



University Of Qom



Experimental Investigation of the Performance of Two-Plate Expandable Anchors with Variations in Area and Distance Between Plates in Sandy Soils

Shiva Abrifam¹, Amirali Zad², Maryam Yazdi³, Javad NazariAfshar⁴

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Earth Resources, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: shiva.abrifam@gmail.com
2. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Earth Resources, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: a.zad@iauctb.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Earth Resources, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: mar.yazdi@iauctb.ac.ir
4. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-E-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: javad.nazariafshar@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 09 May 2024
Revised 28 Jul 2024
Accepted 30 Jul 2024

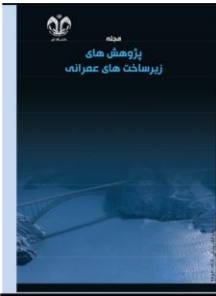
Keywords:
Physical Modeling,
Expandable Two-Plate
Anchors,
Pull-Out Velocity,
Relative Density,
Distance Between Plates,
Particle Image
Velocimetry (PIV).

ABSTRACT

Anchors are tensile elements that resist external tensile forces by attaching to structures and being embedded at an optimal depth in the ground. Various types of anchors have been developed for stabilizing both offshore and onshore environments. This study focuses on the experimental examination of a novel type of mechanically expandable plate anchors capable of opening in soil. The impact of various factors including the division of the surface within the plates, pull-out speed, spacing between plates, and soil density on the ultimate pull-out capacity of expandable plate anchors embedded in a sand bed has been explored through physical modeling. To analyze the formation of rupture wedges and the mobilization of the soil volume resting on the plates, particle image velocimetry was employed. Findings indicate that maintaining the plate area constant and altering the area distribution from a scenario of equal-area two-plate anchors to one with greater area allocation on the lower plate enhances the anchor's pull-out capacity by 1.5 times. Furthermore, assessing the functionality of the expandable double-plate anchor across varying pull-out speeds reveals minimal influence of pull-out speed on the pull-out capacity in sandy soils. Among the examined speeds, pulling out the anchors at rates of 10 and 30 mm/min, respectively, in soils of low and high relative densities yielded the highest pull-out forces.

Cite this article: Abrifam Sh, Zad A, Yazdi M, NazariAfshar J. Experimental Investigation of the Performance of Two-Plate Expandable Anchors with Variations in Area and Distance Between Plates in Sandy Soils. *Civil Infrastructure Researches*. 2024; Article in Press. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10732.1550>





بررسی آزمایشگاهی عملکرد مهارهای دوصفحه‌ای بازشو با تغییرات مساحت و فاصله بین صفحات در خاک‌های ماسه‌ای

شیوا ابری فام^۱، امیرعلی زاد^۲، مریم یزدی^۳، جواد نظری افشار^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: shiva.abrifam@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: a.zad@iauctb.ac.ir
۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: mar.yazdi@iauctb.ac.ir
۴. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: javad.nazariafshar@iau.ac.ir

چکیده

مهارها اعضای کششی هستند که با اتصال به سازه و قرارگیری در عمق مناسب در زمین می‌توانند با ایجاد ایمنی در برابر نیروهای بیرون کشیدگی مقاومت کنند. انواع مختلفی از مهارها برای پایداری در مناطق دریایی و خشک معرفی شده‌اند. این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی مهارهای دوصفحه‌ای بازشونده در خاک می‌پردازد. با توجه به جدید بودن مهارهای صفحه‌ای بازشونده، این مطالعه به ارزیابی تأثیر عواملی همچون نحوه توزیع مساحت در صفحات مهار، سرعت بیرون کشش، فاصله بین صفحات و دانسیته نسبی خاک بر ظرفیت بیرون کشش نهایی پرداخته است. این ارزیابی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی بر روی مهارهای صفحه‌ای بازشو مدفون در بستر ماسه‌ای انجام شده است. جهت تحلیل نحوه شکل‌گیری گوه‌های گسیختگی و بسیج‌شدگی حجم خاک قرارگرفته بر روی صفحات، از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات استفاده شد. نتایج نشان داد که با ثابت نگه‌داشتن مساحت صفحات و تنها با تغییر نحوه توزیع مساحت از حالت مهار دوصفحه‌ای با مساحت برابر به حالتی که مساحت بیشتری در صفحه پایینی توزیع شده باشد، ظرفیت بیرون کشش مهار ۱/۵ برابر افزایش می‌یابد. همچنین، بررسی عملکرد مهار دوصفحه‌ای بازشو تحت سرعت‌های بیرون کشش مختلف نشان داد که سرعت بیرون کشش مهار در خاک‌های ماسه‌ای تأثیر اندکی بر ظرفیت بیرون کشش دارد. علاوه بر این، در بین سرعت‌های مورد بررسی، بیرون کشش مهارها با سرعت ۱۰ و ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه به ترتیب در خاک با دانسیته نسبی پایین و بالا موجب به دست آمدن بیشینه نیروی بیرون کشش مهار شده است.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۹

کلیدواژه‌ها:

مدل‌سازی فیزیکی،
مهار دوصفحه‌ای بازشونده،
سرعت بیرون کشش،
دانسیته نسبی،
فاصله بین صفحات،
سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV).

استناد: ابری فام شیوا، زاد امیرعلی، یزدی مریم، نظری افشار جواد. بررسی آزمایشگاهی عملکرد مهارهای دوصفحه‌ای بازشو با تغییرات مساحت و فاصله بین صفحات در خاک‌های ماسه‌ای. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۳؛ آماده به انتشار.

<https://doi.org/10.22091/cer.2024.10732.1550>



۱- مقدمه

بررسی، مهارهای صفحه‌ای افقی به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد و سهولت در نصب، همواره توجه بیشتری از سوی محققین مختلف به خود جلب کرده‌اند [۷-۱۴]. پژوهشگران تحقیقات خود را بر روی سه دسته مهار وزنی، شمع‌های مهاری و مهارهای صفحه‌ای متمرکز انجام دادند و اظهار داشتند که مهارهای صفحه‌ای، بیشترین ظرفیت بیرون‌کشش (براساس جرم مهار) را دارند [۱۵]. همچنین پارامترهای مختلفی مانند سایز و شکل مهارها نیز بر ظرفیت بیرون‌کشش مهارهای صفحه‌ای تأثیرگذار می‌باشند [۱۶ و ۱۷]. مهندسان با در نظر گرفتن این متغیرها، راهکارهایی جدید و خلاقانه و تئوری‌هایی را برای افزایش ظرفیت بیرون‌کشش مهارها ارائه داده‌اند [۱۸-۲۰].

یکی از روش‌های معرفی‌شده برای افزایش کارایی مهارهای صفحه‌ای، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها مانند ژئوسل، ژئوگرید و ژئوتکتایل به همراه مهارهای صفحه‌ای است. این روش باعث افزایش ظرفیت بیرون‌کشش و جلوگیری از شکست ناگهانی سیستم مهار صفحه‌ای می‌شود. با استفاده از ژئوسنتتیک‌ها، می‌توان قابلیت سرویس‌دهی و ایمنی گروهی از سازه‌های متکی بر صفحات مهار را بهبود بخشید [۲ و ۲۱-۲۵].

یکی دیگر از راه‌های افزایش ظرفیت بیرون‌کشش مهارهای صفحه‌ای، افزایش تعداد صفحات مهار می‌باشد. مهارهای چندصفحه‌ای از ترکیب تعدادی از صفحات متصل به امتداد میله فولادی مرکزی ساخته می‌شوند [۱، ۲۶ و ۲۷]. مهارها چندصفحه‌ای به دلیل قفل‌شدگی صفحات در عمق‌های مختلف خاک، قادر به ایجاد ظرفیت بیرون‌کشش بیشتر در مقایسه با مهارهای تک‌صفحه‌ای (با ثابت در نظر گرفتن عمق مدفون‌شدگی)، است. ظرفیت بیرون‌کشش مهار، حاصل ساختار ذاتی صفحات چندگانه است که لایه‌های متعدد خاک را در برمی‌گیرد [۲۸]. باید توجه داشت که هر صفحه سهم قابل‌توجهی در ظرفیت بیرون‌کشش سیستم مهارهای چندصفحه‌ای دارد؛

پایدارسازی سازه‌های ساحلی و فراساحلی همواره یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها برای مهندسين به حساب می‌آید. این سازه‌ها اغلب تحت اثر بارهای ناشی از پدیده‌های طبیعی قرار می‌گیرند. این نوع بارها، با به وجود آوردن ترکیبی از پاسخ‌های کششی و فشاری باعث از بین رفتن پایداری سازه‌ها می‌گردد. مهارها ابزارهای کلیدی در مهندسی ژئوتکنیک برای مقاومت در برابر نیروی بیرون‌کشش در سازه‌های ساحلی و فراساحلی می‌باشد. از کاربردهای مهم مهار می‌توان به پایدارسازی دکل‌های انتقال برق، دیوارهای حائل، دیوارهای دریایی، سپرکوبی‌ها، پایدارسازی ترانشه‌ها، اجرای لوله‌های انتقال آب و نفت، ساخت اسکله‌ها، مهار سازه‌های شناور و خطوط لوله مستغرق اشاره کرد [۱ و ۲]. جهت اتصال مهارها به سازه از سه روش سیستم میله‌ای، سیستم بسته (با پلی‌استر) و سیستم باز (با زنجیر) استفاده می‌شود [۳-۵]. مهارها انواع مختلفی دارند که می‌توان آنها را به دو دسته کلی مهارهای سطحی (ثقلی)^۱ و مهارهای مدفون^۲ تقسیم نمود. از انواع مهارهای مدفون می‌توان به مهارهای شمعی^۳، مهارهای وزنی یا کیسون^۴، مهارهای SEPLA^۵، مهارهای دینامیکی^۶، مهارهای صفحه‌ای^۷ با صفحه‌های افقی، قائم و مایل و برخی از مهارهای ترکیبی جدید اشاره کرد [۳ و ۴]. انواع مهارها در جدول ۱ ارائه شده است. پژوهشگران همواره کوشیده‌اند تا با انجام مطالعات مختلف، تأثیر پارامترهای گوناگون بر ظرفیت بیرون‌کشش مهارها را مورد بررسی قرار دهند. برخی از این پارامترها شامل اندازه صفحات، عمق مدفون‌شدگی و نوع خاک اطراف صفحات می‌باشند [۶]. در بین انواع مهارهای مورد

¹- Surface or Gravity

²- Embedded anchors

³- Driven or drilled and grouted pile

⁴- Suction caissons

⁵- Suction embedded plate anchors

⁶- Dynamically penetrating anchors

⁷- Drag anchors (traditional fixed fluke or plate)

همچنین تعداد صفحات بر ظرفیت بیرون کشش مهارها تأثیر مستقیم دارد [۲۹].

جدول ۱- انواع مهارها

معیاب	مزایا	ویژگی های مهار	انواع مهارها
نیاز به مواد و مصالح فراوانی دارد. نیاز به جرثقیل با ظرفیت بالای بالا، حمل سخت تا دریا [۳۰، ۳۱ و ۳۲]	نسبتا سریع نصب و راه اندازی می شود.	یک جعبه خالی، همراه با موادی به عنوان پرکننده مانند سنگ دانه ها، یا مواد سنگین تر مانند سنگ آهن هستند؛ دارای دندان هایی برای نفوذ و توسعه ای نیروی برشی در بستر دریا	 مهارهای جعبه ای (Box Anchor)
طراحی پیچیده تر با در نظر گرفتن انواع مکانیسم های شکست مانند (لغزش کل سیستم (سرباره و شبکه)، بیرون کشش شبکه، ترکیبی از این دو؛ نیاز به وزنه (سرباره بیشتر) [۳۲ و ۳۳]	استفاده از فولاد کمتر نسبت به مهارهای جعبه ای؛ نصب با جرثقیل کوچک تر [۲ و ۳۰]	از شبکه ای از تیرهای متقاطع که در بستر فرو رفته است تشکیل شده و با تپه ای از سنگ ریزه یا سنگ آهن دفن می شود. شبکه تیرها در قسمت پشتی سنگ ریزه ها قرار می گیرد [۳ و ۳۰] به طوری که اگر شبکه شروع به شکست کند باید کل تپه جابه جا شود [۳۲].	 مهارهای گرلیج شده (Grillage and Berm)
محدودیت ارتفاع تا ۱۰ متر (برای جلوگیری از کمانش)؛ محدودیت در حمل و نقل و ساخت؛ هزینه بالا به دلیل نیاز به کشتی های بزرگ و مدت زیاد زمان عملیات اجرایی؛ پیچیدگی نصب در مواد سنگی، اختلالات محیطی به دلیل کوبیدن شمع مانند نویز زیرآبی [۴۶]؛ خستگی اصطکاک بین بدنه شمع و محیط اطراف به دلیل کوبیدن مکرر شمع ها [۴۷ و ۴۸].	ظرفیت باربری بالا؛ استفاده در شرایط مختلف زمین (خاک، حتی سنگ های ضعیف و خاک های لایه و خاک های غیر همگن) [۳۵-۳۷]	مهارهای شمعی لوله های فولادی توخالی هستند که در بستر دریا به وسیله کوبش، حفاری، حفاری و بتن ریزی و یا مکش نصب می شوند. مهارهای شمعی کوبیده شده رایج ترین پی های سازه های فراساحلی هستند و معمولا با استفاده از چکش به زمین کوبیده می شوند [۳، ۳۰، ۳۳ و ۳۴] مهارهای شمعی حتی در زمین های سنگی ضعیف کاربرد دارد [۳۵ و ۳۶].	 مهارهای شمعی
مواجهه با چالش های نفوذ، به ویژه در خاک های رسی سخت و بسیار متراکم و همچنین در زمین های لایه ای و ناهمگن در بستر دریا [۳۷، ۴۱ و ۴۲]؛ نیاز به رفت و برگشت های بیشتر به ساحل برای انتقال کامل مجموعه مهار؛ نیاز به استفاده از ROV برای نصب؛ تحت بارهای عمودی پایدار کاهش قابل توجهی در ظرفیت بار مشاهده می شود؛ نگرانی درباره ظرفیت نگهداری در خاک های لایه ای؛ نیاز به انتخاب عمق بهینه برای بارگذاری به دلیل حساسیت ظرفیت بار افقی به عمق بارگذاری است [۵۱]؛ نیاز به اطلاعات خاک از آزمایشگاه های پیشرفته برای طراحی دارد [۳].	نصب ساده یا دقت بالا از نظر مکان، جهت و نفوذ [۴۰]؛ عدم نیاز به چکش های سنگین زیرآبی؛ عدم نیاز به پلتفرم هایی مانند جرثقیل های بزرگ بالای برای حمایت از عملیات نصب؛ تجربه زیاد در آب های عمیق؛ روش های طراحی و نصب توسعه یافته و امکان بهره گیری از تجربیات طراحی با شمع های کوبیده شده می باشد [۳۷].	مهارهای کیسون مکشی شامل استوانه فلزی (و یا بتنی) توخالی با قطرهای بزرگ تا ۱۶ متر در خاک های ماسه ای [۳۸-۴۰] و حدود ۸ تا ۱۳ متر در خاک های رسی هستند که در پایین باز و بالا توسط ورقه های مسطح یا گنبدی شکل بسته است.	 مهارهای کیسون مکشی
عدم دقت در موقعیت یابی دقیق؛ پیش بینی ناپذیری عمق نفوذ و (ظرفیت بار مهار به عمق نفوذ آن بستگی دارد) [۸]؛ نیاز به تنظیم زاویه باله شافت تا به عمق جای گیری مناسب برسند. این نیاز به دانش و تجربه فنی بالا برای اطمینان از تنظیم صحیح دارد.	کارایی بالاتر از نظر نسبت ظرفیت بار به وزن مهار [۸]؛ هزینه کمتر نصب نسبت به کیسون ها و شمع های کوبیده شده به دلیل فرایند ساده تر و نیاز کمتر به تجهیزات سنگین برای نصب؛ خود جاسازی با تنظیم زاویه باله شافت که باعث کاهش نیاز به تجهیزات اضافی برای جاسازی می شود.	شامل یک صفحه نگه دارنده (Fluke) هستند که بازوی مهار (Shank) به محور مهار (یک سیم یا زنجیر) متصل است و با کشیدن سیم یا زنجیر، مهار به بستر دریا وارد می شود [۳، ۳۰ و ۳۷].	 مهارهای دفن شده کششی (DEA) (Drag Embedded Anchors)

جدول ۱- ادامه

انواع مهارها	ویژگی های مهار	مزایا	معایب
 <p>مهار بارگذاری عمودی (VLA)</p>	<p>مانند مهارهای کششی دفن شده می باشند؛ با این تفاوت که به جای یک بازوی مهار (Shank) صلب و وسیع، از یک بازوی مهار نازک یا سیمی شکل استفاده می شود.</p>	<p>جاسازی مؤثرتر به دلیل هندسه نازک تر مقاومت کمتر در برابر نفوذ داشته؛ امکان نفوذ به عمق های بیشتر با تنظیم مناسب زاویه باله شافت در نتیجه دستیابی به ظرفیت باربری بیشتر [۲]؛ وزن کمتر نسبت به سایر مهارها؛ عدم نیاز به تجهیزات زیاد به دلیل ابعاد کوچک مهار و کاهش تجهیزات زیاد برای انتقال مهار به محل نصب است؛ روش های طراحی و نصب خوب توسعه یافته [۲۲].</p>	<p>نیاز به نصب کششی، تعیین موقعیت و آزمون اثبات؛ نیاز به ۲ یا ۳ کشتی و ROV برای نصب این مهارها؛ در خارج از برزیل، تجربه ای با تسهیلات شناور دائمی وجود ندارد؛ دشواری در اطمینان از نصب و جهت دهی در عمق طراحی [۲۲]</p>
 <p>مهارهای SEPLA (Suction Embedded Plate Anchor)</p>	<p>این مهار متشکل از یک صفحه دایره ای و یا مستطیلی در یک شکاف عمودی در انتهای کیسون مکشی می باشد [۲۲، ۳۶ و ۳۸]. عمق مورد نظر فرستاده می شوند، سپس بچرخند تا به صورت عمود بر خط کشش قرار گیرند [۴۳].</p>	<p>استفاده از روش های نصب مهار کیسون مکشی؛ دارای هزینه مصالح کمترین در میان مهارهای آب های عمیق؛ دقت بالا در اندازه گیری نفوذ و موقعیت یابی صفحه مهار؛ روش طراحی توسعه یافته ای دارد؛ مقاومت خوب در برابر بارهای عمودی به دلیل جاسازی عمیق [۳ و ۴۰]</p>	<p>زمان نصب طولانی تر از مهارهای کیسون مکش (۳۰ درصد)؛ نیاز به جرثقیل های سنگین در برخی موارد؛ نیاز به چرخش مهار برای نصب و آزمایش اثبات؛ محدودیت در توان کششی کشتی های نصب؛ نیاز به استفاده از ROV؛ هزینه نصب بالا [۳۷]؛ کاهش ظرفیت بارگذاری به دلیل فرآیند نصب (کلید زدن) [۳۷، ۴۴ و ۴۵].</p>
<p>مهار نفوذ دینامیکی</p>  <p>مهارهای DPA (Deep Penetrating Anchor)</p>  <p>مهارهای Torpedo (Torpedo Anchor)</p>  <p>مهارهای Omni-Max</p>	<p>به شکل استوانه و یا موشک با ۴ باله در بالای آن که برای آزادسازی از ارتفاع ۲۰ تا ۵۰ متر از سطح بستر دریا طراحی می شوند [۳، ۴۶ و ۴۷].</p> <p>مهارهای تورپدو نوع ساده تری از مهارهای DPA است [۴۸ و ۴۹]</p> <p>از سه صفحه متقارن با زاویه ۱۲۰ درجه بین آن ها در بدنه مهار، مهارهای صفحه ای تشکیل می شود که نصب آن ها شبیه به مهارهای نفوذ دینامیکی است [۵۰]</p>	<p>نفوذ عمیق در بستر دریا به علت وزن و سرعت بالای برخورد در نتیجه پایداری بیشتر مهار ساخت ساده و اقتصادی حمل و نصب آسان با استفاده از کشتی و بدون نیاز به ROV موقعیت یابی دقیق بدون نیاز به جهت گیری خاص و آزمون اثبات در حین نصب</p>	<p>عدم تجربه خارج از برزیل کمبود روش های مستند نصب و طراحی نیاز به نصب دقیق عمودی مهارها تأثیرپذیری از نوع و خصوصیات زمین بستر دریا بر عملکرد مهارهای نفوذ دینامیکی، به ویژه در زمین های بسیار سفت یا نرم نیاز به بررسی های دقیق زمین شناسی و هیدرو دینامیکی قبل از نصب</p>
<p>مهارهای صفحه ای بانفوذ دینامیکی (DEPLA) Dynamically Embedded Plate Anchor [۶۲]</p> 	<p>روش نصب مشابه با مهارهای دینامیکی داشتن یک صفحه برای ایجاد مقاومت بیشتر علاوه بر میله بلند در مهارهای دینامیکی ترکیبی از سبکی و کارایی مهارهای صفحه ای با هزینه نصب پایین مهارهای دینامیکی را دارا است [۴۵].</p>	<p>کاهش هزینه های ساخت (تا ۸۰٪) نصب سریع و آسان سرعت نصب بالا با عدم نیاز به و تجهیزات پیچیده و سنگین هزینه نصب پایین با استفاده از نیروی گرانس و وزن مهار برای نفوذ</p>	<p>محدودیت های خاک کمبود تجربه عملی</p>

جدول ۱- ادامه

معایب	مزایا	ویژگی‌های مهار	انواع مهارها
محدودیت در تحمل بارهای جانبی بدون چرخش مناسب [۵۶] نیاز به ابزارهای نصب با گشتاور بالا چالش‌های افزایش مقیاس [۵۷-۵۹]	کاهش صدای زیرآب مقاومت بالا در برابر بارهای کشش و جانبی [۵۱-۵۴] امکان استفاده به‌صورت گروهی [۵۵]	متشکل از یک میله فولادی و صفحات مارپیچ جوش داده‌شده در خاک مقاومت خاک بالای صفحه باعث نگهداری مهار می‌شود [۵۱-۵۴]	 مهارهای مارپیچ (Helical)
نیازمند تحقیقات بیشتر در شرایط محیطی مختلف و بارگذاری‌های گوناگون [۶۰ و ۶۱]	نصب و فعال‌سازی ساده هزینه کم و به‌صرفه از لحاظ اقتصادی [۶۰ و ۶۱]	ساختارهای مکانیکی که با باز نفوذ درون خاک قفل و فعال می‌شوند [۶۰ و ۶۱]	 مهارهای مکانیکی بازشونده (EMPLA)

مهارهای صفحه افقی در عمق دلخواه را ارائه دادند. براساس نتایج به‌دست آمده، سطح لغزش شکل‌گرفته در خاک تقریباً در یک خط مستقیم مایل در عمق مدفون کم به سطح زمین گسترش می‌یابد. سپس به تدریج با افزایش عمق مدفون، در داخل خاک محدود می‌شود و به سمت صفحه مهار پیش می‌رود [۷]. صابر ماهانی و شجاعی نصیرآبادی، نوع جدیدی از مهارهای صفحه‌ای بازشو را معرفی کردند که دارای دو فنر بین میله مرکزی و صفحات است. آن‌ها تأثیر نسبت مدفون‌شدگی (عمق مدفون‌شدگی به عرض مهار) را بررسی کردند. همچنین تأثیر عرض مهار بر ظرفیت بیرون‌کشش و جابه‌جایی این نوع مهار را نیز مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که ظرفیت بیرون کشیدگی به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر نسبت مدفون‌شدگی مهار است، اما جابه‌جایی مهار متناظر با حداکثر بار بیرون کشیدگی، با افزایش نسبت مدفون‌شدگی افزایش می‌یابد [۶۴].

جلالی‌مقدم و همکاران با توجه به محدودیت‌ها و هزینه بالای نصب مهارها در آب‌های عمیق، نسل جدیدی

تیلک^۸ و همکاران نشان دادند که با افزایش تعداد صفحات در مهارهای صفحه‌ای، ظرفیت بیرون‌کشش مهار تا ۲۲٪ افزایش می‌یابد [۲۸]. با توجه به این امر که مهارهای صفحه‌ای هم به‌صورت سطحی ($H/B=1.5$) و هم به‌صورت عمیق ($H/B=3$) مورد استفاده قرار می‌گیرند، مناسب است که در اعماق کم از مهارهای تک‌صفحه‌ای استفاده شود [۲۸]؛ اما برای استفاده از مهارهای صفحه‌ای در اعماق زیاد استفاده از مهارهای چندصفحه‌ای مناسب‌تر می‌باشد، زیرا با افزایش عمق مدفون صفحه‌مهار، مهار حجم بیشتری از توده خاک را در برمی‌گیرد که این امر باعث ایجاد ناحیه مقاوم بزرگ‌تری در خاک می‌شود و ظرفیت بیرون‌کشش بیشتر را افزایش خواهد داد. از این رو می‌توان بیان داشت که نصب صفحات در یک عمق مدفون‌شدگی مناسب، به افزایش ظرفیت بیرون‌کشش مهارهای چندصفحه‌ای کمک می‌کند [۲۸، ۶۲ و ۶۳]. هو^۹ و همکاران با بررسی عمق مدفون صفحات در داخل خاک، یک روش محاسبه برای ظرفیت بیرون‌کشش

^۸- Tilak

^۹- Hu

مساحت کمتر ممکن است بر سرعت باز شدن صفحه پایینی و ظرفیت بیرون کشش تأثیرگذار باشد. در این مطالعه، به منظور بررسی اثر توزیع مساحت و سرعت بازشدگی صفحات در مهار دوصفحه‌ای بازشو سه نوع نحوه توزیع مساحت در صفحات همراه با سه سرعت بیرون کشش مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین در این مطالعه به دنبال برطرف کردن خلأهای تحقیقاتی موجود در زمینه برخی از جنبه‌های مختلف این مهارها، رفتار این مهارها با تغییر فاصله بین صفحات مدفون در خاک با دانسیته نسبی مختلف پرداخته شد. علاوه بر این، از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات^{۱۱} جهت مشاهده و استخراج سطوح لغزش بحرانی مهارهای صفحه‌ای بازشو استفاده شد [۶۵ و ۶۶].

۲- تجهیزات آزمایش

۲-۱- خاک

در این مطالعه، از خاک ماسه ۱۶۱ فیروزکوه استفاده شد. این خاک به دلیل داشتن رنگ روشن و شفاف دقت تحلیل‌های پردازش تصویر PIV را در تشخیص جابه‌جایی ذرات خاک افزایش می‌دهد. ماسه ۱۶۱ فیروزکوه در این مطالعه، براساس سیستم طبقه‌بندی خاک (USCS) به عنوان ماسه بد دانه‌بندی شده SP طبقه‌بندی می‌شود.

مشخصات فیزیکی خاک از طریق آزمایش‌های شناسایی، جدول ۲ ارائه شده است. به منظور کنترل کیفیت خاک پس از انجام هر سه آزمایش، آزمایش‌های دانه‌بندی خاک (USCS)، تعیین درصد رطوبت، برش مستقیم و تعیین وزن مخصوص خاک، تکرار و کیفیت خاک بازرسی شد. همچنین با استفاده از رابطه (۱)، زاویه اتساع خاک محاسبه گردید که در این رابطه، پارامتر ψ

از مهارهای صفحه‌ای را پیشنهاد دادند. این نوع مهارها با نام مهارهای مکانیکی بازشو (EMPLA^{۱۰}) معرفی شده‌اند. این نوع مهار، با صرف کمترین هزینه و نیروی پیشرانه موردنیاز، در درون خاک نصب، قفل و فعال می‌شوند. در این نوع مهارها، صفحات متحرک بوده و در هنگام نصب و نفوذ به درون خاک، بسته می‌مانند و با رسیدن به عمق مدفون‌شدگی، تحت حداقل نیروی بیرون کشش، صفحات باز شده و مهار فعال می‌شود. با بررسی اشکال مختلفی از مهارهای تک‌صفحه‌ای بازشو، شکل دایره‌ای و انحنای رو به پایین صفحات با زاویه ۴۵ درجه، دارای بیشترین ظرفیت بیرون کشش می‌باشد [۶۰]. محمدخانی‌فرد و همکاران برای افزایش کارایی مهارهای صفحه‌ای بازشو، این نوع مهارها را به صورت دوصفحه‌ای مورد آزمایش قرار دادند و تأثیر پارامترهایی چون دانسیته نسبی و فاصله بین صفحات را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از مهارهای دوصفحه‌ای بازشو در دانسیته نسبی پایین، سبب افزایش ظرفیت بیرون کشش مهار می‌شود. همچنین تأثیر فاصله بین صفحات بر روی ظرفیت بیرون کشش نهایی مهارها به مراتب بیشتر از تأثیر تغییر دانسیته نسبی خاک بوده است. علاوه بر این، با کاهش فاصله بین دو صفحه، دانسیته نسبی به پارامتر مؤثرتری در ظرفیت بیرون کشش مهار تبدیل می‌شود. در این مطالعه، مساحت صفحات مهار دوصفحه‌ای بازشو ثابت و برابر با مهار تک‌صفحه‌ای بازشو در نظر گرفته شده بود که به صورت مساوی در دو صفحه توزیع گردیده بود [۶۱]. یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر سازوکار باز شدن و قفل‌شدگی مهارهای صفحه‌ای بازشو، تأثیر توزیع نامتوازن مساحت در صفحات با ثابت در نظر گرفتن مساحت می‌باشد. در نگاه اول، می‌توان بیان کرد که قرارگیری صفحه با مساحت بیشتر در اعماق بیشتر می‌تواند به افزایش ظرفیت بیرون کشش کمک کند؛ اگرچه وجود صفحه با مساحت بیشتر بر روی صفحه با

¹¹- Particle Image Velocimetry

¹⁰- Expandable Mechanical Plate Anchors

نشان دهنده زاویه اتساع خاک و پارامتر ϕ معرف زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد [۶۷]:

$$\psi = \phi - 30 \quad (1)$$

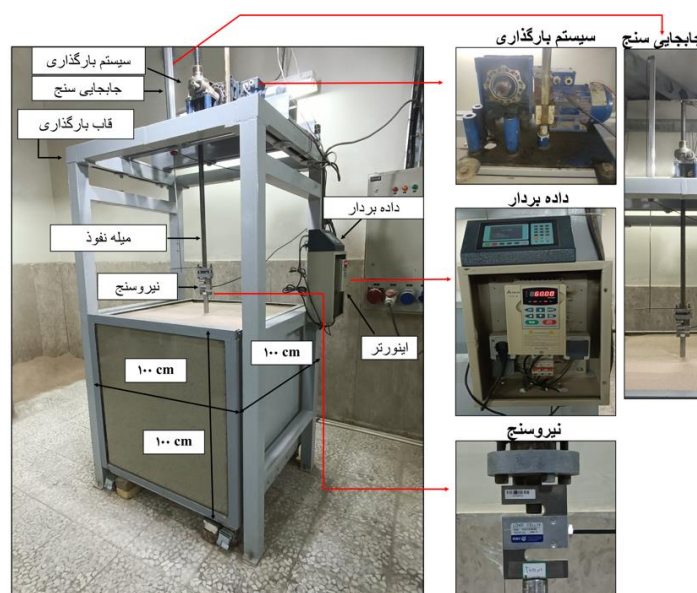
به‌منظور انجام آزمایش‌ها، از یک محفظه به شکل مکعبی با ابعاد $1 \times 1 \times 1$ متر استفاده شد؛ که تصویر و ابعاد آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.

ابعاد فوق برای محفظه به دلیل فاصله مناسب برای جلوگیری از رسیدن سطوح گسیختگی به دیواره‌های کناری محفظه در حین انجام آزمایش بیرون‌کشش انتخاب شد. برای تحلیل‌های PIV، یک شیشه نشکن با ضخامت ۳۰ میلی‌متر در یکی از وجوه محفظه نصب گردید. این محفظه دارای یک قاب فولادی قوی به ارتفاع ۲/۱ متر برای قرارگیری سیستم بارگذاری می‌باشد؛ که از نوع موتور-گیربکس با مشخصات موتور دارای قدرت ۱/۵ اسب بخار، سرعت ۱۴۲۰ دور بر دقیقه و نسبت گیربکس ۷/۵ بوده است. شفت متصل‌کننده موتور به نیروسنج دارای طولی به‌اندازه ۱۲۰۰ میلی‌متر است؛ و میزان جابه‌جایی قائم میله مهار به درون خاک، به میزان یک متر تعریف شده است.

جدول ۲- مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

پارامتر/واحد	مقدار
G_s	۲/۶۸
$\gamma_{d_{max}} (kN/m^3)$	۱۶/۰۹
$\gamma_{d_{min}} (kN/m^3)$	۱۳/۱۳
e_{max}	۰/۹۴۳
e_{min}	۰/۶۰۳
ϕ (degree)	۳۴
ψ (degree)	۴
C_c	۰/۷۸
C_u	۰/۸۸
D_{10} (mm)	۰/۱۸
D_{30} (mm)	۰/۲۲
D_{60} (mm)	۰/۳۴

۲-۲- محفظه آزمایش و سیستم بارگذاری



شکل ۱- محفظه و تجهیزات مورد استفاده

دیجیتال^{۱۴} با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده؛ و جهت اندازه‌گیری نیرو از یک نیروسنج^{۱۵} کالیبره شده با ظرفیت باربری ۲۹/۴ و دقت ۱۰-۳×۹ کیلونیوتن استفاده گردید.

به‌منظور کنترل سرعت و استخراج داده، به ترتیب از یک اینورتر^{۱۲} و داده‌بردار^{۱۳} استفاده شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع قرارگیری مهار، از یک خط‌کش

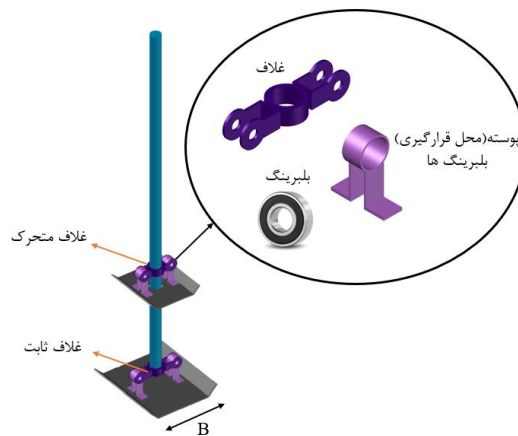
¹⁴- Digital Ruler
¹⁵- Load Cell

¹²- Inverter
¹³- Data Logger

توجه به آزمایش‌های انجام‌شده در مطالعه پیشین، معین شد [۶۰]. پس از انجام هر آزمایش کیفیت صفحات مهار به لحاظ عدم خم‌شدگی نیز کنترل گردید.

به‌منظور تسهیل در بازشدگی صفحات مهار، از یک مکانیزم چرخشی استفاده شد. این مکانیزم دارای دو بلبرینگ در هر صفحه بود که بلبرینگ‌ها در داخل یک پوسته فلزی قرار گرفته و این پوسته به صفحه مهار جوش شده بود. سپس، برای اتصال صفحات به میله مهار، از یک غلاف ثابت برای صفحه پایینی و یک غلاف متحرک برای صفحه بالایی استفاده شد. صفحات با استفاده از یک پین از طریق اتصال بلبرینگ به غلاف روی میله متصل می‌گردند.

غلاف متحرک متصل به صفحه بالایی قابلیت تنظیم فاصله بین صفحات را در سه حالت $1B$ ، $1/5B$ و $2B$ (برابر با عرض صفحه واقع در ارتفاع پایین‌تر) بر روی میله مهار دارد. شکل ۲، نشان‌دهنده نحوه اتصال غلاف‌ها به صفحات می‌باشد.



شکل ۲- قطعات و نحوه اتصال مهارهای دوصفحه‌ای بازشو (تصویر شماتیک)

بررسی نحوه توزیع مساحت و اثر آن بر عملکرد مهارها، سه حالت توزیع مساحت زیر مورد بررسی قرار گرفت:

(الف) توزیع مساحت یکسان بین صفحه بالایی و

پایینی (Group E)

(ب) توزیع مساحت با یک‌سوم مساحت کل در صفحه

بالایی و دوسوم در صفحه پایینی (Group UE-)

(1).

دقت و صحت داده‌های قرائت‌شده با خط دیجیتالی با استفاده از کولیس صحت‌سنجی شد و هر دو، به داده‌بردار متصل شدند. سیستم داده‌بردار نیز دارای قابلیت ثبت داده با استفاده از نرم‌افزار مخصوص بود که پس از اتصال آن به کامپیوتر، داده‌های هر آزمایش به‌طور مستقل ذخیره می‌شدند. به‌منظور جلوگیری و به حداقل رساندن خطاهای موجود از یک نرم‌افزار برنامه‌نویسی شده برای ثبت و استخراج داده‌ها از داده‌بردار استفاده شد.

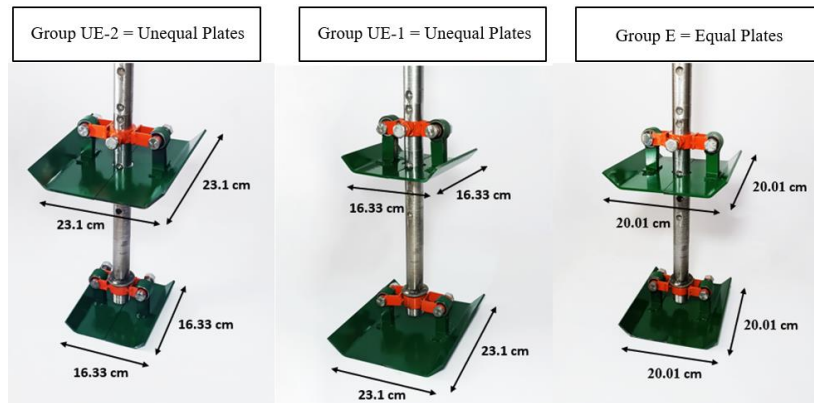
۲-۳- مهار مکانیکی بازشونده

به‌منظور ساخت مهارها، تمامی اجزا و قطعات مهارها در نرم‌افزار AutoCAD 3D مدل‌سازی شده و سپس از فناوری برش لیزری برای برش صفحات مهارها استفاده شد. میله اتصال‌دهنده مهارهای صفحه‌ای بازشو از میله‌ای با جنس فولادی و ارتفاع ۱۰۰۰ و قطر ۳۰ میلی‌متر ساخته شده است. برای ساخت صفحات مهار از ورق فولادی به ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شد. ضخامت مورد استفاده به‌منظور جلوگیری از لهیدگی صفحات، با

مجموع مساحت صفحات مهار به‌منظور جلوگیری از تأثیر مساحت، ثابت در نظر گرفته شد. مهارهای صفحه‌ای بازشو به‌صورت دوصفحه‌ای با مجموع مساحت $0/08$ مترمربع ساخته شدند. مساحت در نظر گرفته شده با توجه با شرایط مرزی محفظه مورد استفاده در آزمایش و مطالعات پیشین انتخاب گردید [۶۰ و ۶۱]. به‌منظور

مطالعه پیشین بودند [۶۱]. تصویر و نحوه توزیع مساحت صفحات در شکل ۳ نمایش داده شده است.

(ج) توزیع مساحت با دوسوم مساحت کل در صفحه بالایی و یک‌سوم در صفحه پایینی (Group UE-) صفحات دارای انحنای ۴۵ درجه در ۱/۳ انتهای خود براساس تجربه بهینه‌سازی شده در

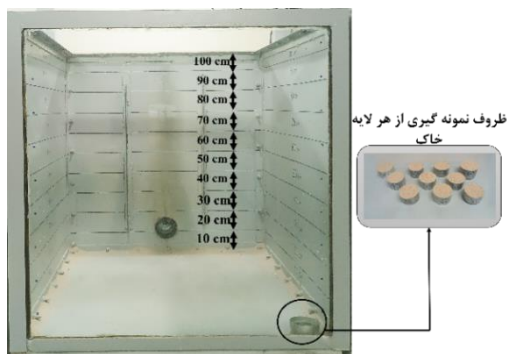


شکل ۳- مهارهای دوصفحه‌ای بازشو

لایه‌های تقسیم شده، یک ظرف نمونه‌گیری خاک در هر لایه قرار گرفت تا پس از اتمام آزمایش، مجدداً وزن آن اندازه‌گیری شود و دانسیته نسبی در هر لایه کنترل شده و از صحت آن اطمینان حاصل گردد. پس از انجام هر آزمایش، خاک از سه ارتفاع مختلف محفظه (بالا، وسط و پایین) با وزن ۵۰۰ گرم جدا شده و آزمون دانه‌بندی خاک مجدداً انجام شد تا از خرد نشدن دانه‌ها اطمینان حاصل شود و در صورت لزوم، آزمایش تکرار و خاک تعویض گردد.

$$Dr = \frac{1/\gamma_{min} - 1/\gamma}{1/\gamma_{min} - 1/\gamma_{max}} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{w}{v} \quad (3)$$



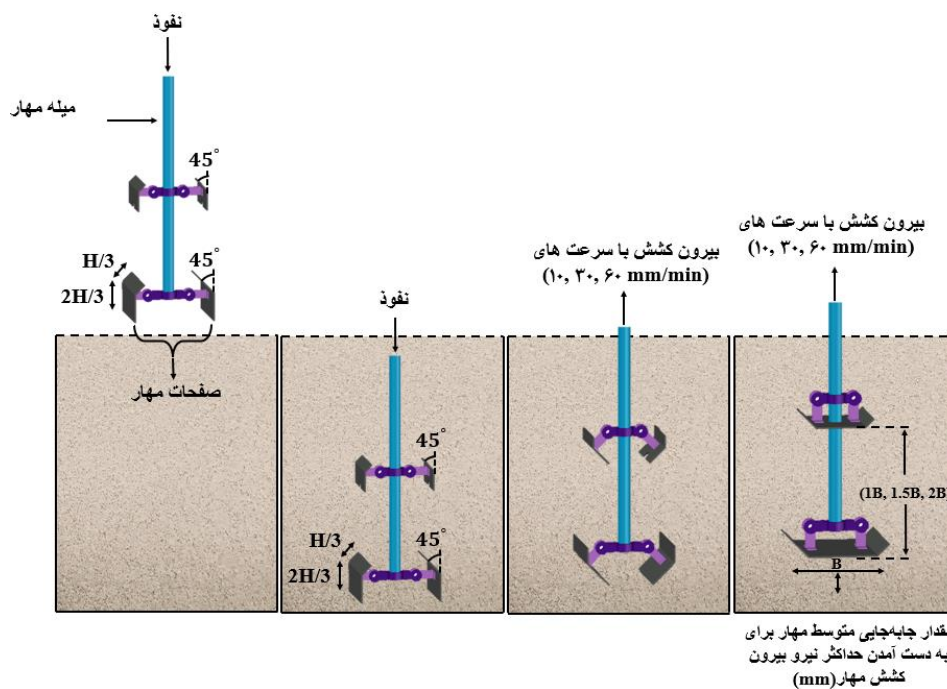
شکل ۴- نحوه تقسیم‌بندی محفظه آزمایشگاهی

۳- روش انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش در مرحله اول، محفظه آزمایشگاهی با استفاده از روش کنترل وزن مخصوص خاک پر شد؛ بدین‌صورت که برای پر کردن محفظه با سه دانسیته نسبی ۳۵، ۶۰ و ۸۰٪ در ابتدا با انجام آزمایش دانسیته نسبی ماسه، مقدار حداکثر و حداقل وزن مخصوص خاک تعیین گردید. با استفاده از رابطه (۲)، وزن مخصوص موردنیاز برای دانسیته نسبی موردنظر مشخص شد که در آن، Dr دانسیته نسبی خاک، γ وزن مخصوص خاک و γ_{min} و γ_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل وزن مخصوص خاک می‌باشد. در مرحله بعد، محفظه آزمایش به ارتفاع یک متر به ۱۰ قسمت مساوی (هر قسمت ۰/۱ متر) مطابق شکل ۴ تقسیم گردید. با استفاده از رابطه (۳)، وزن موردنیاز از خاک برای هر لایه محاسبه شد. در این رابطه، پارامتر w وزن و v حجم خاک می‌باشد. برای جای‌گیری مقدار وزن محاسبه‌شده از خاک در هر لایه از یک کوبه فولادی ۸ کیلوگرم استفاده شد؛ به‌گونه‌ای که در هر آزمایش وزن، تعداد ضربات و ارتفاع رهاسازی کوبه بر روی خاک یکسان بوده است. به‌منظور اطمینان از یکنواختی دانسیته نسبی در خاک، در همه

در خاک، صفحات شروع به باز شدن می‌نمایند و در نهایت، مهار فعال می‌شود. هم‌زمان با بیرون کشش مهار، نیروی بیرون کشش و جابه‌جایی قائم مهار توسط ابزارهای دقیق و نرم‌افزار تعبیه شده ثبت می‌گردد (شکل ۵).

در آزمایش‌های انجام شده برای تحلیل PIV، عکس‌هایی از وجه شیشه‌ای محفظه در حین انجام آزمایش بیرون کشش گرفته شد و از نرم‌افزار متلب به منظور پردازش تصاویر برای تعیین سطوح گسیختگی استفاده گردید.



شکل ۵- نحوه نصب و فعال‌سازی مهارها

بازشو سه سرعت ۱۰، ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد.

برای سادگی در شناسایی هر آزمایش، از یک علامت اختصاری استفاده گردید. در ستون نام آزمایش جدول ۳، قسمت اول از چپ به راست نشان‌دهنده نحوه توزیع مساحت است (E به معنای توزیع متوازن مساحت در صفحات (Equal) و UE به معنای توزیع نامتوازن مساحت در صفحات (Unequal)). توزیع نامتوازن مساحت در صفحات به دو شکل انجام شده است. در گروه اول (UE-1)، دوسوم از مساحت کل در صفحه واقع در

پس از پر شدن کامل محفظه آزمایش، مرحله دوم نصب مسلح‌کننده آغاز گردید. صفحات مهار به میله مهار متصل و میله مهار به نیروسنج پیچ شد. سپس مهار به صورت بسته تا عمق ۰/۹ متر داخل خاک نفوذ یافت. این عمق به دلیل جلوگیری از هرگونه اندرکنش مهار با کف محفظه انتخاب شده است. سرعت نفوذ مسلح‌کننده در تمامی آزمایش‌ها برابر ثابت یک میلی‌متر بر دقیقه بود. با شروع آزمایش، موتور با سرعت‌های تعیین شده ۱۰، ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه شروع به بیرون کشیدن مهارها (حرکت رو به بالا) از خاک می‌کند و با بیرون کشش مهار

۴- طبقه‌بندی آزمایش

برای بررسی تأثیر متغیرهایی مانند دانسیته نسبی خاک، فاصله بین صفحات، نحوه توزیع مساحت در صفحات و سرعت بیرون کشش بر عملکرد مهارهای دوصفحه‌ای بازشو نصب شده در بستر ماسه‌ای، ۲۵ آزمون آزمایشگاهی انجام شد. جزئیات آزمون‌های آزمایشگاهی در جدول ۴، ارائه شده است. به منظور بررسی تأثیر سرعت بیرون کشش بر ظرفیت بیرون کشش مهارهای مکانیکی

قرار گرفته است. بخش‌های بعدی به ترتیب نشان‌دهنده فاصله بین صفحات، دانسیته نسبی خاک و سرعت بیرون‌کشش مهار می‌باشند.

ارتفاع پایین‌تر و یک‌سوم از مساحت کل در صفحه موجود در تراز بالاتر قرار گرفته است. در گروه دوم (UE-2)، دوسوم از مساحت کل در صفحه واقع در تراز بالاتر و یک‌سوم از مساحت کل در صفحه واقع در تراز پایین‌تر

جدول ۳- برنامه آزمایش‌ها

ردیف	نام آزمایش	سرعت بیرون کشیدگی (mm/min)	دانسیته نسبی (%)	فاصله بین صفحات صفحه مهار (S)	نحوه توزیع مساحت	
۱	E, 1B, 35%, V30	۱۰	۳۵	۱B	E	
۲	E, 1B, 60%, V30	۳۰	۶۰	۱B		
۳	UE-1, 1B, 35%, V10	۱۰	۳۵	۱B	UE-1	
۴	UE-1, 1B, 35%, V30	۳۰				
۵	UE-1, 1B, 35%, V60	۶۰				
۶	UE-1, 1B, 60%, V10	۱۰				
۷	UE-1, 1B, 60%, V30	۳۰				
۸	UE-1, 1B, 60%, V60	۶۰				
۹	UE-1, 1B, 80%, V10	۱۰				
۱۰	UE-1, 1B, 80%, V30	۳۰				
۱۱	UE-1, 1B, 80%, V60	۶۰				
۱۲	UE-1, 1.5B, 35%, V10	۱۰	۳۵	۱/۵B		
۱۳	UE-1, 1.5B, 35%, V30	۳۰				
۱۴	UE-1, 1.5B, 35%, V60	۶۰				
۱۵	UE-1, 1.5B, 60%, V10	۱۰	۶۰			
۱۶	UE-1, 1.5B, 60%, V30	۳۰				
۱۷	UE-1, 1.5B, 60%, V60	۶۰				
۱۸	UE-1, 2B, 35%, V10	۱۰	۳۵			۲B
۱۹	UE-1, 2B, 35%, V30	۳۰				
۲۰	UE-1, 2B, 35%, V60	۶۰				
۲۱	UE-1, 2B, 60%, V10	۱۰	۶۰			
۲۲	UE-1, 2B, 60%, V30	۳۰				
۲۳	UE-1, 2B, 60%, V60	۶۰				
۲۴	UE-2, 1B, 35%, V30	۱۰	۳۵	۱B	UE-2	
۲۵	UE-2, 1B, 60%, V30	۳۰	۶۰			

۵- بحث و نتیجه‌گیری

۵-۱- بررسی سرعت بیرون‌کشش مهار (UE-1)

که تغییر سرعت نفوذ بر ظرفیت بیرون‌کشش مهار تأثیرگذار است [۶۸ و ۶۹]. با اینحال، سرعت بیرون‌کشش مهارها مورد بررسی قرار نگرفته و در تحقیقات پیشین، سرعت بیرون‌کشش مهارهای دوصفحه‌ای ثابت در نظر گرفته شده بود [۲۸ و ۶۱]. در این مطالعه، با انجام ۲۵ آزمون آزمایشگاهی با سه سرعت بیرون‌کشش متفاوت، اثر

سرعت نفوذ مهارهای دینامیکی به داخل خاک توسط برخی محققان بررسی شده است. نتایج نشان داد

به تراکم مناسب، نیروی محرک مورد نیاز برای بازشدگی مهارها فراهم می‌شود. از این‌رو، با افزایش سرعت بیرون‌کشش، به دلیل باز شدن مهار در عمق مدفون کمتر، حجم کمتری از خاک بر روی صفحات مهارها قرار می‌گیرد و نیروی بیرون‌کشش کاهش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بهترین سرعت بیرون‌کشش در دانسیته نسبی ۳۵ درصد خاک و فاصله بین صفحات ۱B، از بین سرعت‌های بررسی شده، برابر با ۱۰ میلیمتر بر دقیقه می‌باشد.

اندرسون^{۱۶} و همکاران بیان کرده‌اند که تغییرات دانسیته نسبی خاک تأثیر مستقیم بر روی زاویه اصطکاک و اتساع خاک دارد که با افزایش آن مقدار این زاویه‌ها افزایش پیدا می‌کند [۷۰]. همچنین، تیلک در مطالعه بر روی مهارهای دوصفحه‌ای بیان داشت که به دلیل قرارگیری صفحات مهار در عمق بیشتر و تأثیر عمق (افزایش دانسیته نسبی خاک) بر روی زاویه اتساع و اصطکاک این زوایا به‌طور غیرمستقیم بر روی ظرفیت بیرون‌کشش مهارها تأثیرگذار هستند [۲۸].

با توجه به مطالب بیان‌شده می‌توان نتیجه گرفت که مقدار زاویه اصطکاک و اتساع خاک در کنار افزایش سرعت بیرون‌کشش مهار، تأثیر به‌سزایی در افزایش ظرفیت بیرون‌کشش دارد. بنابراین، تنها به سرعت بیرون‌کشش مهار به‌عنوان پارامتر تأثیرگذار بر مهارهای دوصفحه‌ای بازشو اکتفا کردن مناسب نیست و لازم است که در کنار سرعت بیرون‌کشش مهار، تأثیر دانسیته نسبی خاک نیز مورد بررسی قرار گیرد. از این‌رو، دو دانسیته نسبی ۶۰ و ۸۰ درصد در ادامه بررسی شد.

تأثیر سرعت بیرون‌کشش بر مهارهای UE-1 با فاصله بین صفحات ۱B که خاک با دانسیته نسبی ۶۰٪ قرار دارند، در شکل ۶- ب نمایش داده شده است. در جدول ۴ نیز مقادیر حداکثر نیروی بیرون‌کشش و تغییرات آن در خاک با دانسیته نسبی ۶۰ درصد مشاهده می‌شود.

سرعت بر ظرفیت بیرون‌کشش مهار با فواصل مختلف بین صفحات مورد بررسی قرار گرفت.

۵-۲- تأثیر سرعت بیرون‌کشش در مهارها UE-1 با فاصله 1B

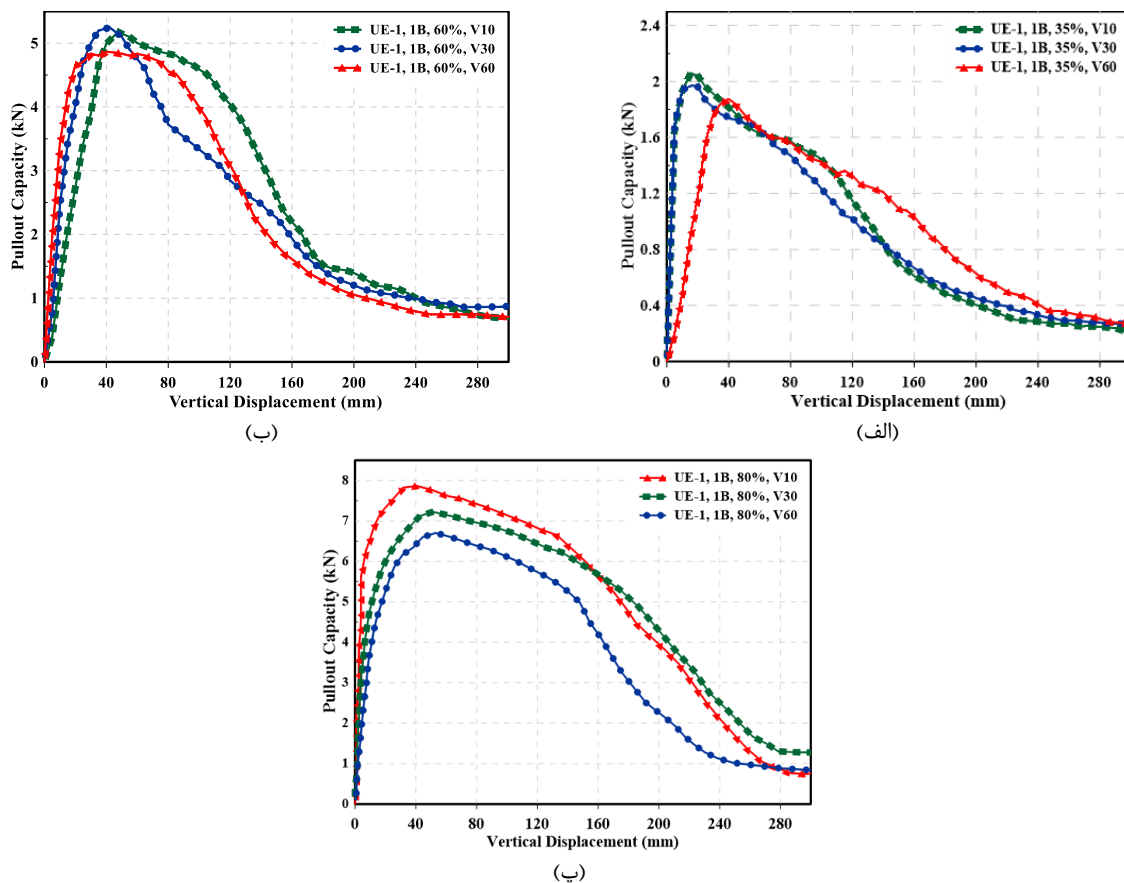
برای بررسی تأثیر سرعت، در ابتدا سرعت ۶۰ میلیمتر بر دقیقه به‌عنوان سرعت بالا و سرعت ۱۰ میلیمتر بر دقیقه به‌عنوان سرعت پایین برای مهارها انتخاب شد. سپس با بررسی نتایج، سرعت ۳۰ میلیمتر بر دقیقه نیز به سرعت‌های مورد بررسی اضافه شد تا با مقایسه نتایج، بهترین سرعت برای بیرون‌کشش مهارهای مورد مطالعه در این تحقیق معرفی گردد.

عملکرد مهارهای بازشو به این صورت است که در سازوکار باز شدن صفحات مهار، نیرویی ناشی از حجم خاک قرار گرفته در پشت صفحات مهار از باز شدن مهارها جلوگیری می‌کند که به‌عنوان نیروی مقاوم شناخته می‌شود. هنگامی که مهارها بیرون کشیده می‌شوند، حجم خاک قرار گرفته روی صفحه به همراه وزن مهارها به باز شدن آن‌ها کمک می‌کند؛ که به‌عنوان نیروی محرک معرفی می‌شود. با غلبه نیروی محرک بر نیروی مقاوم، مهار باز می‌شود.

شکل ۶- الف، نشان‌دهنده تأثیر سرعت بیرون‌کشش بر عملکرد مهارهای UE-1 با فاصله بین صفحات ۱B نصب شده در خاک با دانسیته نسبی ۳۵٪ است. میزان حداکثر نیروی بیرون‌کشش و تغییرات آن در جدول ۴ ارائه شده است. تفسیر نتایج نشان می‌دهد که تغییرات سرعت بیرون‌کشش در دانسیته نسبی ۳۵ درصد خاک تأثیر چشمگیری بر مقدار حداکثر نیروی بیرون‌کشش مهارها نداشته است.

در واقع در دانسیته نسبی ۳۵ درصد، افزایش سرعت بیرون‌کشش سبب افزایش سرعت بازشدگی مهارها نمی‌شود. این امر به دلیل وجود خلل و فرج زیاد در خاک‌های سست است که با بیرون‌کشش مهار، ابتدا خاک قرار گرفته بر روی صفحات، فشرده شده و بعد از رسیدن

¹⁶- Andersen



شکل ۶- نمودار تأثیر سرعت بر مهارهای UE-1 با فاصله بین صفحات 1B مدفون در خاک با دانسیته نسبی (الف) ۳۵، (ب) ۶۰ و (پ) ۸۰ درصد

جدول ۴- تأثیر سرعت بیرون کشش بر مهارهای UE-1 با فاصله بین صفحات 1B مدفون در خاک با دانسیته‌های نسبی متفاوت

نام آزمایش	حداکثر نیروی بیرون کشش (kN)	مقدار جابه‌جایی متوسط مهار برای به دست آمدن حداکثر نیرو بیرون کشش مهار (mm)	اختلاف با نیروی بیرون کشش حداکثر (%)
۳۵ درصد			
UE-1, 1B, 35%, V10	۲	۱۵/۵	-
UE-1, 1B, 35%, V30	۱/۹	۱۶/۵	۵/۱
UE-1, 1B, 35%, V60	۱/۸	۴۰/۱	۱۰/۵
۶۰ درصد			
UE-1, 1B, 60%, V10	۵/۱۸	۴۷/۶	۱/۳
UE-1, 1B, 60%, V30	۵/۲۵	۴۲/۲	-
UE-1, 1B, 60%, V60	۴/۹	۴۰/۲	۶/۶
۸۰ درصد			
UE-1, 1B, 80%, V10	۶/۸	۵۰/۲	۱۱/۶
UE-1, 1B, 80%, V30	۷/۷	۴۵/۵	-
UE-1, 1B, 80%, V60	۶/۴	۴۳/۶	۱۶/۸

صفحات، سرعت بازشدگی صفحات نیز افزایش می‌یابد و صفحات در عمق مدفون‌شدگی بیشتری باز می‌شوند. به این ترتیب، وزن خاکی که بر روی صفحات قرار می‌گیرد

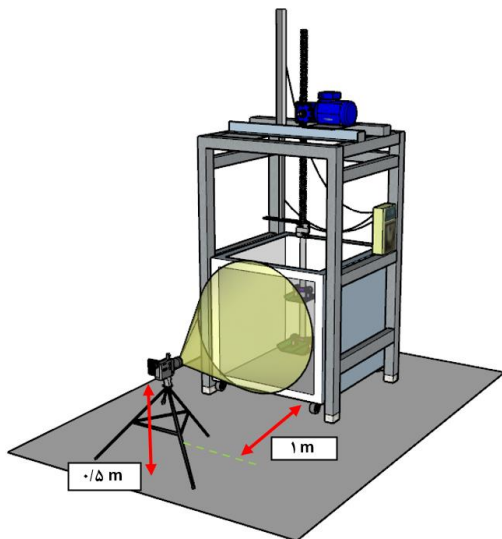
با افزایش سرعت بیرون کشش مهار UE-1 از ۱۰ به ۳۰ میلیمتر بر دقیقه، در خاک با دانسیته نسبی ۶۰٪، به دلیل ایجاد سریع نیروی محرک لازم برای باز شدن

و افزایش دانسیته نسبی باعث افزایش زاویه اتساع و اصطکاک خاک می‌شود، این موضوع را می‌توان نتیجه گرفت که زاویه اصطکاک و زاویه اتساع خاک در افزایش ظرفیت بیرون‌کشش به صورت غیرمستقیم تأثیر داشت [۷۰].

۵-۲-۱- بررسی اثر سرعت بیرون‌کشش مهارها در سطوح گسیختگی با تحلیل PIV

به منظور بررسی گوه‌های گسیختگی شکل گرفته در اثر بیرون‌کشش مهارهای صفحه‌ای بازشو، از روش PIV استفاده شده است. این روش، ابتدا جهت بررسی جریانات نفت و سیالات مورد استفاده قرار می‌گرفت و سپس توسط وایت^{۱۸} و همکاران برای استفاده در مدل‌سازی‌های ژئوتکنیکی نیز مورد استفاده قرار گرفت [۷۳].

جهت انجام تحلیل PIV، یک وجه از محفظه آزمایشگاهی (وجه جلویی) از جنس شیشه نشکن با ضخامت ۳۰ میلیمتر ساخته شد. طی انجام هر آزمایش، از بیرون‌کشش مهار عکس‌های با فاصله زمانی ۱۵ ثانیه از وجه شیشه‌ای محفظه خاک گرفته شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار متلب به تجزیه و تحلیل تغییرات به وجود آمده پرداخته شد. شکل تصویری از موقعیت قرارگیری دوربین تصویربرداری را نشان می‌دهد.



شکل ۷- موقعیت دوربین برای تصویربرداری تحلیل PIV

افزایش می‌یابد و موجب افزایش نیروی بیرون‌کشش می‌شود؛ اما با افزایش سرعت بیرون‌کشش مهار UE-1 از ۳۰ به ۶۰ میلیمتر بر دقیقه در خاک با دانسیته نسبی ۶۰٪، خاک فرصت کافی جهت جابه‌جایی نداشته و سبب شکل‌گیری شکاف^{۱۷} در زیر صفحات می‌شود. این امر به معنای کاهش نیرویی است که توسط حجم خاک بر روی صفحه پایینی وارد می‌شود (به دلیل کاهش حجم خاک قرار گرفته بر روی صفحه پایینی) و در نتیجه، ظرفیت بیرون‌کشش مهارها کاهش می‌یابد. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که برای مهارهای صفحه‌ای سطحی که دارای نسبت $H/B < 5$ (عمق مدفون‌شدگی به عرض صفحات مهار) می‌باشند، اعمال نیروی بیرون‌کشش به مهار، می‌تواند باعث تشکیل شکاف زیر صفحات شده و در نتیجه، ظرفیت بیرون‌کشش مهار را کاهش دهد [۷۱ و ۷۲].

در شکل ۶- پ، نتایج مربوط به بیرون‌کشش مهارهای دو صفحه‌ای UE-1 با سرعت‌های ۱۰، ۳۰ و ۶۰ میلیمتر بر دقیقه مدفون در خاک با دانسیته نسبی ۸۰٪ نمایش داده شده است. تحلیل نتایج موجود در شکل ۶- پ نشان می‌دهد که مشابه با نتایج ارائه شده در شکل ۶- ب، مهار دو صفحه‌ای بازشو UE-1 با سرعت بیرون‌کشش ۳۰ میلیمتر بر دقیقه دارای بیشترین نیروی بیرون‌کشش در مقایسه با سرعت‌های ۱۰ و ۶۰ میلیمتر بر دقیقه بود. با این حال، باید توجه داشت که بیشترین نیروی بیرون‌کشش مهارهای UE-1 با فاصله ۱B تحت بیرون‌کشش با سرعت ۳۰ میلیمتر بر دقیقه مدفون در خاک با دانسیته نسبی ۸۰ درصد بیشتر از آن است که مهار در خاک با دانسیته نسبی ۶۰٪ قرار داشت. میزان حداکثر نیروی بیرون‌کشش برای دانسیته نسبی ۸۰٪ خاک و تغییرات آن نیز در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به اینکه بیشترین نیروی بیرون‌کشش برای حالت‌هایی بوده است که دانسیته نسبی افزایش پیدا کرده

18- White

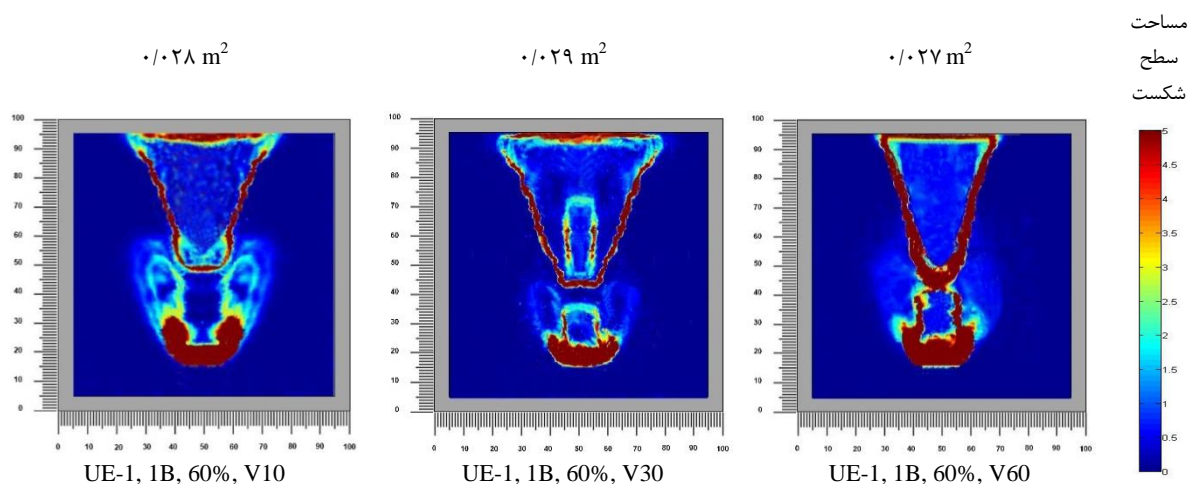
17- Gap

گونه‌های تشکیل شده، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سرعت بیرون‌کشش مهار از ۱۰ به ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه، باعث افزایش مساحت گوه گسیختگی و از ۳۰ به ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه، باعث کاهش مساحت گوه گسیختگی تشکیل شده خواهد گردید. به عبارت دیگر، بیرون کشیدگی مهارها با سرعت ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه باعث به وجود آمدن گوه گسیختگی با بیشترین مساحت می‌شود.

محققین بیان داشتند که گونه‌های گسیختگی با مساحت بیشتر، زاویه اتساع بیشتری نیز دارند [۷۴-۷۷]. همچنین زاویه اتساع، رابطه مستقیمی با زاویه اصطکاک خاک دارد (رابطه (۱)). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت بیرون‌کشش مهار از ۱۰ به ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه، مساحت گوه گسیختگی افزایش یافته و زاویه اصطکاک و مقاومت برشی خاک نیز افزایش خواهد یافت. این موضوع را می‌توان در نمودارهای ظرفیت بیرون‌کشش مهارها با افزایش نیروی بیرون‌کشش نیز مشاهده کرد.

برای اطمینان از صحت کدهای استفاده‌شده در نرم‌افزار متلب، پیش از انجام آزمایش‌ها، تصاویر گرفته شده از مطالعه جلالی‌مقدم و همکاران و محمدخانی فرد و همکاران در نرم‌افزار تحلیل شدند [۶۱]. نتایج به‌دست آمده با نتایج ارائه‌شده در مقالات محققین تطابق داشت که این امر موجب اطمینان از صحت نتایج به‌دست آمده توسط نرم‌افزار متلب گردید.

نتایج تحلیل PIV انجام شده بر روی مهارهای مدفون در خاک ماسه‌ای در شکل ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که بازه کرنش‌های برشی به‌وجود آمده در مدل در سمت راست تصاویر می‌باشد. بررسی تصاویر خروجی از تحلیل PIV نشان داد که افزایش سرعت بیرون‌کشش مهارها باعث تغییر سرعت بازشدگی آن‌ها می‌شود و در نتیجه، مقدار کرنش برشی در خاک نیز تغییر می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات سرعت بیرون‌کشش مهار تأثیر مستقیمی بر روی گوه گسیختگی تشکیل شده در خاک دارد. با مقایسه مساحت



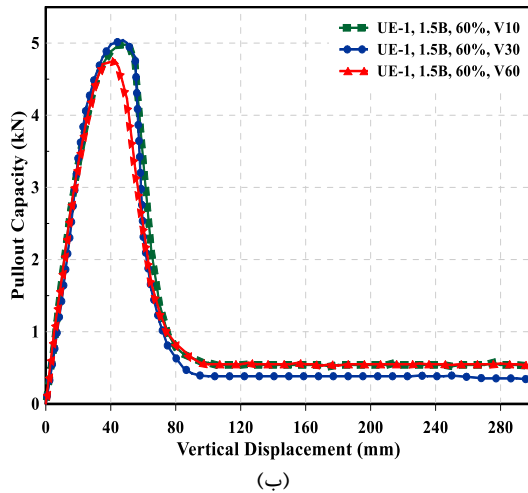
شکل ۸- تأثیر سرعت بیرون‌کشش بر مهارهای UE-1 با فاصله بین صفحات ۱B مدفون در خاک با تراکم نسبی ۶۰٪

بررسی نتایج ارائه شده در این شکل‌ها نشان می‌دهد که تفاوت چندانی با نتایج به‌دست آمده برای مهار UE-1 با فاصله ۱B (شکل ۶- الف و ب) وجود ندارد؛ و بیشینه نیروی بیرون‌کشش برای مهارهای دوصفحه‌ای بازشو در خاک ماسه‌ای با دانسیته نسبی ۳۵ و ۶۰٪، به ترتیب با سرعت‌های بیرون‌کشش ۱۰ و ۳۰ میلی‌متر بر

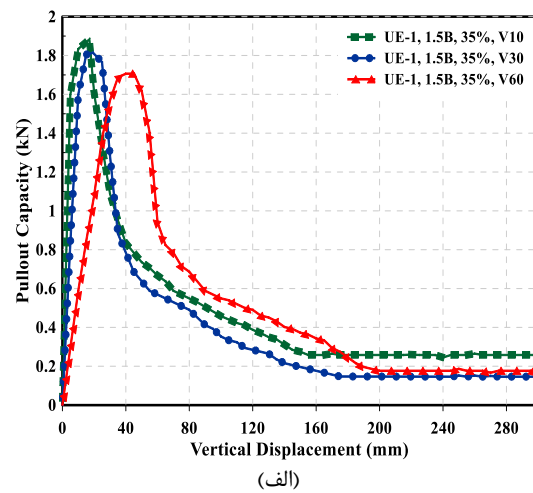
۵-۳- تأثیر سرعت بیرون‌کشش در مهارهای UE-1 با فاصله ۱/۵B و ۲B

نمودار ظرفیت بیرون‌کشش در برابر جابه‌جایی قائم برای مهارهای UE-1 با فاصله بین صفحات ۱/۵B و ۲B به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است.

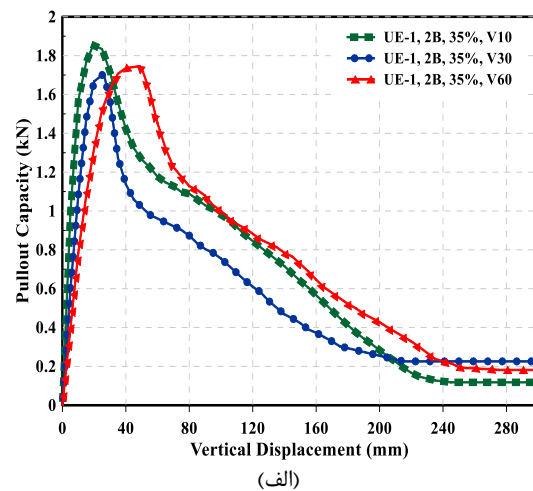
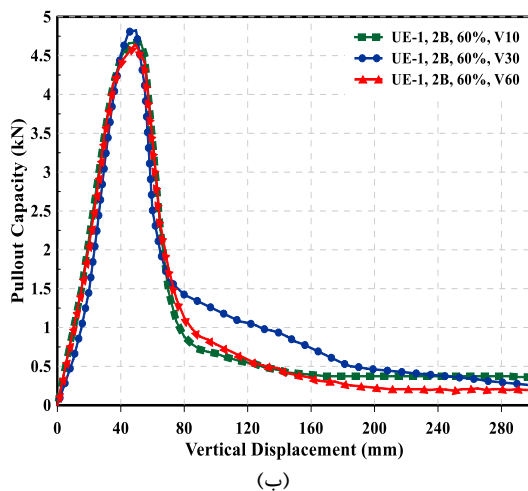
ترتیب برابر با $1/88$ و $1/85$ کیلونیوتن بوده است؛ و در خاک با دانسیته نسبی 60% درصد، برابر با مقادیر $5/04$ و $4/82$ کیلونیوتن بود.



دقیقه حاصل شد. بیشینه نیروی بیرون کشش برای مهارهای UE-1 که در خاک با دانسیته نسبی 35% درصد مدفون شده بود، برای فواصل بین صفحات $1/5B$ و $2B$ به



شکل ۹- نمودار تأثیر سرعت بر مهارهای UE-1 با فاصله بین صفحات $1/5B$ ، (الف) دانسیته نسبی 35% و (ب) دانسیته نسبی 60% .



شکل ۱۰- نمودار تأثیر سرعت بر مهارهای UE-1 با فاصله بین صفحات $2B$ ، (الف) دانسیته نسبی 35% و (ب) دانسیته نسبی 60% .

به کاهش بیشینه نیروی بیرون کشش مهارهای دوصفحه‌ای می‌شود [۲۸].

تحلیل نتایج حاکی از آن بود که روند تغییرات جابه‌جایی متناظر با بیشینه نیروی بیرون کشش برای مهارهای UE-1 با فاصله بین صفحات برابر با $1/5B$ و $2B$ نیز مشابه با تغییرات جابه‌جایی متناظر با بیشینه نیروی بیرون کشش برای مهارهای UE-1 با فاصله $1B$ بود. بیشترین جابه‌جایی متناظر با بیشینه نیروی بیرون کشش برای مهارهای UE-1 مدفون در خاک با دانسیته نسبی 35% درصد، برای فواصل صفحات $1/5B$ و $2B$ به ترتیب

نتایج مطالعه مشابه انجام گرفته توسط تیلک و کومار سامادها بر روی مهار دوصفحه‌ای ثابت نشان داد که برای مهارهای دوصفحه‌ای ثابت کم عمق، با افزایش فاصله بین صفحات تا $2B$ ، میزان حجم حباب تنش شکل گرفته در بین صفحات افزایش یافته است. همچنین بیان داشتند که افزایش فاصله بین صفحات باعث کاهش محصورسازی^{۱۹} ماسه بین صفحات شده و این پدیده منجر

¹⁹- Confinement

باز شدن صفحات، ظرفیت بیرون‌کشش مهارها افزایش می‌یابد.

۵-۵- مدت‌زمان باربری مهارها و تأثیر دانسیته نسبی خاک

برای ارزیابی میزان کارایی مهارهای صفحه‌ای بازشو، مدت زمان باربری مهار، مورد بررسی قرار گرفته است. که نشان‌دهنده عملکرد مهار در برابر بارهای وارده و ظرفیت آن برای حفظ پایداری سازه می‌باشد.

برای محاسبه مدت زمان باربری، از پارامتر جابه‌جایی متناظر مهار با بیشینه نیروی بیرون‌کشش (DP^{20}) استفاده شده است. این پارامتر، معرف میزان جابه‌جایی می‌باشد که مهار دارای نیروی بیرون‌کشش حداکثر با بیشینه اختلاف ۵٪ است. به عبارت دیگر، وقتی نیروی بیرون‌کشش به حداکثر مقدار خود می‌رسد، مقدار مشخصی از جابه‌جایی در حالت پیک همچنان باقی می‌ماند. پارامتر DP ، مسافتی بین شیب بالارفتگی و پایین‌رفتگی طی شده در نمودار نیروی بیرون‌کشش و جابه‌جایی مهار است

برای محاسبه مدت زمان باربری مهارها، با توجه به اینکه سرعت بیرون‌کشش مهارها در طول انجام آزمایش ثابت بوده است؛ از اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی متناظر با بیشینه نیروی بیرون‌کشش (DP) توسط جابه‌جایی‌سنج استفاده شد. این اندازه‌گیری امکان محاسبه مدت زمان بارگذاری مهارها (مدت زمان جابه‌جایی DP با سرعت بیرون‌کشش ثابت) را فراهم می‌کند. توجه داشته باشید که هرچه مقدار DP بیشتر باشد، مدت‌زمان باربری نیز بیشتر خواهد بود. زمان با جابه‌جایی مهار، رابطه مستقیم و با سرعت بیرون‌کشش مهار، رابطه غیرمستقیم دارد. شکل ۱۱ تأثیر دانسیته نسبی خاک بر نیروی بیرون‌کشش مهار UE-1 و شکل ۱۲، مدت زمان باربری مهارها در

برابر با ۴۵/۲ و ۴۸/۸ میلیمتر تحت سرعت بیرون‌کشش ۶۰ میلیمتر بر دقیقه رخ داده بود. برای مهارهای UE-1 مدفون در خاک با دانسیته نسبی ۶۰ درصد، بیشترین جابه‌جایی متناظر با بیشینه نیروی بیرون‌کشش برای مهار با فاصله صفحات برابر با ۱/۵B و ۲B به ترتیب برابر با ۵۱/۱ و ۵۳/۵ میلیمتر تحت سرعت بیرون‌کشش ۱۰ میلیمتر بر دقیقه شکل گرفته بود.

۵-۴- تأثیر دانسیته نسبی خاک بر بیرون‌کشش متناظر با بیشینه نیرو

به‌طور کلی، قابلیت باربری مهارهای صفحه‌ای را می‌توان ناشی از حجم خاک قرار گرفته بر روی صفحه مهار و مقاومت برشی و سختی خاک در امتداد خطوط گسیختگی (زاویه‌ای بین سطح گسیختگی و سطح افق) دانست [۱]. مهارهای صفحه‌ای بازشو ابتدا به‌صورت بسته (صفحات عمودی) داخل خاک نفوذ می‌کنند و با شروع بیرون‌کشش، صفحات باز و مهار فعال می‌شود [۶۰]. با توجه به مکانیزم بازشدگی مهارهای صفحه‌ای بازشو، با شروع بیرون‌کشش مهار، مقدار نیروی بیرون‌کشش افزایش یافته تا زمانی که صفحات کاملاً افقی شود. در این حالت، نیروی بیرون‌کشش به حداکثر خود می‌رسد. هرچه بیرون‌کشش لازم برای باز شدن صفحات کمتر باشد، مهارها در عمق بیشتری از خاک فعال می‌شوند و در نتیجه، ظرفیت بیرون‌کشش مهار به دلیل افزایش حجم خاک بر روی صفحات قرار گرفته بیشتر می‌شود.

نتایج مطالعه حاضر، نشان می‌دهد که با افزایش دانسیته نسبی خاک از ۳۵ به ۶۰٪، بیشینه نیروی بیرون‌کشش مهار افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از وزن بیشتر خاک روی صفحات و همچنین افزایش زاویه اصطکاک خاک است که با افزایش دانسیته نسبی خاک ایجاد می‌شود. با افزایش زاویه اصطکاک، زاویه بین سطح گسیختگی و سطح افق کاهش یافته و گوه گسیختگی بزرگتری تشکیل می‌شود. بنابراین با افزایش دانسیته نسبی خاک، حتی با وجود افزایش بیرون‌کشش لازم برای

²⁰- Distance With Maximum Pull Out Force

بی شک بالا رفتن دانسیته نسبی باعث خواهد که این فضا در زمان کمتری به حالت فشردگی مورد نیاز خود برسد. در نتیجه، افزایش دانسیته نسبی خاک، علاوه بر افزایش بیشینه ظرفیت بیرون کشش مهار، باعث افزایش مدت باربری مهار می شود.

۵-۶- نحوه توزیع مساحت

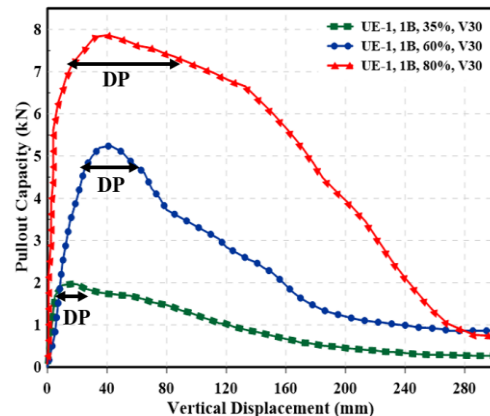
یکی از پارامترهای مؤثر بر ظرفیت بیرون کشش مهارهای صفحه ای، مساحت صفحات مهار است. افزایش اندازه این صفحات منجر به افزایش ظرفیت بیرون کشش مهار می شود و تأثیر آن بر توزیع فشار خاک و به طور مستقیم بر ظرفیت بیرون کشش مهار قابل توجه است [۱۱]. با این حال، در تحقیقات اخیر، به نحوه توزیع مساحت در صفحات مهار کمتر توجه شده است. به همین دلیل، این مطالعه به بررسی این مسئله پرداخته است.

شکل ۱۳، نتایج آزمایش بیرون کشش بر روی مهارهای دو صفحه ای بازشو با توزیع مساوی و نامساوی مساحت در صفحات را نشان می دهد. براساس نتایج به دست آمده از آزمایش ها می توان نتیجه گرفت که وجود توزیع نامساوی مساحت در صفحات منجر به افزایش ظرفیت بیرون کشش مهار می شود. اما نکته قابل توجه، انتخاب موقعیت قرارگیری صفحات است. در این مطالعه، سه نوع توزیع مساحت در صفحات E، UE-1 و UE-2 برای بررسی اثر آن در دو دانسیته نسبی ۳۵ و ۶۰ درصد مورد استفاده قرار گرفته است. مهارها دارای فاصله بین صفحات ۱B و سرعت بیرون کشش ۱۰ میلی متر بر دقیقه در خاک با دانسیته نسبی ۳۵ درصد و سرعت بیرون کشش ۳۰ میلی متر بر دقیقه در خاک با دانسیته نسبی ۶۰ درصد بودند. علت انتخاب فاصله بین صفحات و سرعت بیرون کشش مهارها به موجب اثبات بهینه بودن این مقادیر در آزمایش ها و نتایج معرفی شده در بخش های قبل می باشد.

شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نمایش دهنده نمودار نیروی بیرون کشش- جابه جایی مهار و درصد تغییرات

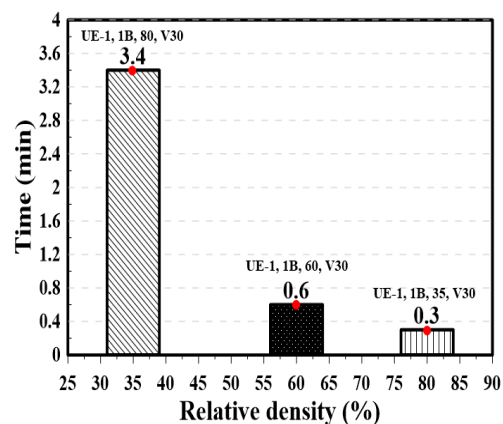
دانسیته نسبی مختلف را نشان می دهد که براساس اندازه گیری DP محاسبه شده است.

با توجه به شکل و ۱۲، با افزایش دانسیته نسبی خاک، مدت باربری مهارها و ظرفیت بیرون کشش آنها افزایش می یابد. با افزایش دانسیته نسبی از ۳۵ به ۶۰٪، ظرفیت بیرون کشش و مدت باربری به ترتیب ۲/۸ و ۳/۳ برابر افزایش یافته است.



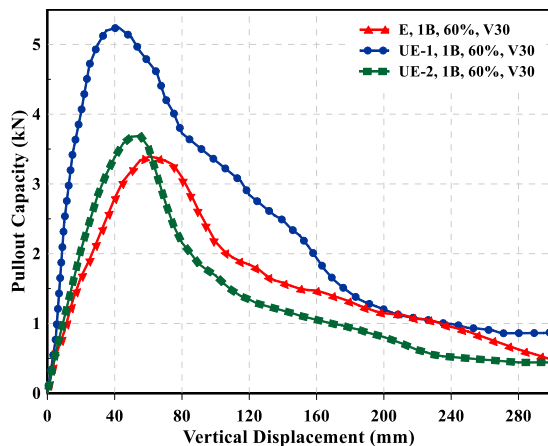
شکل ۱۱- نمودار تأثیر دانسیته نسبی بر نیروی بیرون کشش مهارهای UE-1

همچنین، با افزایش دانسیته نسبی از ۶۰ به ۸۰٪، ظرفیت بیرون کشش و مدت باربری به ترتیب ۱/۴۵ و ۲/۲ برابر افزایش یافته است. باید توجه داشت که پس از چرخش کامل صفحات، خاک قرار گرفته در بالای صفحه باید کاملاً فشرده شود تا فضای غیرمترکمی که به خاطر چرخش صفحات ایجاد شده است را جبران کند.

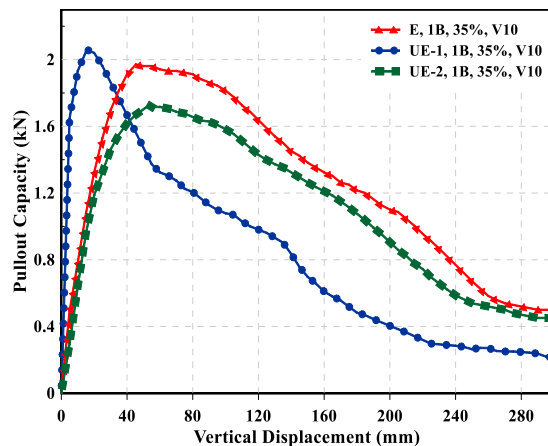


شکل ۱۲- نمودار مدت زمان باربری مهار نسبت به دانسیته نسبی

کاهش یافته است (شکل ۱۳-الف). در مقابل، در خاک با دانسیته نسبی ۶۰ درصد، ظرفیت بیرون‌کشش مهار از حالت E به هر دو حالت UE-1 و UE-2 افزایش یافته است (شکل ۱۳-ب).



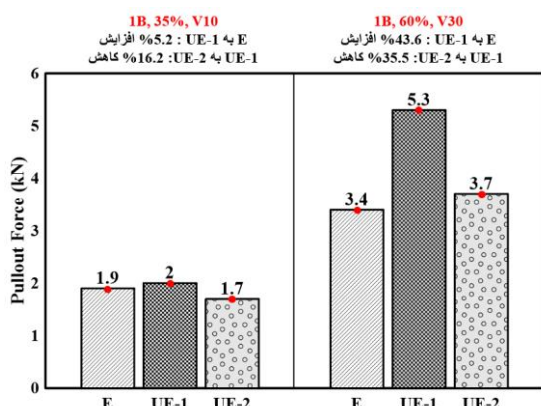
(ب)



(الف)

شکل ۱۳- نمودار ظرفیت جابه‌جایی- بیرون‌کشش آزمایش‌های E، UE-1 و UE-2 با فاصله بین صفحات 1B و (الف) خاک با دانسیته نسبی ۳۵٪ و سرعت بیرون‌کشش ۱۰ و (ب) خاک با دانسیته نسبی ۶۰٪ و سرعت بیرون‌کشش ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه

به دلیل فشردگی و وزن زیاد خاک محصور بین دو صفحه، با بیرون‌کشش کمتری نیروی موردنیاز جهت بازشدگی صفحه پایینی فراهم شده و مهار UE-2 دارای ظرفیت بیرون‌کشش بیشتری نسبت به E بود (شکل ۱۳-ب).



شکل ۱۴- مقایسه تغییرات بیشینه نیروی بیرون‌کشش مهار با توزیع مساحت‌های E، UE-1 و UE-2

۵-۶-۱- تأثیر توزیع مساحت در مهار دوصفحه‌ای بازشو بر گوه‌گیختگی

تأثیر توزیع مساحت در مهار دوصفحه‌ای بازشو بر گوه‌گیختگی در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.

بیشینه نیروی بیرون‌کشش مهارهای گروه E، UE-1 و UE-2 می‌باشند. با تغییر توزیع مساحت صفحات از حالت E به UE-1 و UE-2، ظرفیت بیرون‌کشش مهارها در خاک با دانسیته نسبی ۳۵ درصد به ترتیب افزایش و

قرارگیری صفحه با مساحت بیشتر در عمق پایین‌تر باعث می‌شود که وزن خاک قرارگرفته بر روی صفحه پایینی بیشتر باشد و در نتیجه، گوه‌گیختگی تشکیل‌شده بر روی صفحه پایینی بزرگ‌تر شود. صفحات با مساحت بیشتر مدفون در اعماق پایین‌تر (UE-1) در هر دو دانسیته نسبی بررسی شده، دارای ظرفیت بیرون‌کشش بیشتری در مقایسه با دو مهار دیگر یعنی E و UE-2 بودند. در خاک با دانسیته نسبی کم، زمانی که صفحه با مساحت بیشتر در تراز ارتفاعی بالاتر نسبت به صفحه با مساحت کمتر قرار گیرد، عرض زیاد صفحه بالایی مانع از حرکت دانه‌های خاک به زیر صفحه اول شده، در نتیجه، مهار به بیرون‌کشش بیشتری برای ایجاد نیروی محرک مناسب جهت بازشدگی صفحه پایینی نیاز دارد. متعاقب آن، عمق مدفون‌شدگی مهار کمتر و حجم خاک قرار گرفته بر روی آن کمتر است. به همین دلیل در خاک با دانسیته نسبی ۳۵ درصد مهارهای E دارای نیروی بیرون‌کشش بیشتری نسبت به مهارهای UE-2 است (شکل ۱۳-الف)؛ اما در خاک با دانسیته نسبی بالا

بنابراین، گوه گسیختگی شکل گرفته روی صفحه پایینی کوچک تر و به صورت سطح لغزش با خطوط صاف و بدون انحنا خواهد بود (شکل ۱۵).

۷-۵- فاصله بین صفحات مهار

یکی از راه‌های افزایش ظرفیت بیرون کشش مهارهای صفحه‌ای افزایش تعداد صفحات مهار می‌باشد [۲۸، ۲۹، ۶۲، ۷۴ و ۸۱]. فاصله بین صفحات مهار می‌تواند تأثیر مستقیم بر ظرفیت بیرون کشش مهار داشته باشد. از این رو، بررسی فاصله مناسب بین صفحات مهار که موجب دستیابی به بیشترین ظرفیت بیرون کشش می‌شود، امری ضروری تلقی می‌شود. محمدخانی فرد و همکاران به بررسی مهارهای دو صفحه‌ای باز شو (EMPLAs) با توزیع یکسان مساحت در صفحات پرداختند و فاصله ۱B را به عنوان فاصله بهینه معرفی کردند [۳۵]. در مطالعه پیش رو، با توجه به توزیع نامساوی مساحت در صفحات مهار، فاصله بین صفحات مهار با سه مقدار مختلف ۱B و ۱/۵B و ۲B نیز مورد بررسی قرار گرفت.

در شکل ۱۶- الف، تأثیر تغییر فاصله بین صفحات در مهارهای UE-1 مدفون در خاک با دانسیته نسبی ۳۵ درصد تحت بیرون کشش با سرعت ۱۰ میلیمتر بر دقیقه و در شکل ۱۶- ب نیز تأثیر تغییر فاصله بین صفحات در مهارهای UE-1 مدفون در خاک با دانسیته نسبی ۶۰ درصد تحت بیرون کشش با سرعت ۳۰ میلیمتر بر دقیقه نمایش داده شده است. بیشترین و کمترین ظرفیت بیرون کشش در هر دو دانسیته نسبی بررسی شده به ترتیب مربوط به فواصل ۱B و ۲B می‌باشد که این اختلاف برابر با ۸/۳۷ و ۷/۹۲ درصد می‌باشد. با بیرون کشش مهارها، صفحات به سمت بالا شروع به حرکت کرده و خاک را در بالای خود فشرده می‌کند. کاهش فاصله بین صفحات سبب قفل شدن خاک در بین صفحات و فشرده‌گی بیشتر خاک می‌شود. این کم شدن فاصله نباید باعث جلوگیری از بازشدگی صفحه پایینی

در آزمایش UE-2، کرنش‌های برشی شکل گرفته در طول صفحه پایینی به طور قابل توجهی نسبت به آزمایش UE-1 کاهش یافته‌اند. این کاهش به دلیل قرار دادن صفحه با مساحت بزرگ‌تر در عمق کم‌تری در مهارهای UE-2 اتفاق افتاده است. این امر باعث شده است که صفحه بالایی بخش بیشتری از کرنش‌های برشی را تجربه کند، که در نتیجه، منجر به کاهش کرنش‌های برشی روی صفحه پایینی شده است.

علاوه بر این، گوه گسیختگی در مهارهای فوق از سطح لبه مهار آغاز شده و تا سطح زمین ادامه پیدا کرده است. بنابراین، عمق بیشترین گوه گسیختگی روی صفحه بالایی به ترتیب برای آزمون‌های UE-1، UE-2 و در آخر E بوده است.

مقایسه شکل‌های گوه گسیختگی به دست آمده از تحلیل PIV در این مطالعه با مطالعات مشابه قبلی انجام شده در زمینه مهارهای صفحه‌ای ثابت می‌توان بیان داشت که در لحظه بازشدگی صفحات، گوه گسیختگی بر روی صفحه بالایی به صورت یک منحنی مارپیچ لگاریتمی^{۲۱} شکل گرفته است. این منحنی از لبه‌های مهار شروع شده و تا سطح زمین ادامه پیدا کرده است [۷۸]. در مقابل، گوه گسیختگی شکل گرفته در بالای صفحه پایینی در لحظه بازشدگی صفحات (لحظه پیک نیروی بیرون کشش)، به صورت یک هرم قطع شده در رأس^{۲۲} است. این شکل از سطح لغزش در مطالعات مشابه انجام شده بر روی مهارهای صفحه‌ای ثابت نیز مشاهده شده است [۷۹ و ۸۰].

همچنین، حجم خاک قرار گرفته بین صفحات بالایی و پایینی کمتر از حجم خاک قرار گرفته بر روی صفحه بالایی بوده است. این تفاوت در حجم خاک باعث شده است که در حین بیرون کشش مهار، حجم خاک بسیج شده برای جابه‌جایی بر روی صفحه پایینی کمتر باشد.

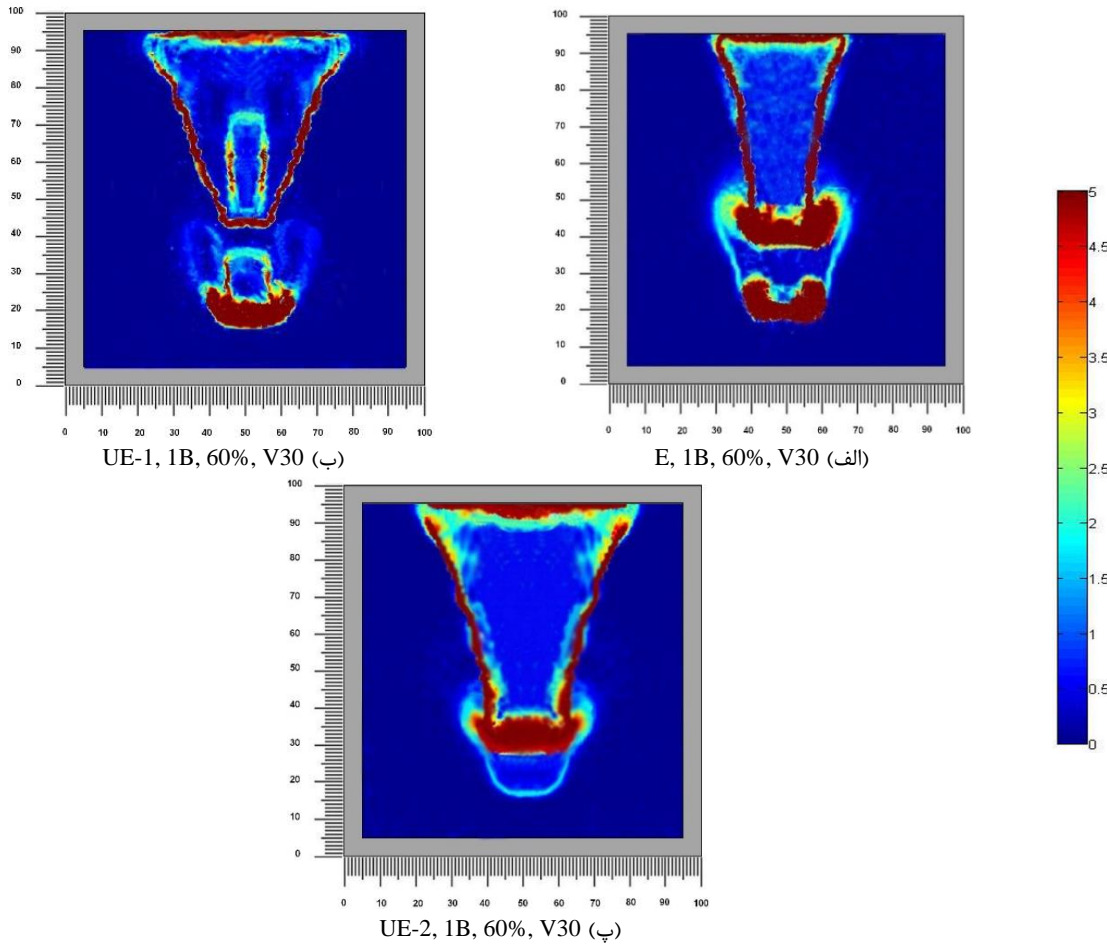
²¹- Logarithmic Spial Curve

²²- Truncated pyramidal shape

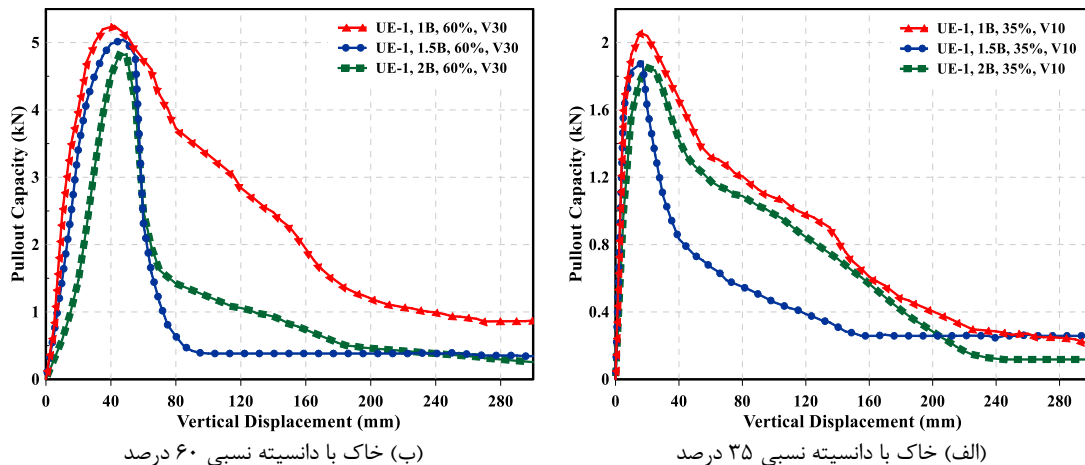
بیرون‌کشش تأثیر دارد. در واقع در حالتی که فاصله بین صفحات برابر با ۱B است، مهار پس از رسیدن به بیشینه نیروی بیرون‌کشش به تدریج مقاومت خود را از دست داده اما در فاصله ۲B مهار پس از رسیدن به حداکثر نیروی بیرون‌کشش، به‌طور ناگهانی نیروی قابل تحمل مهار کاهش می‌یابد.

شود. در این تحقیق قرار دادن صفحه بالا در فاصله‌ای کمتر از ۱B منجر به جلوگیری از باز شدن صفحه پایینی شده است.

تغییر فاصله بین صفحات مهار علاوه بر تأثیر بر روی بیشینه نیروی بیرون‌کشش، به میزان زیادی بر سرعت کاهش ظرفیت بیرون‌کشش پس از بیشینه نیروی



شکل ۱۵- تأثیر توزیع مساحت در مهار دوصفحه‌ای بازشو بر گوه گسیختگی



شکل ۱۶- تغییرات ظرفیت جابه‌جایی- بیرون‌کشش آزمایش UE-1 با فواصل بین صفحات ۱B، ۱/۵B و ۲B

مشابه با گوه گسیختگی در بالای مهارهای صفحه‌ای ثابت است [۸۲ و ۸۳]. در این نوع از گسیختگی، سطح لغزش در بالای صفحات به صورت صاف و بدون انحنا به شکل یک استوانه تشکیل می‌شود. همچنین، افزایش فاصله صفحات در مهارهای مذکور از ۱B به ۲B باعث می‌شود که سطوح لغزش شکل گرفته در امتداد صفحات با هم تلاقی نداشته باشند. در این حالت، سطح لغزش شکل گرفته بر روی صفحه بالایی به سطح زمین می‌رسد، که به دلیل قرار گرفتن صفحه بالایی در عمق مدفون کمتر (نزدیک به سطح زمین) در زمان باز شدن صفحات است.

با بررسی شکل ۱۷ می‌توان بیان داشت که برای مهارهای UE-1 مدفون در خاک ماسه‌ای تحت بیرون کشش با سرعت ثابت ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه، کاهش دانسیته نسبی خاک از ۶۰ به ۳۵٪ منجر به کاهش کرنش‌های برشی شکل گرفته در سطح لغزش در امتداد لبه صفحه پایینی مهار می‌شود. همچنین، اندازه گوه گسیختگی شکل گرفته در راستای صفحه پایینی مهارهای UE-1 در خاک با دانسیته نسبی ۳۵٪ کوچک‌تر از گوه گسیختگی شکل گرفته در راستای صفحه پایینی مهارهای فوق در خاک با دانسیته نسبی ۶۰٪ بود. علت این موضوع را می‌توان ناشی از کاهش زاویه اصطکاک در نتیجه، کاهش دانسیته نسبی خاک در دانسیته نسبی ۳۵٪ در اثر بیرون کشش مهار دانست.

۵-۸- ضریب شکست

ضریب شکست، بیانگر رابطه بین نیروی مورد نیاز برای بیرون کشیدن مهار از خاک (نیروی بیرون کشش) و ظرفیت نهایی مهار در مقابله با چنین نیروهایی است. این ضریب، یک عامل کلیدی در تعیین پایداری و کارایی مهارها می‌باشد. تئوری‌های مختلفی برای محاسبه ضریب شکست معرفی شده‌اند [۸۴ و ۸۵]. به طور کلی، ضریب شکست برای مهارهای صفحه‌ای افقی ثابت از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

در شکل ۱۷، نتایج تحلیل PIV انجام گرفته بر روی مهارهای UE-1 با فاصله صفحات برابر با ۱B و ۲B نمایش داده شده است.

در فاصله بین صفحات برابر با ۱B، در هنگام تشکیل گوه گسیختگی، صفحه پایین‌تر تمایل به جابه‌جایی خاک بالای خود در اثر اعمال نیروی بیرون کشش دارد؛ اما به دلیل فاصله کم بین صفحات، گوه گسیختگی با رسیدن به صفحه بالایی به صورت مایل شروع به بزرگ‌تر شدن می‌کند و خاک بالای صفحه به همراه خاک اطراف مهار در امتداد کناره‌های صفحه با شیب شروع به حرکت می‌کند (حالت دوزنقه‌ای مطابق با ناحیه A در شکل ۱۷). از طرفی، در فاصله بین صفحات بیشتر (۲B)، با اعمال نیروی بیرون کشش به مهار، خاک بالای صفحه پایین‌تر به صورت یک مستطیل (مطابق ناحیه C در شکل ۱۷)، بدون درگیر کردن خاک اطراف، در امتداد صفحات شروع به حرکت می‌کند که این امر به دلیل فاصله زیاد بین صفحات و کاهش اثر صفحه بالایی بر صفحه پایینی است که منجر به تشکیل گوه گسیختگی کوچک‌تر می‌شود.

در خصوص صفحات بالایی مهار، زمانی که فاصله بین صفحات ۱B باشد، وزن خاک بیشتری روی صفحه قرار می‌گیرد و گوه گسیختگی بزرگ‌تری ایجاد می‌شود؛ زیرا این صفحه در عمق بیشتری واقع شده و نیروی مقاوم بیشتری ایجاد خواهد کرد (شکل ۱۷ ناحیه B)؛ اما در فاصله ۲B، صفحه بالای مهار در عمق کمتر قرار گرفته و حجم خاک روی آن کمتر است. در نتیجه، گوه تشکیل شده برای این صفحه کوچک‌تر بوده و نیروی مقاوم کمتری ایجاد خواهد کرد (شکل ۱۷ ناحیه D).

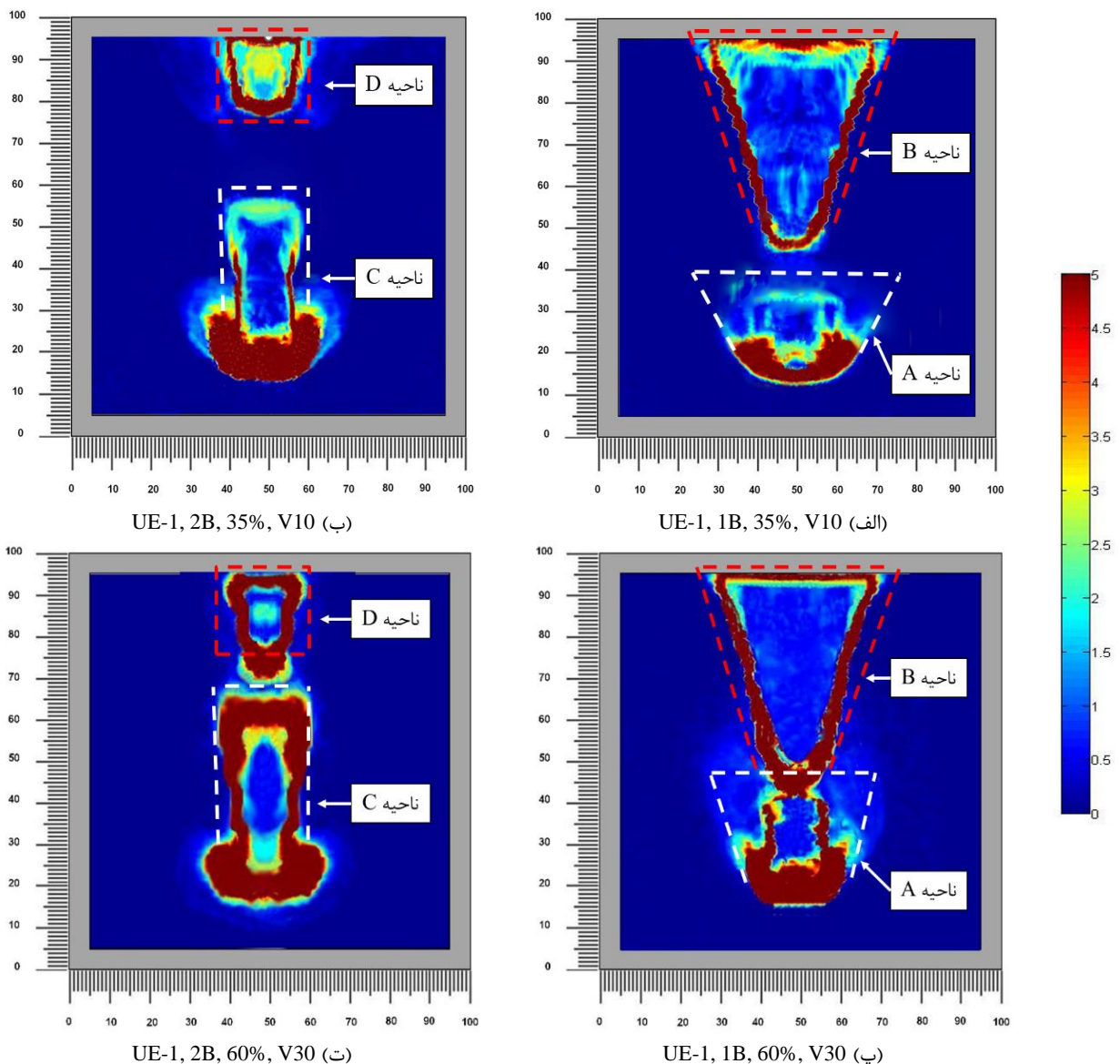
به طور کلی، با افزایش فاصله بین صفحات از ۱B به ۲B در مهارهای UE-1، گوه گسیختگی شکل گرفته در بالای صفحات مهار از حالت دوزنقه‌ای به شکل مستطیلی تغییر می‌کند. مقایسه نتایج این مطالعه با مطالعات قبلی نشان داد که گوه گسیختگی در مهارهای UE-1 با فاصله ۲B در زمان بازشدگی مهار (بیشینه نیروی بیرون کشش)

که در رابطه (۴) و (۵)، Q_u (kN) ظرفیت بیرون‌کشش نهایی (بیشینه نیروی بیرون‌کشش)، γ (kN/m³) وزن مخصوص خاک، A_1 و A_2 به ترتیب مساحت صفحه واقع در تراز پایین‌تر و بالاتر برحسب مترمربع می‌باشد. h_1 و h_2 نیز به ترتیب فاصله بین صفحات در حالت باز شده و فاصله صفحه واقع در تراز بالاتر تا سطح زمین برحسب متر می‌باشد.

$$N = \frac{Q_u}{\gamma A h} \quad (4)$$

عملکرد مهارهای صفحه‌ای بازشو پس از نصب و قفل‌شدگی مهار می‌تواند مانند مهارهای صفحه افقی ثابت باشد. از این‌رو، برای تعیین ضریب شکست در مهارهای ذکر شده از رابطه (۵) که برگرفته از رابطه (۴) می‌باشد، استفاده می‌شود:

$$N = \frac{Q_u}{\gamma (A_1 h_1 + A_2 h_2)} \quad (5)$$



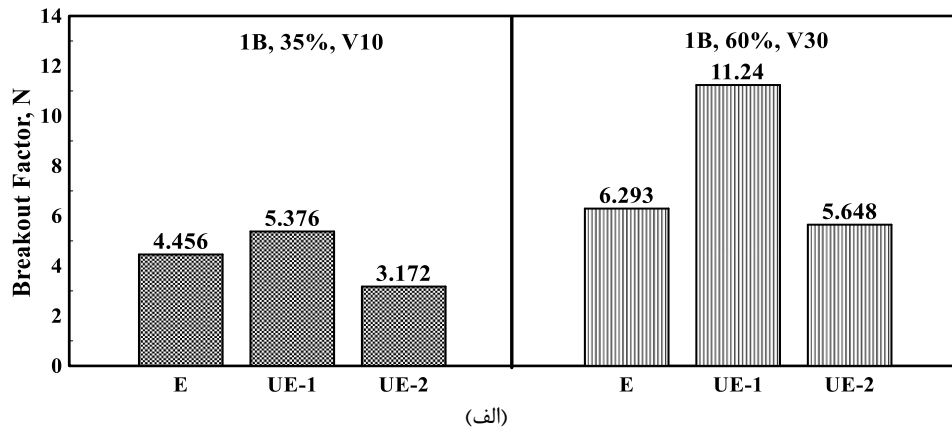
شکل ۱۷- تأثیر فاصله بین صفحات در مهار دوصفحه‌ای بازشو بر گوه گسیختگی

بین توزیع مساحت‌های مورد بررسی، مربوط به مهارهای گروه UE-1 بود. مهارهای فوق به دلیل داشتن ظرفیت

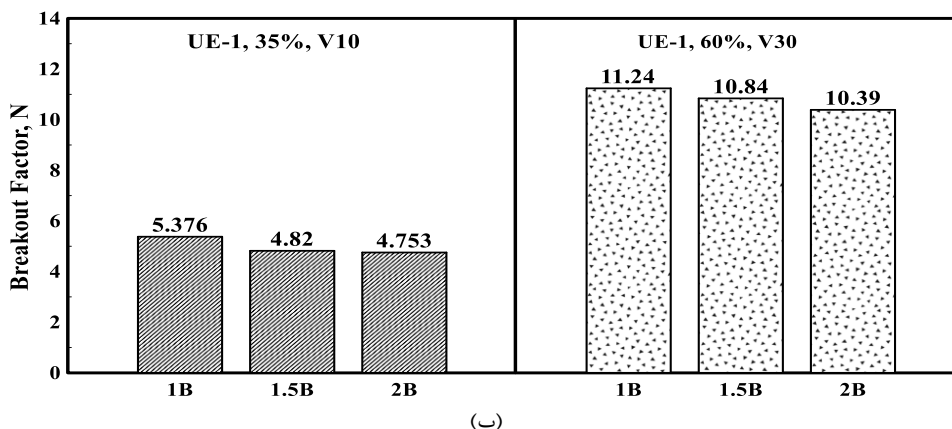
تحلیل نتایج به‌دست‌آمده (شکل ۱۸- الف) نشان داد که بیشترین ضریب شکست مهارهای صفحه بازشو در

به میزان چشمگیری افزایش یافته است. با افزایش دانسیته نسبی خاک، وزن مخصوص خاک نیز افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش ظرفیت بیرون‌کشش نهایی مهارها می‌شود. در نتیجه، ضریب شکست مهارهای مورد بررسی نیز به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.

بیرون‌کشش بالاتر و باز شدن در اعماق پایین‌تر، ضریب شکست بیشتری نسبت به مهارهای UE-2 و E داشتند. همچنین، بررسی نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۸-الف نشان داد که ضریب شکست برای هر سه گروه مورد مطالعه مهارهای صفحه‌ای بازشو با افزایش دانسیته نسبی خاک



(الف)



(ب)

شکل ۱۸- نمودار تغییرات ضریب شکست، N : (الف) در برابر توزیع مساحت در صفحات مهار بازشو و (ب) در برابر تغییرات فاصله بین صفحات مهار

افزایش فاصله صفحات برای مهارهای UE-1 در هر دو دانسیته نسبی مورد بررسی مشاهده شد. به‌منظور بررسی بهتر مهارهای مورد مطالعه در پژوهش حاضر با دیگر مهارها، مقایسه‌ای در جدول ۵ ارائه شده است. این جدول نشان‌دهنده مقایسه عملکرد مهارهای مورد مطالعه با دیگر مهارها در شرایط و ابعاد مختلف است. نتایج نشان می‌دهند که مهارهای مورد مطالعه در این پژوهش عملکرد مناسبی نسبت به سایر مهارها دارند.

همچنین بررسی نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۸-ب نشان داد که با افزایش فاصله بین صفحات مهارهای UE-1، ضریب شکست مهارها کاهش یافته است. با افزایش فاصله بین صفحات مهارهای UE-1، میزان بیشینه نیروی بیرون‌کشش کاهش و بیرون‌کشش مورد نیاز جهت بازشدگی این مهارها افزایش یافته است، در نتیجه، ضریب شکست مهارها به تدریج کاهش پیدا کرده است. همچنین لازم به ذکر است که این روند کاهش ضریب شکست با

جدول ۵- مقایسه مهرهای مورد مطالعه با دیگر مهرها

شکل مهر	محقق	نوع مهر	ابعاد صفحه‌ها (mm)	نوع خاک	نسبت عمق دفن شدگی به عرض صفحه (H/D)	فاصله بهینه بین صفحات S	ضریب شکست N	حداکثر نیروی بیرون کشش (نیوتن)
	[۲۸]	مهر چندصفحه‌ای (صفحات ثابت)	دایره‌ای مربعی (۵۰×۵۰)	ماسه	۸	۳B	۹/۳۲ ۱۱/۸۷	۱۴۲ ۱۳۸
	[۸۶]	مهرهای مارپیچ	دایره‌ای قطر ۶۳	ماسه	۱۱	۴B	۴۷/۴۳	۱۷۶۶
	[۶۴]	مهرهای مکانیکی بازشو	مربعی ۱۲۰	ماسه Dr: ۷/۵	۶	۳/۵B	۴/۶	۵۵۰
	[۸۷]	مهرهای مکانیکی بازشو	صفحه بالای (۲۰۰×۲۰۰) مربعی صفحه پایین (۲۰۰×۲۰۰)	ماسه Dr: ۸/۰	۴/۵	۱B	-	۴۷۰۰
	مطالعه حاضر	مهرهای مکانیکی بازشو	صفحه بالای (۱۶۳×۱۶۳) مربعی صفحه پایین (۲۳۱×۲۳۱)	ماسه Dr: ۶/۰	۴	۱B	۱۱/۲۴	۵۲۴۹

۶- نتیجه‌گیری

دوصفحه‌ای بازشو انجام گردید. مهرها تحت سه سرعت بیرون کشش مختلف شامل ۱۰، ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه برای بررسی اثر سرعت بیرون کشش مطالعه قرار گرفتند و دیگر پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه، فاصله بین صفحات و دانسیته نسبی خاک بود. نتایج نشان داد که:

در این مطالعه، با ثابت در نظر گرفتن مجموع مساحت در صفحات مهر دوصفحه‌ای بازشو، به بررسی اثر نحوه توزیع مساحت در صفحات با در نظر گرفتن سه گروه U، UE-1 و UE-2 پرداخته شد که در مجموع ۲۵ آزمون بیرون کشش آزمایشگاهی بر روی مهرهای

می‌شود. فاصله کم بین صفحات (۱B)، سبب می‌شود گوه گسیختگی با رسیدن به صفحه بالایی به صورت مایل شروع به بزرگ‌تر شدن کرده و خاک بالایی صفحه به همراه خاک در امتداد کناره‌های صفحه با شیب شروع به حرکت کند (حالت دوزنقه‌ای)؛ اما در فاصله بین صفحات بیشتر، ۲B، با اعمال بار بیرون‌کشش به مهار، خاک قرارگرفته در بالای صفحه پایین‌تر به صورت یک مستطیل بدون درگیر کردن خاک اطراف، در امتداد صفحات شروع به حرکت کرده و گوه گسیختگی کوچک‌تری تشکیل خواهد شد.

۴- با بررسی سرعت‌های بیرون‌کشش مهار دو صفحه‌ای باز شو نتایج نشان داد که سرعت بیرون‌کشش مهار در خاک‌های ماسه‌ای تأثیر اندکی بر ظرفیت بیرون‌کشش دارد؛ اما بیرون‌کشش مهارها با سرعت ۱۰ و ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه به ترتیب در خاک با دانسیته نسبی پایین و بالا موجب به دست آمدن بیشینه نیروی بیرون‌کشش مهار شده است.

۵- ضریب شکست مهارهای UE-1 با افزایش فاصله بین صفحات کاهش و با افزایش دانسیته نسبی خاک، افزایش یافته است. افزایش فاصله بین صفحات باعث کاهش بیشینه نیروی بیرون‌کشش و افزایش میزان بیرون‌کشش این مهارها جهت باز شدن می‌شود و متعاقب آن ضریب شکست مهارهای فوق یک روند کاهشی را با افزایش فاصله بین صفحات نشان داده است.

۱- مهارهای UE-1 در هر دو دانسیته نسبی ۳۵ و ۶۰٪ دارای بیشترین نیروی بیرون‌کشش در مقایسه با دو مهار دیگر یعنی UE-2 و E بودند، زیرا قرارگیری صفحه با مساحت بیشتر در عمق پایین‌تر باعث می‌شود که وزن خاک قرارگرفته بر روی صفحه پایینی بیشتر شده و نیروی بیرون‌کشش افزایش یابد. در خاک‌های با دانسیته نسبی کم، زمانی که صفحه با مساحت بیشتر در تراز ارتفاعی بالاتر نسبت به صفحه با مساحت کمتر قرار گیرد، عرض زیاد صفحه بالایی مانع از حرکت دانه‌های خاک به زیر صفحه اول شده در نتیجه، مهار به بیرون‌کشش بیشتری برای ایجاد نیروی محرک مناسب جهت بازشدگی صفحه پایینی نیاز دارد. متعاقب آن، عمق مدفون‌شدگی مهار کمتر و حجم خاک قرارگرفته بر روی آن کمتر خواهد شد.

۲- در دانسیته نسبی ۳۵ درصد، مهارهای E دارای نیروی بیرون‌کشش بیشتری نسبت به مهارهای UE-2 است؛ اما در خاک با دانسیته نسبی بالا به دلیل فشردگی و وزن زیاد خاک محصور بین دو صفحه با بیرون‌کشش کمتری نیروی موردنیاز جهت بازشدگی صفحه پایینی فراهم شده و مهار UE-2 دارای ظرفیت بیرون‌کشش بیشتری نسبت به E بود.

۳- بررسی فاصله بین صفحات مهار نشان داد که کاهش فاصله بین صفحات، سبب قفل‌شدگی خاک در بین صفحات و فشردگی بیشتر خاک

References

- [1] Das BM, Shukla SK. Earth anchors. J. Ross Publishing; 2013 May 22.
- [2] Rahimi M, Tafreshi SM, Leshchinsky B, Dawson AR. Experimental and numerical investigation of the uplift capacity of plate anchors in geocell-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*. 2018 Dec 1; 46(6): 801-816. doi: 10.1016/j.geotexmem.2018.07.010
- [3] Randolph M, Gourvenec S. Offshore geotechnical engineering. CRC press; 2017 Jul 12. doi: 10.1201/9781315272474
- [4] Dean ET. Offshore geotechnical engineering. 2009 Dec.

- [5] Randolph M, Cassidy M, Gourvenec S, Erbrich C. Challenges of offshore geotechnical engineering. In Proceedings of the 16th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. 2005; 123-176. doi: **10.3233/978-1-61499-656-9-123**
- [6] Ren M, Jiang T, Liu C, Zhang J, Wang L. Deformation characteristics of sandy soil around a plate anchor under lateral loading. *Geofluids*. 2022; 2022(1): 1117143. doi: **10.1155/2022/1117143**
- [7] Hu W, Lin Z, Wang H, Zhao P, Hao D, Gong J. Method for calculating the uplift capacity of a circular anchor plate at arbitrary depth in sand. *Ocean Engineering*. 2023 Oct 15; 286: 115441. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.115441**
- [8] Fanning J, Sivakumar V, Nanda S, Gavin K, Murray T, Bradshaw A, Black J, Jalilvand S. Pullout Capacity of Single and Biwing Anchors in a Soft Clay Deposit: Model Investigation in a Centrifuge and FEM Predictions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2023 Jul 1; 149(7): 04023050. doi: **10.1061/JGGEFK.GTENG-10636**
- [9] Roy A, O'loughlin CD, Chow SH, Randolph MF. Inclined loading of horizontal plate anchors in sand. *Géotechnique*. 2022 Dec; 72(12): 1051-1067. doi: **10.1680/jgeot.20.P.119**
- [10] Zhang S, Wang Y, Li C, Li Q, Yang D. Microscopic Bearing Behavior of Horizontally Loaded Vertical Plate Anchors in Sandy Soil. *Advances in Civil Engineering*. 2022; 2022(1): 7371229. doi: **10.1155/2022/7371229**
- [11] Kumar J, Rahaman O. Vertical uplift resistance of horizontal plate anchors for eccentric and inclined loads. *Canadian Geotechnical Journal*. 2019; 56(2): 290-299. doi: **10.1139/cgj-2017-0515**
- [12] Soni VA, Parmar S. An Experimental Study on Uplift Capacity of Axisymmetric Plate Anchors in Well Graded Sand at Different Relative Density and Embedment Ratio. 2022. doi: **10.21203/rs.3.rs-1648256/v1**
- [13] Srinivasan V, Ghosh P. Large-scale testing and finite-element simulation of twin square anchor plates embedded at shallow depth in layered soil media. *Sādhanā*. 2020 Dec; 45: 1-5. doi: **10.1007/s12046-020-01483-2**
- [14] Gottardi G, Tonni L, editors. Cone Penetration Testing 2022: Abstracts Volume. CRC Press; 2022 Nov 11.
- [15] Cerfontaine B, White D, Kwa K, Gourvenec S, Knappett J, Brown M. Anchor geotechnics for floating offshore wind: Current technologies and future innovations. *Ocean Engineering*. 2023 Jul 1; 279: 114327. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.114327**
- [16] Giampa JR, Bradshaw AS, Gerkus H, Gilbert RB, Gavin KG, Sivakumar V. The effect of shape on the pull-out capacity of shallow plate anchors in sand. *Géotechnique*. 2019 Apr; 69(4): 355-363. doi: **10.1680/jgeot.17.P.269**
- [17] Roy A, Bhattacharya P. Diameter effect on uplift capacity of horizontal circular anchor embedded in sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2020 Oct 2. doi: **10.1080/19386362.2018.1534345**
- [18] Zhang X, Liu M, Jiang T. Experimental Study on Uplift Behavior of Two-Plate Horizontal Anchors in Sand. *Geotechnical Testing Journal*. 2023 Jul 1; 46(4): 599-613. doi: **10.1520/GTJ20220218**
- [19] Bao X, Wu H, Xiong H, Chen X. Particle shape effects on submarine landslides via CFD-DEM. *Ocean Engineering*. 2023 Sep 15; 284: 115140. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.115140**
- [20] Raaj SK, Saha N, Sundaravadevelu R. Foldable Torpedo Anchor: A Novel Anchoring System for Deepwater Floaters. *In OCEANS 2022, Hampton Roads 2022 Oct 17; 1-4*. doi: **10.1109/OCEANS47191.2022.9977315**
- [21] Ghosh A, Bera AK. Effect of geotextile ties on uplift capacity of anchors embedded in sand. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2010 Sep; 28: 567-577. doi: **10.1007/s10706-010-9313-9**
- [22] Aliasgharzadeh M, Yousefzadehfard M, Atchian M, Bayat M. Experimental study on pullout capacity of geocell and geotextile-reinforced horizontal plate anchors embedded in granular soil. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2023 Feb; 9(1): 6. doi: **10.1007/s40891-023-00428-z**
- [23] Choudhary AK, Pandit B, Babu GS. Uplift capacity of horizontal anchor plate in geocell reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*. 2019 Apr 1; 47(2): 203-216. doi: **10.1016/j.geotextmem.2018.12.009**
- [24] Mukherjee S, Kumar L, Choudhary AK, Babu GS. Pullout resistance of inclined anchors embedded in geogrid reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*. 2021 Oct 1; 49(5): 1368-1379. doi: **10.1016/j.geotextmem.2021.05.009**
- [25] Ryou SC, Eruçar S, Evans TM, Aydılek AH. CFD-DEM modeling of filtration through conventional and conical geotextile filter systems. *Geosynthetics International*. 2022 Apr 20; 31(1): 3-17. doi: **10.1680/jgein.21.00098**
- [26] Merifield R, Smith C. The ultimate uplift capacity of multi-plate anchors in undrained clay. *In Soil Behavior and Geo-Micromechanics*. 2010; 74-79. doi: **10.1061/41101(374)12**
- [27] Merifield RS, Smith CC. The ultimate uplift capacity of multi-plate strip anchors in undrained clay. *Computers and Geotechnics*. 2010 Jun 1; 37(4): 504-514. doi: **10.1016/j.compgeo.2010.02.004**
- [28] Tilak BV, Samadhiya NK. Pullout capacity of multi-plate horizontal anchors in sand: an experimental study. *Acta Geotechnica*. 2021 Sep; 16: 2851-2875. doi: **10.1007/s11440-021-01173-1**

- [29] Misir G. Predicting the uplift capacity of vertically located two-plate anchors. *Acta Geotechnica Slovenica*. 2018 Jan 1; 15(2): 47-57. doi: **10.18690/actageotechslov.15.2.47-57.2018**
- [30] Cerfontaine B, White D, Kwa K, Gourvenec S, Knappett J, Brown M. Anchor geotechnics for floating offshore wind: Current technologies and future innovations. *Ocean Engineering*. 2023 Jul 1; 279: 114327. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.114327**
- [31] Li H, Yang M, Yin X. Study on safety assessment methods of gravity anchors based on a simplified mechanical model. *Frontiers in Earth Science*. 2023 May 9; 11: 1178622. doi: **10.3389/feart.2023.1178622**
- [32] Erbrich CT, Neubecker SR. Geotechnical design of a grillage and berm anchor. In *Offshore Technology Conference*. 1999 May 3; OTC-10993. doi: **10.4043/10993-MS**
- [33] Fleming K, Weltman A, Randolph M, Elson K. *Piling engineering*. CRC press; 2008 Sep 23. doi: **10.1201/b22272**
- [34] Jardine R, Chow F, Overy R, Standing J. *ICP design methods for driven piles in sands and clays*. London: Thomas Telford; 2005 Mar.
- [35] Kay S, Gourvenec S, Palix E, Alderlieste E. *Intermediate offshore foundations*. CRC press; 2021 Jun 20. doi: **10.1201/9780429423840**
- [36] Buckley RM, Kontoe S, Jardine RJ, Barbosa P, Schroeder FC. Pile driveability in low-to medium-density chalk. *Canadian Geotechnical Journal*. 2021; 58(5): 650-665. doi: **10.1139/cgj-2019-0703**
- [37] Aubeny C. *Geomechanics of marine anchors*. CRC Press; 2017 Sep 18. doi: **10.4324/9781351237376**
- [38] Andersen KH, Murff JD, Randolph MF, Clukey EC, Erbrich CT, Jostad HP, Hansen B, Aubeny C, Sharma P, Supachawarote C. Suction anchors for deepwater applications. In *Proceedings of the 1st international symposium on frontiers in offshore geotechnics, ISFOG, Perth 2005 Sep 19; 3-30*.
- [39] Madsen S, Andersen LV, Ibsen LB. Numerical buckling analysis of large suction caissons for wind turbines on deep water. *Engineering structures*. 2013 Dec 1; 57: 443-452. doi: **10.1016/j.engstruct.2013.09.041**
- [40] Ehlers CJ, Young AG, Chen JH. Technology assessment of deepwater anchors. In *Offshore technology conference*. 2004 May 3; OTC-16840. doi: **10.4043/16840-MS**
- [41] Senders M, Randolph M, Gaudin C. Theory for the installation of suction caissons in sand overlaid by clay. In *SUT Offshore Site Investigation and Geotechnics*. 2007 Sep 11; SUT-OSIG.
- [42] Stapelfeldt M, Bienen B, Grabe J. The influence of the drainage regime on the installation and the response to vertical cyclic loading of suction caissons in dense sand. *Ocean engineering*. 2020 Nov 1; 215: 107105. doi: **10.1016/j.oceaneng.2020.107105**
- [43] Wang D, Hu Y, Randolph MF. Keying of rectangular plate anchors in normally consolidated clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2011 Dec 1; 137(12): 1244-1253. doi: **10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000477**
- [44] Gaudin C, O'Loughlin CD, Randolph MF, Lowmass AC. Influence of the installation process on the performance of suction embedded plate anchors. *Géotechnique*. 2006 Aug; 56(6): 381-391. doi: **10.1680/geot.2006.56.6.381**
- [45] Song Z, Hu Y, O'Loughlin C, Randolph MF. Loss in anchor embedment during plate anchor keying in clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009 Oct; 135(10): 1475-1485. doi: **10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000098**
- [46] Lieng JT, Hove F, Tjelta TI. Deep penetrating anchor: Subseabed deepwater anchor concept for floaters and other installations. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*. 1999 May 30; ISOPE-I.
- [47] Lieng JT, Kavli A, Hove F, Tjelta TI. Deep penetrating anchor: further development, optimization and capacity verification. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*. 2000 May 28; ISOPE-I.
- [48] Medeiros Jr CJ. Low cost anchor system for flexible risers in deep waters. In *Offshore technology conference*. 2002 May 6; OTC-14151. doi: **10.4043/14151-MS**
- [49] Medeiros CJ. Torpedo anchor for deep water. In *Proceedings of the deepwater offshore technology conference, Rio de Janeiro 2001 Oct*. doi: **10.4043/25422-MS**
- [50] Randolph MF, Gaudin C, Gourvenec SM, White DJ, Boylan N, Cassidy MJ. Recent advances in offshore geotechnics for deep water oil and gas developments. *Ocean Engineering*. 2011 May 1; 38(7): 818-834. doi: **10.1016/j.oceaneng.2010.10.021**
- [51] Cerfontaine B, Knappett JA, Brown MJ, Davidson CS, Al-Baghdadi T, Sharif YU, Brennan A, Augarde C, Coombs WM, Wang L, Blake A. A finite element approach for determining the full load-displacement relationship of axially loaded shallow screw anchors, incorporating installation effects. *Canadian geotechnical journal*. 2021; 58(4): 565-582. doi: **10.1139/cgj-2019-0548**
- [52] Hao D, Wang D, O'Loughlin CD, Gaudin C. Tensile monotonic capacity of helical anchors in sand: interaction between helices. *Canadian Geotechnical Journal*. 2019; 56(10): 1534-1543. doi: **10.1139/cgj-2018-0202**
- [53] Perko HA. *Helical piles: a practical guide to design and installation*. John Wiley & Sons; 2009 Oct 19.

- [54] Spagnoli G, de Hollanda Cavalcanti Tsuha C. A review on the behavior of helical piles as a potential offshore foundation system. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2020 Oct 20; 38(9): 1013-1036. **doi: 10.1080/1064119X.2020.1729905**
- [55] Bradshaw AS, Cullen L, Miller Z. Field study of group effects on the pullout capacity of “deep” helical piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*. 2022; 59(4): 538-545. **doi: 10.1139/cgj-2021-0072**
- [56] Al-Baghdadi TA, Brown MJ, Knappett JA, Al-Defae AH. Effects of vertical loading on lateral screw pile performance. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*. 2017 Jun; 170(3): 259-272. **doi: 10.1680/jgeen.16.00114**
- [57] Cerfontaine B, Knappett J, Brown MJ, Davidson C, Sharif Y. Optimised design of screw anchors in tension in sand for renewable energy applications. *Ocean Engineering*. 2020 Dec 1; 217: 108010. **doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108010**
- [58] Davidson C, Brown MJ, Cerfontaine B, Al-Baghdadi T, Knappett J, Brennan A, Augarde C, Coombs W, Wang L, Blake A, Richards D. Physical modelling to demonstrate the feasibility of screw piles for offshore jacket-supported wind energy structures. *Géotechnique*. 2022 Feb; 72(2): 108-126. **doi: 10.1680/jgeot.18.P.311**
- [59] Sharif YU, Brown MJ, Cerfontaine B, Davidson C, Ciantia MO, Knappett JA, et al. Effects of screw pile installation on installation requirements and in-service performance using the discrete element method. *Can Geotech J*. 2021; 58(9): 1334-1350. **doi: 10.1139/cgj-2020-0241**
- [60] Jalali Moghadam M, Dastaran N, Zad A. Introducing expandable mechanical plate anchors for onshore and offshore anchoring. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2022 Mar 4; 40(3): 329-348. **doi: 10.1080/1064119X.2021.1894274**
- [61] Mohammadkhanifard HR, Jalali Moghadam M, Zad A, Ramesht MH. Evaluating the behavior of expandable multi-plate mechanical anchors in granular soils. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2022 Sep 21; 40(10): 1205-1223. **doi: 10.1080/1064119X.2021.1980638**
- [62] Tilak BV, Samadhiya NK. Uplift capacities of triple-plate horizontal circular anchors in sand. *In Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2019: IGC-2019 Volume II 2021 May 4; 673-681. doi: 10.1007/978-981-33-6370-0_59*
- [63] Tilak VB, Samadhiya NK. Uplift capacities of double-plate square anchors at shallow depths in sand. *In Indian geotechnical conference GeoNEst, IIT Guwahati, Guwahati, Assam, India. 2017; 1-4.*
- [64] Sabermahani M, Shojaee Nasirabadi M. Vertical uplift resistance of an innovative plate anchor embedded in sand. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2021 Jun 25; 39(7): 842-858. **doi: 10.1080/1064119X.2020.1773590**
- [65] White DJ, Take WA. Particle image velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing. University of Cambridge, Department of Engineering; 2002. **doi: 10.7710/1093-7374.1624**
- [66] White DJ. An investigation into the behaviour of pressed-in piles (Doctoral dissertation, University of Cambridge).
- [67] Das BM. Principles of geotechnical engineering. Cengage Learning; 2021 .
- [68] Hossain MS, Kim Y, Wang D, editors. Physical and numerical modelling of installation and pull-out of dynamically penetrating anchors in clay and silt. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2013. **doi: 10.1115/OMAE2013-10322**
- [69] Lai Y, Zhu B, Chen C, Huang Y-H. Dynamic installation behaviors of a new hybrid plate anchor in layered marine clay. *China Ocean Eng*. 2021; 35(5): 736-749. **doi: 10.1007/s13344-021-0065-5**
- [70] Andersen KH, Schjetne K. Database of friction angles of sand and consolidation characteristics of sand, silt, and clay. *J Geotech Geoenviron Eng*. 2013; 139(7): 1140-1155. **doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.000083**
- [71] Det Norske Veritas. Design and installation of plate anchors in clay. Oslo (Norway): Det Norske Veritas; 2017.
- [72] Maitra S, White D, Chatterjee S, Choudhury D. Numerical modelling of seepage and tension beneath plate anchors. *Comput Geotech*. 2019; 108: 131-142. **doi: 10.1016/j.compgeo.2018.12.022**
- [73] White D, Take W, Bolton M. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Geotechnique*. 2003; 53(7): 619-631. **doi: 10.1680/geot.2003.53.7.619**
- [74] Cinicioglu O, Altunbas A, Soltanbeigi B, Gezgin A. Characterization of active failure wedge for cohesionless soils. 2015.
- [75] Mnzool M. On the influence of dilation angle in soil slope stability analysis among other model parameters. *Therm Sci*. 2022; 26(1): 99-106. **doi: 10.2298/TSCI22S1099**
- [76] Xu S, Cai J, Wang H. Analyses of dilatancy characteristics of cemented soils based on triaxial test and numerical simulation. *In Frontiers of Civil Engineering and Disaster Prevention and Control Volume 2. 2023 Jan 16; 234-248. doi: 10.1201/9781003348436*
- [77] Szypcio Z. Relation between the friction angle of sand at triaxial compression and triaxial extension and plane strain conditions. *Geosciences*. 2020; 10(1): 29. **doi: 10.3390/geosciences10010029**

- [78] Rhadilkar BS, Paradkar AK, Golait YS. Study of rupture surface and ultimate resistance of anchor foundations. Proceedings of the Fourth Asian Regional Conference; 1971.
- [79] Emirler B, Tolun M, Laman M. Experimental investigation of the uplift capacity of group anchor plates embedded in sand. *Geomech Eng.* 2016; 11(5): 691-711. **doi: 10.12989/gae.2016.11.5.691**
- [80] Giampa JR, Bradshaw AS, Schneider JA. Influence of dilation angle on drained shallow circular anchor uplift capacity. *Int J Geomech.* 2017; 17(2): 04016056. **doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000725**
- [81] Tilak VB, Samadhiya NK. Pullout capacity of circular multi-plate inclined anchors in sand: An experimental study. *Geotech Geol Eng.* 2023; 41: 1-23. **doi: 10.1007/s10706-023-02407-7**
- [82] Majer J. Zur berechnung von zugfundamenten. *Osterreichische Bauzeitschrift.* 1955; 10(5): 85-90.
- [83] Baker WH, Konder RL. Pullout load capacity of a circular earth anchor buried in sand. *Highway Res Rec.* 1966; 108: 1-10.
- [84] Balla A. The resistance to breaking-out of mushroom foundations for pylons. Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering; 1961.
- [85] Meyerhof G, Adams J. The ultimate uplift capacity of foundations. *Can Geotech J.* 1968; 5(4): 225-244. **doi: 10.1139/t68-024**
- [86] Motamedinia H, Hataf N, Habibagahi G. A study on failure surface of helical anchors in sand by PIV/DIC technique. *Int J Civil Eng.* 2019; 17(12): 1813-1827. **doi: 10.1007/s40999-018-0380-2**
- [87] Mohammadkhanifard HR, Jalali Moghadam M, Zad A, Ramesht MH. Evaluating the behavior of expandable multi-plate mechanical anchors in granular soils. *Mar Georesour Geotechnol.* 2021; 39: 1-19. **doi: 10.1080/1064119X.2021.1980638**