, C., et al., Installation and capacity of dynamically embedded plate anchors as assessed through centrifuge tests. *Ocean Engineering*, 2014. 88: p. 204-213.
- [6] O'Loughlin, C., D. White, and S. Stanier. Novel anchoring solutions for FLNG-Opportunities driven by scale. in *Offshore Technology Conference*. 2015. Offshore Technology Conference.
- [7] Kumar, J. and K. Kouzer, Vertical uplift capacity of a group of shallow horizontal anchors in sand. *Géotechnique*, 2008. 58(10): p. 821-823.
- [8] Amjadi, M., et al., Comparing pull-out capacity of expandable anchors using discrete/coupled Eulerian element methods versus finite element technique. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2023: p. 1-16.



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

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

گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱

کلمات کلیدی:

مهارهای چندصفحه‌ای
فراساحلی و ساحلی
مهارهای صفحه‌ای بازشو
تراکم خاک

خلاصه: امروزه بشر برای تأمین انرژی به فکر ایجاد سازه‌ها و سکوهای بر روی دریا و خشکی افتاده است. تاکنون مهارهای مختلفی با شکل‌های متفاوت به منظور 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 مورد استفاده 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 مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این تحقیق، رفتار مهارهای چندصفحه‌ای با قابلیت باز شونده در خاک و میزان ظرفیت باربری آن‌ها با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی مورد بررسی 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 مورد بررسی 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 مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده تأثیر تغییر فاصله صفحات به‌مراتب بیشتر از تأثیر تغییر تراکم خاک بوده است.

۱- مقدمه

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 [۱-۸].

غالی و همکاران [۸] به بررسی عملکرد مهارهای مارپیچ در خاک ماسه‌ای متراکم و سست با زاویه پیشرفت 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

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،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.zad@iauctb.ac.ir



صفحات، ۳ برابر عرض آن‌ها می‌باشد.

سوها و همکارانش [۱۰] در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر افزایش تعداد صفحات بر ظرفیت مهارهای ماریچج پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن ۱۲ نوع مهار مختلف و تراکم‌های نسبی مختلف خاک ماسه‌ای اظهار داشتند که اضافه کردن صفحه‌های ماریچج دوم و سوم در خاک‌های متراکم‌تر باعث کاهش ظرفیت باربری خاک می‌شود. میتال و موخرجی [۱۱] تأثیر تعداد صفحات ماریچج و عمق مدفون‌شدگی صفحات بر ظرفیت باربری مهارهای ماریچج را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش تعداد صفحات ماریچج، افزایش عمق و تیغه‌های ماریچج (screw Blades) باعث افزایش ظرفیت باربری مهارهای ماریچج می‌شوند. سرفوتین و همکارانش [۱۲] به بررسی تأثیر مشخصات مختلف خاک بر گوه گسیختگی مهارهای ماریچج و صفحه‌های 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 قرارگرفته در کنار یکدیگر از دو برابر عمق قرارگیری در تانژنت 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 صفحه‌ی 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 قرار دادند. 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 مکند 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 ماریچج گشتاور 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 سه پایه مهار بر ظرفیت پیچشی مهارهای سه پایه 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 باکت انکرها در راستای عمود و افقی پرداختند. در این پژوهش از باکت انکرهایی 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^۱ پرداختند که در این نوع از مهار، صفحات متحرک بوده و در هنگام نصب مسلح کننده و نفوذ آن‌ها به درون خاک، بسته است. با رسیدن صفحات به عمق مدفون‌شدگی طراحی، تحت حداقل بیرون‌کشش، صفحات باز شده و مسلح کننده فعال می‌شود. آن‌ها در پژوهش خود بر روی مهارهای صفحه‌ای بازشو تک‌صفحه‌ای مواردی همچون شکل صفحه و زاویه انحنای صفحات (از ۱/۳ ابتدایی و ۱/۳ انتهایی) را بر روی سرعت فعال‌شدگی مسلح کننده، عمق مدفون‌شدگی نهایی، قابلیت مقاومت و تحمل مسلح کننده تحت بیرون‌کشش ثابت، سرعت بیرون‌کشش، و چگونگی بسیج شدگی توده خاک فعال در بالای صفحات را مورد بررسی قرار دادند و بهترین زاویه و بهترین شکل مهار را برای استفاده در پایداری پلتفرم‌های احداث شده 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 مورد بررسی قرار دادند. 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 قرار دادند. 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 گسیختگی و ظرفیت بیرون کشیدگی مهارهای صفحه‌ای تقویت شده با ژئوگرید را با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که در خاک تقویت شده، 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 قرار دادند. نتایج بیانگر این بود که مهار تقویت شده، ظرفیت بیرون کشیدگی استاتیکی و چرخه‌ای بالاتر با میزان جابجایی کمتر مهار را نشان می‌دهد.

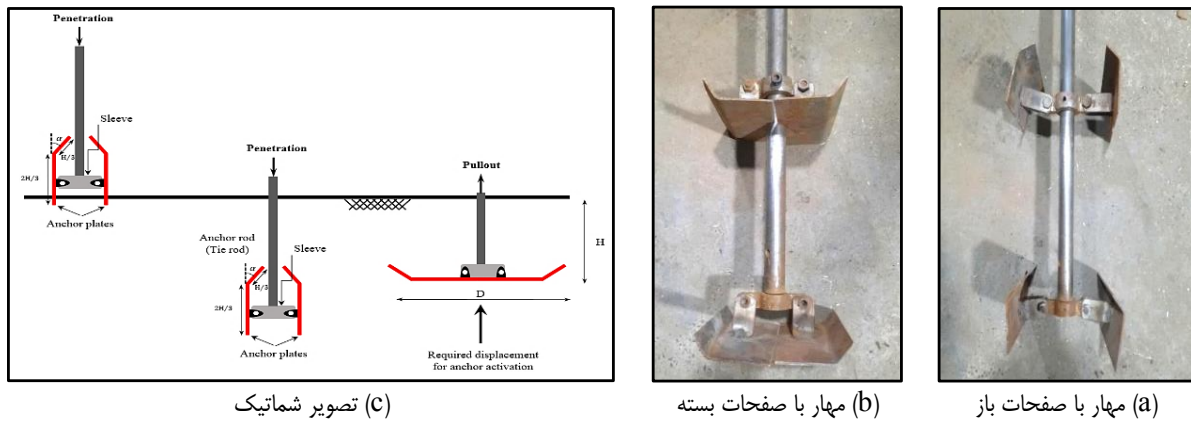
ژوانگ و همکاران [۲۶] رفتار بیرون‌کشش مهار صفحه‌ای مایل مدفون در ماسه تحت تأثیر بیرون‌کشش محوری را با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی در شرایط ۱g بررسی کردند. نتایج این پژوهش بیان کننده این موضوع بود که با افزایش شیب اعمال بار به سمت محور عمود، ظرفیت بیرون‌کشش مهار افزایش می‌یابد.

تیلک و سامادهیا [۲۷] ظرفیت بیرون‌کشش نهایی مهارهای چندصفحه‌ای دایره‌ای مایل مدفون در ماسه را با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش نشست مدفون‌شدگی مهارهای دو و سه‌صفحه‌ای، ظرفیت بیرون‌کشش نهایی این مهارها افزایش می‌یابد.

ژائو و همکاران [۲۸] با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 3D، تأثیر ناهمگنی خاک بر مقاومت بیرون‌کشش 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.



شکل ۱. مهارهای چندصفحه‌ای بازشونده

Fig. 1. Expandable Plate Anchors

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مهارهای چندصفحه‌ای بازشونده

برای مدلسازی میله مهار می مسلح کننده از یک میله به قطر ۳۰ mm و طول ۱۰۰۰ mm استفاده شده است. ابعاد انتخابی برای میله‌ی مهار بر اساس پژوهش انجام گرفته توسط جلالی مقدم و همکاران [۳۰] به گونه‌ای انتخاب شد که میله مهار در طول آزمایش دچار کماتش 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 مهار وجود دارد؛ این غلاف‌ها به وسیله‌ی وصله‌هایی به صفحات مهار می متصل می‌شوند. غلاف ثابت برای حالت تک‌صفحه‌ای در انتهای میله مهار قرار می‌گیرد و غلاف متحرک برای حالت دوصفحه‌ای بر روی میل مهار مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱).

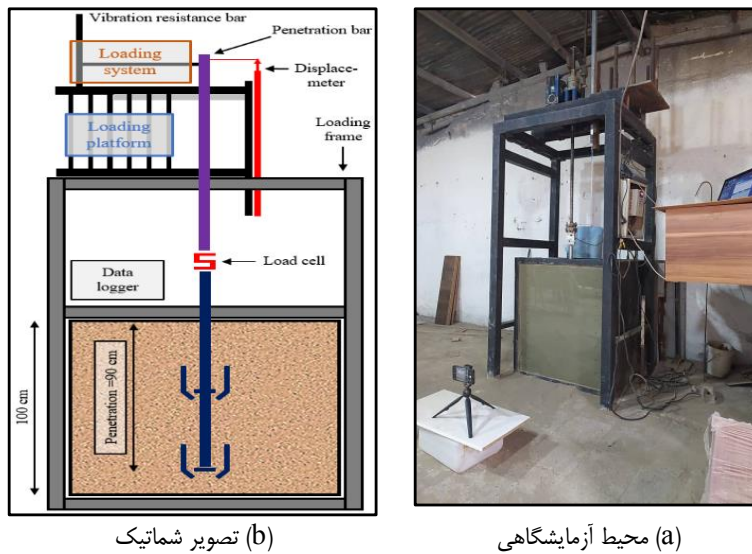
صفحات مهار از جنس فولاد و به ضخامت ۳ mm برای جلوگیری از لهیدگی انتخاب شده‌اند [۳۰]. اندازه صفحه‌ها در دو حالت تک‌صفحه‌ای و دوصفحه‌ای با یکدیگر برابر بوده و ابعادی که برای حالت‌های تک‌صفحه‌ای و دوصفحه‌ای مورد استفاده قرار گرفته به ترتیب اندازه‌های $28/3 * 28/3$ و $20 * 20$ هستند (مساحت کل 800 cm^2). صفحه‌های $20 * 20$ که حالت مهار دوصفحه‌ای را تشکیل می‌دهند معادل مهار تک‌صفحه‌ای با ابعاد $28/3 * 28/3 \text{ cm}$ هستند. صفحات مورد استفاده در مدلسازی فیزیکی دارای انحنای ۴۵ درجه در $1/3$ انتهای 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 مهار 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 مهار متصل می‌شوند. قطعه متحرک در ارتفاع مورد نظر بر روی میله‌ی مهار 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 $0/5 B$ ، $1 B$ ، $1/5 B$ و $2 B$ قرار داده شدند که B اندازه عرض صفحه‌ها (۲۰ cm) می‌باشد.

۲-۲- محفظه آزمایش و خاک

محفظه آزمایش‌ها شامل یک محفظه خاک به ابعاد $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ و یک چهارچوب بارگذاری آهنی برای قرارگیری دستگاه بارگذاری در ارتفاع است. دستگاه بارگذاری از یک موتور با قدرت $1/5$ اسب بخار ($1/5 \text{ hp}$) با سرعت 1420 rpm ، گیربکس با قدرت $7/5 \text{ kg}$ و یک داده‌بردار^۱ برای کنترل سرعت و استخراج تشکیل شده است. مقدار نیرو به وسیله یک نیروسنج^۲ 2 ton با دقت $0/1 \text{ g}$ اندازه‌گیری می‌شود. همچنین، برای اندازه‌گیری مقدار

1 Data Logger
2 Load Cell



شکل ۲. محفظه آزمایش و ابزار گذاری‌های جانبی به منظور قرائت دقیق نتایج

Fig. 2. Experimental test details including soil chambers and data acquisition system

جدول ۱. مشخصات خاک

Table 1. Soil specifications

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

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 ماسه‌ای بدانه‌بندی 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].

۲-۳- نحوه انجام آزمایش

روند انجام آزمایش برای تمامی مهارها یکسان بوده و شامل نصب غلاف و صفحات، پیچ نمودن صفحات مهار به غلاف و نفوذ می‌باشد. به منظور به دست آوردن تراکم یکنواخت، محفظه به ده قسمت مساوی

جایابی صفحه‌ها از یک خط کش عددی^۱ به اندازه ۱ m و دقت ۱ mm استفاده شده است. یک میله برای انتقال نیرو از داخل گیربکس عبور کرده و در پایین به نیروسنج متصل می‌شود. در قسمت پائین نیروسنج، میله مهار قرار گرفته است و بر روی میله مهار نیز صفحه‌ها نصب شده‌اند. نیروسنج و خط کش 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 بالابردن دقت اندازه‌گیری از یک نمایشگر برای اندازه‌گیری نیرو استفاده شده است.

از آنجایی که مطالعات مشابه پیشین در بستر خاک خشک انجام شده بود،

1 Digital Ruler

۳- نتایج

۳-۱- مهارهای تک صفحه‌ای

در شکل (۳) نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش بر روی مهارهای تک‌صفحه‌ای با ابعاد $28/3 \text{ cm} * 28/3 \text{ cm}$ و تحت پنج تراکم مختلف ۳۵، ۵۰، ۶۰ و ۷۰٪ نشان داده شده است. به‌طور 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٪، ۶۰ به ۶۰٪، ۷۰ به ۷۰٪ و ۸۰ به ۸۰٪ بیشینه ظرفیت باربری به ترتیب ۹٪، ۱۱٪، ۱۸٪ و ۸٪ افزایش یافته است. همچنین، با افزایش تراکم خاک از ۳۵ به ۶۰٪، ۳۵ به ۷۰٪ و ۸۰ به 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 تک‌صفحه‌ای 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 کشتی دچار افت محسوسی می‌شود. سرعت بازشدن مهار در تراکم ۸۰٪ از بقیه تراکم‌ها بیشتر بوده است. به‌طور 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 mm ۸۶۰ ایجاد شده است که نسبت به تراکم‌های دیگر در عمق بیشتری اتفاق افتاده بود. در تراکم‌های ۷۰، ۶۰ و ۵۰٪ بیشینه نیروها به ترتیب پس از طی بیرون‌کشش ۱۱۶، ۵۰/۱، ۴۳/۸ و mm ۷۲/۴ رخ داده است که می‌توان بیان کرد که در خاک متراکم ۸۰٪ بازشدگی مهار زودتر اتفاق می‌افتد. با دقت در اعداد بیان شده می‌توان برداشت کرد که در تراکم ۷۰٪ جابجایی بیشتری برای رسیدن به بیشینه نیروها مورد نیاز 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 بیرون‌کشش

با ارتفاع mm ۱۰۰ تقسیم شد. برای به دست آوردن وزن خاک در تراکم مورد نظر ابتدا تراکم خاک بر اساس وزن مخصوص محاسبه گردید؛ نحوه محاسبه به‌منظور بود که وزن خاک مورد نیاز متناسب با تراکم‌های ۳۵، ۵۰، ۶۰ و ۷۰٪ با دانستن m^3 ۱ مکعب لایه خاکریزی و وزن مخصوص، مقادیر وزن هر لایه mm ۱۰۰ 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 مورد نظر در هر آزمایش، نصب مسلح کننده انجام گرفت. مسلح کننده‌ها در ابتدا به صورت بسته وارد خاک شده و در ارتفاع mm ۱۰۰ بالاتر از کف محفظه قرار می‌گیرند. با شروع آزمایش، موتور با سرعت ثابت mm/s ۱ 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 mm ۵ و در ارتفاع مورد نظر 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 و ۷۰٪ و سپس آزمایش‌ها بر روی مهار دو صفحه‌ای با فاصله بین صفحات کم (mm ۱۰۰) تا فاصله بین صفحات زیاد (mm ۴۰۰) 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 $6 H/D$ است که با افزایش این نسبت ظرفیت باربری نیز افزایش پیدا خواهد کرد [۳۶، ۳۷]).

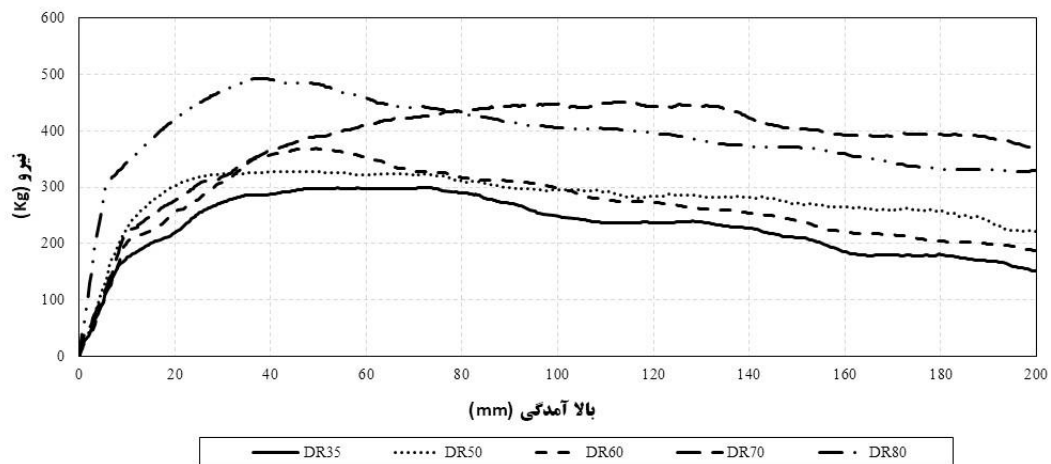
۲-۴- دسته‌بندی آزمایش‌ها

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

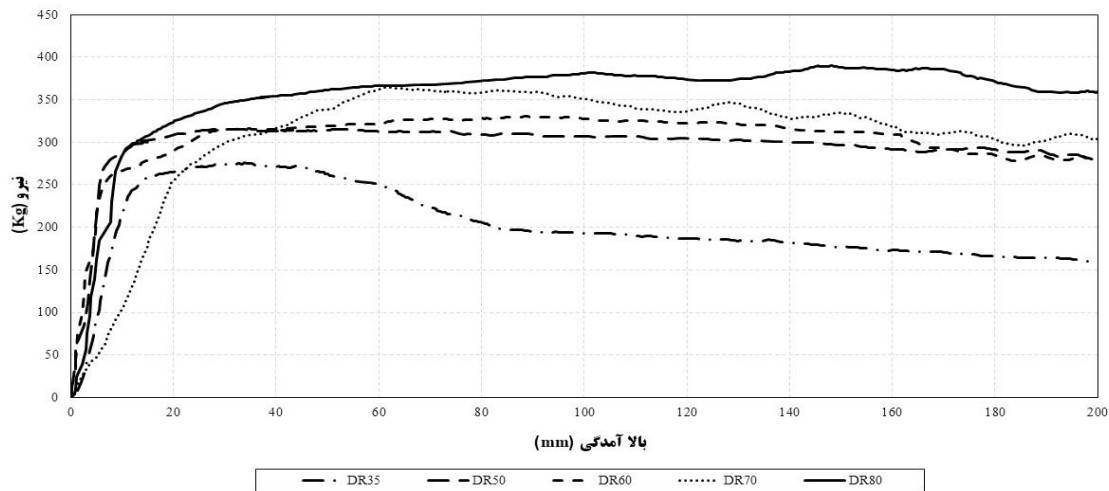
Table 2. Experimental test details

برچسب آزمایش	تعداد صفحه‌ها	مساحت صفحه (mm ²)	(mm فاصله صفحات)	تراکم (%)
DR35	۱	۲۸۳*۲۸۳ mm ²	-	%۳۰
DR50				%۵۰
DR60				%۶۰
DR70				%۷۰
DR80				%۸۰
0.5BDR35	۲	۲۰۰*۲۰۰ mm ²	۱۰۰ mm	%۳۰
0.5BDR50				%۵۰
0.5BDR60				%۶۰
0.5BDR70				%۷۰
0.5BDR80				%۸۰
1BDR35			۲۰۰ mm	%۳۰
1BDR50				%۵۰
1BDR60				%۶۰
1BDR70				%۷۰
1BDR80				%۸۰
1.5BDR35	۳۰۰ mm	%۳۰		
1.5BDR50		%۵۰		
1.5BDR60		%۶۰		
1.5BDR70		%۷۰		
1.5BDR80		%۸۰		
2BDR35	۴۰۰ mm	%۳۰		
2BDR50		%۵۰		
2BDR60		%۶۰		
2BDR70		%۷۰		
2BDR80		%۸۰		



شکل ۳. نمودارهای ظرفیت باربری-بیرونکشش برای آزمایش‌های DR35 تا DR80

Fig. 3. Pull out capacity versus displacement of single plate anchor with DR35 to DR80



شکل ۴. نمودارهای ظرفیت باربری-بیرون کشش برای آزمایش‌های 2BDR80 تا 2BDR35

Fig. 4. Pull out capacity versus displacement of double plate anchor with 2B distance with DR35 to DR80

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 می‌کند، درحالی‌که در تراکم‌های نسبی بیشتر، بعد از رسیدن به بیشینه ظرفیت باربری، روند افزایش ظرفیت باربری ادامه داشته است. در تراکم ۳۵٪ می‌توان گفت باز شدن صفحه دوم تأثیر زیادی بر روی مهار نداشته است و نقش اصلی در باربری مسلح کننده را صفحه مهار عمیق‌تر ایفا کرده است. به همین دلیل ظرفیت باربری در فاصله کمتری رخ داده است چون حداکثر ظرفیت باربری تنها به مهار عمیق‌تر مربوط می‌باشد.

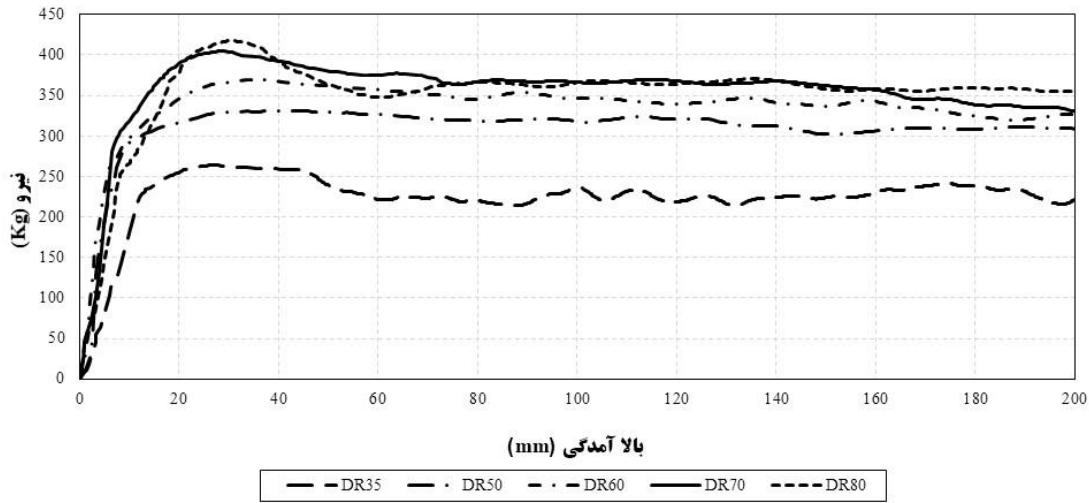
۳-۳- مهارهای دوصفحه‌ای با فواصل B ۱/۵

نتایج آزمایش‌های مهار دوصفحه‌ای با فاصله بین صفحه‌های ۱/۵ برابر عرض صفحه در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است، رفتار بیرون‌کشش مهارها در خاک‌هایی با تراکم‌های ۸۰٪ و ۷۰٪ و ۶۰٪ شبیه هم هستند و می‌توان این‌گونه استدلال نمود که با کاهش فاصله صفحات از B ۲ به B ۱/۵ سازوکار بازشدگی و قفل‌شدگی مسلح کننده در خاک‌های نیمه متراکم و متراکم نزدیک به یکدیگر خواهد بود.

۱۱۶ mm، جابجایی بیشینه در حصول اطمینان از قطعیت باز شدن صفحات و باز شدن مسلح کننده می‌باشد. به عبارت دیگر، در این فاصله، صفحات متحرک مهاری به صورت کامل باز شده‌اند و کاملاً از راستای عمودی (موازی با میله مهار) به راستای افقی (عمود بر میله مهار) در خاک چرخیده‌اند. به‌طور کلی سرعت باز شدن مهارها تأثیر بسزایی در دست‌یابی به بیشینه ظرفیت باربری و نیروی مقاومت نهایی مهارها داشته است.

۳-۲- مهارهای دوصفحه‌ای با فواصل B۲

در شکل (۴) نتایج آزمایش‌های بیرون کشیدگی مهارهای دوصفحه‌ای با فاصله بین صفحات برابر mm ۴۰۰ 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، ۶۰، ۶۰٪، ۶۰٪ به ۷۰٪ و ۷۰٪ به ۸۰٪ ظرفیت باربری مهارهای دوصفحه‌ای با فاصله B۲ به ترتیب ۱۴/۷٪، ۴٪، ۱۳/۸٪ و ۳/۹٪ افزایش یافته است. همچنین، با افزایش تراکم خاک از ۳۵ به ۶۰، ۶۰٪، ۳۵ به ۷۰٪ و ۳۵ به ۸۰٪ بیشینه ظرفیت باربری مهارهای دوصفحه‌ای با فاصله B۲ 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 ۱۴۵ mm می‌باشد. پس با انتخاب تراکم ۷۰٪ می‌توان نتیجه مناسبی را در این حالت به



شکل ۵. نمودارهای ظرفیت باربری-بیرون کشش برای آزمایش‌های 1.5BDR80 تا 1.5BDR35

Fig. 5. Pull out capacity versus displacement of double plate anchor with 1.5B distance with DR35 to DR80

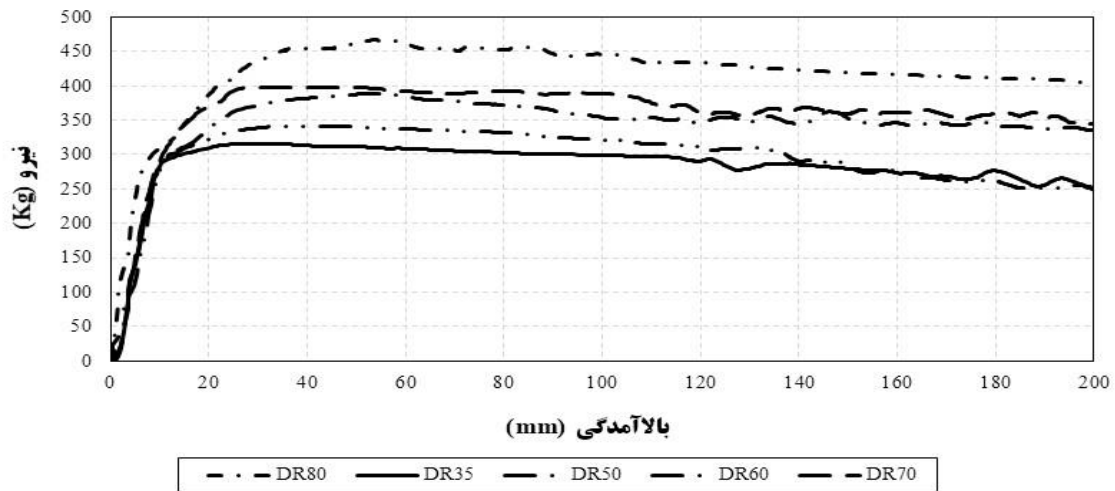
این فاصله نسبت به حالت‌های دیگر تراکم، بیشتر بوده و حدود ۱۰ mm از تراکم‌های بالاتر بیشتر است.

بهترین تراکم برای مهار دوصفحه‌ای برای فاصله بین صفحات ۱/۵ B را می‌توان تراکم ۰.۷۰٪ عنوان کرد زیرا هم اختلاف اندازه نیرو با تراکم ۰.۸۰٪ بسیار کم است (حدود ۰.۳٪ اختلاف نیرو دارند) و هم مهار در فاصله کمتری در خاک باز شده است. نکته دیگر که می‌توان برای این فاصله ۱/۵ B 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.

۳-۴- مهارهای دوصفحه‌ای با فواصل B۱

در شکل (۶) نمودارهای بار-بیرون کشش برای حالت دوصفحه‌ای بافاصله‌ی بین صفحه‌های ۲۰۰ 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 ۳۵ به ۵۰٪، ۵۰ به ۶۰٪، ۶۰ به ۷۰٪ و ۷۰ به ۸۰٪ بیشینه ظرفیت باربری مهارهای دوصفحه‌ای بافاصله B۱ به ترتیب ۰.۸٪، ۰.۱۱٪، ۰.۲٪ و ۰.۱۴٪ افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش تراکم خاک از ۳۵ به ۶۰٪، ۳۵ به ۷۰٪

اختلاف بین ظرفیت باربری تراکم ۰.۸۰٪ و ۰.۷۰٪ و نیز ۰.۷۰٪ و ۰.۶۰٪ تقریباً ۰.۳٪ می‌باشد. اختلاف بین تراکم ۰.۶۰٪ و ۰.۵۰٪ حدود ۰.۸٪ و اختلاف بین تراکم ۰.۵۰٪ و ۰.۳۵٪ حدود ۰.۲۲٪ است. با افزایش تراکم خاک از ۳۵ به ۶۰٪، ۳۵ به ۷۰٪ و ۳۵ به ۸۰٪ بیشینه ظرفیت باربری مهارهای دوصفحه‌ای بافاصله ۱/۵ B به ترتیب ۰.۳۹/۷٪، ۰.۵۶/۷٪ و ۰.۶۱/۷٪ افزایش می‌یابد بود. عمق لازم برای بازشدگی مهارها نیز در تراکم‌های ۳۵، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰٪ به ترتیب ۲۰/۹، ۳۷/۱، ۳۱/۸، ۲۰/۴ و ۲۶/۵ mm که این عمق بازشدگی، کمتر از حالت‌های تک‌صفحه‌ای و دو صفحه بافاصله بین صفحات B۲ است. با بررسی اعداد بیان شده این نتیجه حاصل می‌گردد که بین تراکم‌های ۷۰ و ۸۰٪ اختلاف نیروها چشمگیر نبوده و در تراکم ۰.۷۰٪ مهار زودتر از بقیه تراکم‌ها باز شده است. با این حال عمق بازشدگی تفاوت چندانی با تراکم ۰.۸۰٪ ندارد و مهار در هر دو حالت تراکم در فاصله ۲ cm باز شده است. نمودارها یک‌روند و رفتار مشابهی در طول پروسه انجام آزمایش‌ها دارند و دارای شیب ثابتی پس از رسیدن به ظرفیت باربری بیشینه هستند. در تراکم ۰.۸۰٪ مشهود است که شیب نمودار بافاصله پس از پیک اول رو به پایین حرکت کرده که با باز شدن صفحه‌ی دوم مجدداً مسلح کننده باربر شده و تا انتهای ۲۰۰ mm بیرون کشش در همان نیروی ثابت باقی می‌ماند. در تراکم ۰.۵۰٪، بیشینه ظرفیت باربری بعد از جابجایی حدود ۳۷/۱ mm اتفاق می‌افتد که



شکل ۶. نمودارهای ظرفیت باربری-بیرون کشش برای آزمایش‌های IBDR35 تا IBDR80

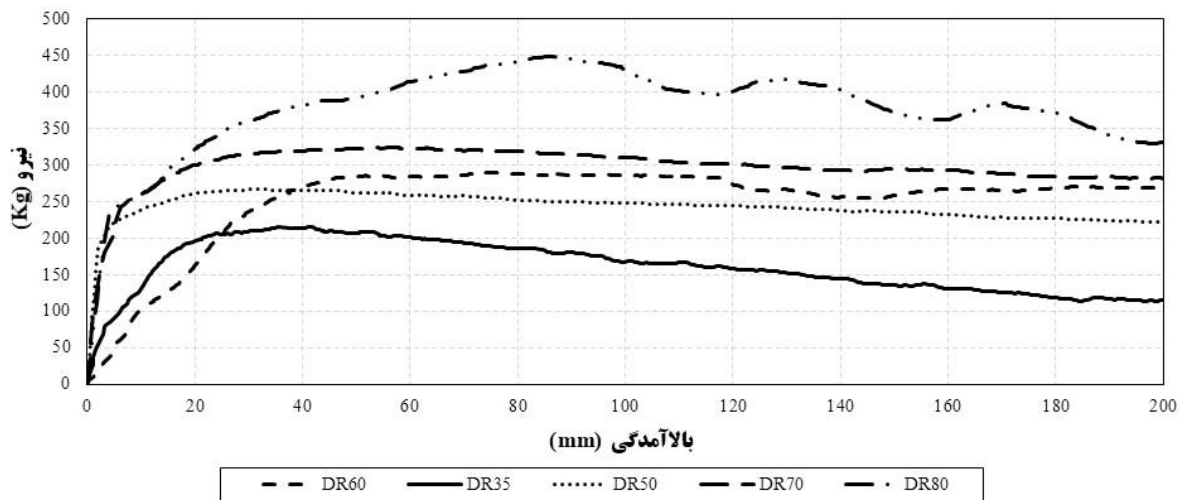
Fig. 6. Pull out capacity versus displacement of double plate anchor with 1B distance with DR35 to DR80

۳-۵- مهارهای دوصفحه‌ای با فواصل B/۵

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 ۷۰٪ و ۸۰٪ حدود ۲۶٪ می‌باشد که نسبت به فواصل صفحات قبلی (B، ۲ B و ۱/۵ B) بیشتر است. همچنین در تراکم ۸۰٪، یک سیر ملایم صعودی در ظرفیت باربری مهار تا اواسط آزمایش مشاهده شد. این روند در حالی بود که در تراکم‌های ۵۰، ۶۰ و ۷۰٪ نمودارها تقریباً تحت یک شیب یکسانی دچار افت ظرفیت باربری کششی می‌شوند. در تراکم ۳۵٪، افت قابل ملاحظه در ظرفیت باربری مسلح کننده بلافاصله پس از بیشینه ظرفیت باربری مشاهده شد. اختلاف ظرفیت باربری بین تراکم‌های ۳۵ و ۵۰، ۵۰ و ۶۰، ۶۰ و ۷۰، ۷۰ و ۸۰٪ به ترتیب ۲۰٪، ۹٪ و ۹٪ بود. مهار در تراکم ۸۰٪ پس از طی بیرون کشش ۸۹/cm۸ باز شده و این میزان بیرون کشش در تراکم‌های ۷۰، ۶۰، ۵۰ و ۳۵٪ به ترتیب برابر ۵۶/۱، ۷۲/۴، ۴۲/۶، ۴۱/۲ mm 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

و ۳۵ به ۸۰٪ بیشینه ظرفیت باربری مهارهای دوصفحه‌ای بافاصله B۱ به ترتیب ۲۳/۵٪، ۲۶/۱ و ۴۷/۴٪ افزایش یافته است. مهار در تراکم‌های ۸۰٪، ۷۰٪، ۶۰٪، ۵۰٪ و ۳۵٪ به ترتیب بعد از گذشت ۵۴/۴، ۳۶/۱، ۵۴/۹، ۴۳/۸ و ۳۳/mm۷ باز شده است و به مانند فاصله صفحات B ۱/۵، مهار در تراکم 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 ۸۰٪ دارد.

بازشدگی کامل مهار بافاصله صفحات B ۱/۵، بین ۳۰ و ۶۰ mm بوده است. تراکم ۶۰ و ۸۰٪ تقریباً در یک بیرون کشش باز شده‌اند اما اختلاف بین ظرفیت باربری آنها حدود ۱۶٪ می‌باشد که این نشان دهنده تأثیر تراکم در میزان ظرفیت باربری مهار می‌باشد. همچنین در تراکم‌های ۷۰٪ و ۳۵٪ نیز مهار تقریباً در یک بیرون کشش ثابت فعال شده است ولی اختلاف بین ظرفیت باربری مهار حدود ۲۰٪ می‌باشد. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان نتیجه گرفت در فاصله B ۱/۵ صفحات، تراکم 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 ۷. نمودارهای ظرفیت باربری-بیرون کشش برای آزمایش‌های 0.5BDR35 تا 0.5BDR80

Fig. 7. Pull out capacity versus displacement of double plate anchor with 0.5B distance with DR35 to DR80

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 $0.5B$ صفحات تأثیر مخربی بر روی عملکرد مهار و بازشدگی صفحات خواهد داشت.

در حالت تک‌صفحه‌ای، نمودارها دارای نوسان کمتری نسبت به مهارهای دوصفحه‌ای می‌باشند که می‌توان این موضوع را این‌گونه 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 باوجود اینکه ظرفیت باربری بیشینه برای حالت تک‌صفحه‌ای بوده اما نمودارهای مهارهای تک‌صفحه‌ای برتری خود را حفظ نمی‌کنند و دچار یک افت باربری قابل ملاحظه‌ای در ادامه بیرون کشش می‌شوند. به عبارت دیگر، با باز شدن صفحه‌ی دوم در حالت دوصفحه‌ای ظرفیت باربری مهار مجدداً افزایش یافته و از مهار تک‌صفحه‌ای پیشی می‌گیرد.

در جدول (۳) بیشینه ظرفیت باربری کششی مهارها در تراکم‌های مختلف ارائه شده است. می‌توان این نتیجه را برداشت کرد که مهار تک‌صفحه‌ای در تراکم‌های بالا بهتر از مهار دوصفحه‌ای عمل می‌کند، اما در تراکم‌های

50 mm بودن جابجایی مورد نیاز 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.

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 قرائت شده در ادامه آزمایش وجود ندارد. این موضوع بیان‌گر تأثیر وجود صفحه دوم در ثابت نگه داشتن نیروی مسلح‌کننده تحت یک بیرون کشش ثابت خواهد بود.

رفتار بار-بیرون کشش مسلح‌کننده‌های دوصفحه‌ای این‌گونه است که

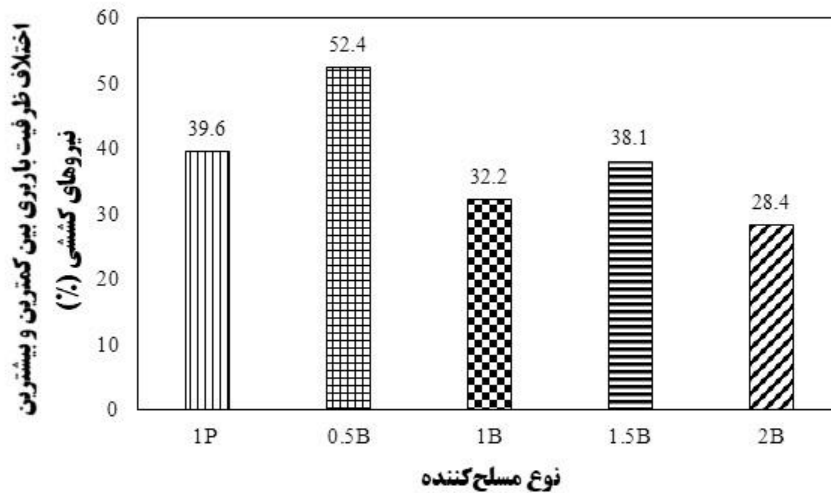
جدول ۳. بیشینه ظرفیت باربری به دست آمده از مهارها

Table 3. The maximum pull capacity

درصد تراکم نسبی %	تک صفحه‌ای	دو صفحه‌ای فاصله ۰/۵B	دو صفحه‌ای فاصله ۱B	دو صفحه‌ای فاصله ۱/۵B	دو صفحه‌ای فاصله ۲B
۸۰	۴۹۹	۴۵۰	۴۶۹	۴۱۹	۳۹۴
۷۰	۴۵۹	۳۳۱	۴۰۱	۴۰۶	۳۷۹
۶۰	۳۷۳	۲۹۸	۳۹۳	۳۶۲	۳۳۳
۵۰	۳۳۱	۲۶۹	۳۴۷	۳۳۳	۳۱۹
۳۵	۳۰۱	۲۱۴	۳۱۸	۲۵۹	۲۷۸

پایین مهارهای دو صفحه‌ای در حالتی که فاصله بین صفحه‌ها $1/5 B$ باشد، بالاترین ظرفیت باربری را نتیجه می‌دهند. با توجه به این موضوع می‌توان بهترین فاصله بین مهار دو صفحه‌ای را فاصله $1 B$ و $1/5 B$ بیان کرد. همان‌طور که مشخص است در فاصله $0/5 B$ 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. 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 دو صفحه‌ای زمانی که فاصله بین صفحات نصف عرض می‌باشد، بوده است. کمترین تأثیر بر روی مهار دو صفحه‌ای زمانی که فاصله بین صفحات $1/5$ برابر عرض بوده، می‌باشد. همچنین، بیشترین تأثیر تراکم در افزایش نیروها در تراکم‌های ۳۵ و ۵۰٪ بر روی حالت دو صفحه‌ای زمانی که فاصله بین صفحات $1/5$ برابر عرض می‌باشد، بود. کمترین تأثیر بر روی حالت دو صفحه‌ای در حالتی که فاصله بین صفحات نصف عرض بود، مشاهده شد. بدین ترتیب، بیشترین تأثیر تراکم برای تراکم‌های ۶۰٪-۷۰٪ و ۵۰٪-۶۰٪ مربوط به مهار تک صفحه‌ای و به اندازه ۱۸ و ۱۱٪ می‌باشد و کمترین تأثیر تراکم برای تراکم‌های ۶۰٪-۷۰٪ و ۵۰٪-۶۰٪ به ترتیب مربوط به مهار دو صفحه‌ای با فاصله بین صفحات $B (2\%)$ و مهار دو صفحه‌ای با فاصله بین صفحات $B (4\%)$ می‌باشند.

در شکل (۸) میزان اختلاف بین کمترین نیرو و بیشترین نیروی ایجاد شده بر روی مهارهای تک و دو صفحه‌ای نشان داده شده است. مشاهده شد که افزایش تراکم بیشترین تأثیر را بر روی افزایش ظرفیت باربری بر روی حالت دو صفحه‌ای با فاصله بین صفحات $0/5 B$ داشته است و کمترین تأثیر بر روی حالت دو صفحه‌ای با فاصله بین صفحات $B (2)$ است. در حالت تک صفحه‌ای افزایش تراکم باعث افزایش نیرو به میزان $39/6\%$ شده است که با مقایسه با حالت‌های دیگر (نمودار شکل ۸) می‌توان بیان کرد که مقدار افزایش در این حالت (حالت تک صفحه‌ای) بیشتر از تمامی مهارهای دو صفحه‌ای بوده است (به جز حالت دو صفحه‌ای با فاصله بین صفحات نصف عرض که در این حالت تأثیر تراکم در افزایش نیرو حدود $52/4\%$ 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 دو صفحه‌ای حالت‌های $1 B$ و $0/5 B$ بوده است که با توجه به نمودار شکل (۸) مشخص شد که مقدار تأثیر تراکم در افزایش نیرو در حالت $1 B$ از حالت $1/5 B$ کمتر بوده است. باین حال، مقدار نیروی کسب شده در مهار $B (1)$ به اندازه 10% بیشتر از حالت $1/5 B$ بوده است. در حالت تک صفحه‌ای اختلاف بین کمترین نیرو و بیشترین نیرو در تراکم‌های مختلف $39/6\%$ بوده که بیشتر از حالت $1 B$ 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 $0/5 B$ ایجاد شده است. این موضوع را می‌توان با مقایسه بین حالت $1 B$ و $1/5 B$ نیز بیان کرد (اختلاف بین کمترین نیرو و بیشترین نیرو در حالت $1/5 B$ از حالت $1 B$ بیشتر است). در جدول (۴) ظرفیت باربری باقیمانده در مسلح کننده‌ها نشان شده



شکل ۸. تأثیر تعداد و فاصله صفحات بر ظرفیت باربری مهارها

Fig. 8. The effect of the number and distance of plate anchors on Pull out capacity

جدول ۴. ظرفیت باربری نهایی مهارها

Table 4. The residual pull capacity

دو صفحه‌ای فاصله ۴۰۰mm	دو صفحه‌ای فاصله ۳۰۰mm	دو صفحه‌ای فاصله ۲۰۰mm	دو صفحه‌ای فاصله ۱۰۰mm	تک صفحه‌ای 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	۲۳۱	۲۵۲	۱۱۳	۱۵۳	۳۵

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 دو صفحه‌ای با فاصله بین صفحات ۲B بوده (حدود ۱۴۵ در تراکم ۸۰٪) و کمترین جابجایی برای مهار دو صفحه‌ای با فاصله بین صفحات ۱/۵ B می‌باشد (حدود ۲۰/۴ mm در حالت تراکم ۷۰٪). با مقایسه جابجایی موردنیاز برای حالت تک صفحه‌ای و دو صفحه‌ای می‌توان این نتیجه

است. در حالت دو صفحه‌ای با کاهش تراکم، مقاومت نهایی نیز کاهش پیدا می‌کند، اما در حالت تک صفحه‌ای 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 دو صفحه‌ای با فاصله صفحات ۱ B می‌باشد. این در حالی است که در تراکم‌های پایین، مهارهای با فاصله صفحات ۱/۵ B دارای عملکرد بهتری در تحمل نیروی کششی دائمی بوده‌اند. به‌طور کلی سرعت باز شدن مهارها رکن اساسی را در مقدار ظرفیت

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

Table 5. Required distance for expansion 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		۸۲۷/۵
DR50	٪۵۰	۴۳/۸	۲۰۰	۶۳/۶	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		۸۷۳/۲
2BDR50	٪۵۰	۷۴/۱	۲۰۰	۸۰/۲۴	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		۸۷۹/۱
1.5BDR50	٪۵۰	۳۷/۱	۲۰۰		۸۶۲/۹
1.5BDR60	٪۶۰	۳۱/۸	۲۰۰	۲۷/۳۴	۸۶۸/۲
1.5BDR70	٪۷۰	۲۰/۴	۲۰۰		۸۷۹/۶
1.5BDR80	٪۸۰	۲۶/۵	۲۰۰		۸۷۳/۵
1BDR35	٪۳۵	۳۳/۷	۲۰۰		۸۶۶/۳
1BDR50	٪۵۰	۴۳/۸	۲۰۰	۴۴/۵۸	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		۸۵۸/۸
0.5BDR50	٪۵۰	۴۲/۶	۲۰۰	۶۰/۴۲	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

این مقدار $۰.۱۲/۶\%$ بیشتر از بالاترین ظرفیت باربری به دست آمده در حالت دوصفحه‌ای می‌باشد. اما در حالتی که تراکم نسبی ۰.۳۵% است و خاک در شرایط سست می‌باشد ظرفیت باربری در حالت تک‌صفحه‌ای برابر ۳۰۱ Kg است که $۵/۳۴\%$ کمتر از حالت دوصفحه‌ای 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 دوصفحه‌ای (به شرط انتخاب درست فاصله) بیشتر خواهد شد.

- در حالت مهار تک‌صفحه‌ای پس از رسیدن به ظرفیت حداکثر با شیب بیشتری نسبت به حالت دوصفحه‌ای دچار افت می‌شود. در تراکم‌های ۰.۸۰ ، ۰.۷۰ ، ۰.۶۰ و ۰.۵۰% در حالت دوصفحه‌ای 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 ۰.۸۰% ، در حالت دوصفحه‌ای 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 $۲۸۳ \text{ mm}^2 * ۲۸۳$ و حالتی که فاصله بین صفحه‌ها ۲۰۰ mm می‌باشد، بالاترین ظرفیت باربری ایجاد شده است. با دقت به حالت دوصفحه‌ای 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 $۲۸۳ \text{ mm}^2 * ۲۸۳$ می‌توان بیان کرد تراکم تأثیر بیشتری بر روی حالت تک‌صفحه‌ای دارد. بیشترین تأثیر تراکم بر روی $۰/۵ \text{ B}$ 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 دوصفحه‌ای در نمودارهای تراکم در حالت‌های ۰.۸۰ ، ۰.۷۰ ، ۰.۶۰ و ۰.۵۰% می‌توان بیان کرد که در حالت دوصفحه‌ای بالا رفتن تراکم لزوماً باعث به دست آوردن بیشترین ظرفیت باربری نخواهد شد.

را برداشت کرد که عموماً جابجایی مورد نیاز در حالت تک‌صفحه‌ای بیشتر از دوصفحه‌ای می‌باشد، به جز 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 با حالت 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 $۰/۵ \text{ B}$ دانست به طوری که همین امر باعث شده صفحه پایین نتواند سرعت لازم را برای باز شدن داشته باشد. با مقایسه بین حالت $۰/۵ \text{ B}$ و ۲ B (به عنوان کمترین و بیشترین فاصله قرارگیری بین صفحات مهارها) مشاهده می‌شود که عدد به دست آمده در حالت $۰/۵ \text{ B}$ کمتر از حالت ۲ B می‌باشد (در حالت دوصفحه‌ای به طور میانگین ۸۰ mm برای بازشدگی مهار نیاز است که بیشترین جابجایی نیز متعلق به این نوع مهار می‌باشد) به طور کلی از میانگین بازشدگی مهارها می‌توان نتیجه گرفت مهار با فاصله بین صفحات $۱/۵ \text{ B}$ بسیار سریع‌تر از مهارهای دیگر باز می‌شود. پس از آن، مهار با فاصله بین صفحات ۲ B ، مهار با فاصله بین صفحات $۰/۵ \text{ B}$ ، مهار تک‌صفحه‌ای، و مهار دوصفحه‌ای با فاصله بین صفحات ۲ B 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.

۵- نتیجه‌گیری

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 ۰.۸۰% می‌باشد، بیشترین ظرفیت باربری به دست آمده مربوط به حالت تک‌صفحه‌ای است که برابر ۴۹۹ Kg می‌باشد

- Computers and Geotechnics, 109 (2019) 34-45.
- [13] J. Kumar, K. Kouzer, Vertical uplift capacity of a group of shallow horizontal anchors in sand, *Géotechnique*, 58(10) (2008) 821-823.
- [14] 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.
- [15] A. Bera, U. Banerjee, Uplift capacity of model Bell shaped anchor emBedded in sand, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 7(1) (2013) 84-90.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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).
- [21] 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).
- [22] A. Roy, S.H. Chow, M.F. Randolph, C.D. O'loughlin, Consolidation effects on uplift capacity of shallow
- [1] R.L. Copstead, D.D. Studier, *An earth anchor system: installation and design guide*, (1990).
- [2] J.T. Shelton, OMNI-Maxtrade anchor development and technology, in: *OCEANS 2007, IEEE*, 2007, pp. 1-10.
- [3] M. Randolph, S. Gourvenec, D. White, M. Cassidy, *Offshore geotechnical engineering*, Spon Press New York, 2011.
- [4] B.M. Das, S.K. Shukla, *Earth anchors*, J. Ross PuBlishing, 2013.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] C. O'Loughlin, D. White, S. Stanier, Novel anchoring solutions for FLNG-Opportunities driven By scale, in: *Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference*, 2015.
- [8] 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.
- [9] A.J. Lutenegger, 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.
- [10] 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) 1102-1114.
- [11] S. Mittal, S. Mukherjee, Vertical uplift capacity of a group of helical screw anchors in sand, *Indian Geotechnical Journal*, 43(3) (2013) 238-250.
- [12] 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,

- 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, (2021).
- [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 D4253-16e1, 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.
- horizontal plate anchors in dilating sand, *Géotechnique*, 72(11) (2022) 957-973.
- [23] 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) 2427-2449.
- [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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. r. Mohammadkhanifard, A. Ali zad , M. Amjadi , *Evaluating the Capacity of the Multi-Plate Mechanical Anchors in Granular Soils, Amirkabir J. Civil Eng., 56(5) (2024) 569-588.*

DOI: [10.22060/ceej.2024.22361.7958](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22361.7958)

