



Physical modeling for evaluating the effect of helical anchor configuration and surcharge on wall displacement

Javad Nazariafshar ^{1,*}, Mohammad-Emad Mahmoudi Mehrizi ², Younes Daghigh ³

¹ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University (IAU), Karaj

ABSTRACT: Helical anchors with unique characteristics have several applications in constructing and reforming the foundations, as well as soil improvement. However, a limited number of study has been done on the use of helical anchors in walls and slopes stability. In the performed studies, the behavior of the helical anchor's wall was investigated. For this purpose, a laboratory study was designed to evaluate the wall stability with three types of helical anchors and two types of back-slopes in sandy soil. The aim of the study was to investigate the effect of anchor's shape and the back slope above the wall on the wall crest displacement. To increase the accuracy of measurements and determine the shear strains, photogrammetry and particle image velocimetry (PIV) methods were employed. Finally, to evaluate its implementation potential, the results were compared with those of the nailing method. The results of modeling revealed that an increase in diameter and the number of the helices led to decreasing in wall crest displacement. The reduction percentages were 30% and 60% respectively for increased diameter and increased number of helices and diameter. If the significant reduction in displacement is required, it is suggested to increase the number of helices without any changes in their diameter. Besides, anchors need a small amount of displacement to be activated and this issue cannot be solved by changing the type of helical anchor. Finally, the results indicated that the slip surface created on the wall of helical anchor using light surcharge is parabolic in shape.

Review History:

Received: 2018-12-15

Revised: 2019-07-14

Accepted: 2019-07-16

Available Online: 2019-07-24

Keywords:

Helical anchor

Wall

Horizontal displacement

Back slope

Particle image velocimetry

1. INTRODUCTION

The ever-increasing number of construction in urban areas and excavation near the structures lead to increasing the need for constructing proper retaining structures to control deformations and prevent damage to adjacent buildings. Nailing and grouted anchors are the most applicable methods used to stabilize the walls in Iran. The grouted anchors method has its own shortages including drilling with high vibrations and noise, the difficulty of implementation in poor soils, and grout curing time for anchor pull out. On the other hand, helical anchor methods with its unique characteristics have gained great attention by improving the problems of grouted anchors method.

Among the several studies conducted in the field of wall stability using helical anchors and the effect of helical anchors on wall bearing capacity, one can name the studies of Ghaly et al. (1991), Perko (1999), and Deardorff et al. (2010) [1-3]. In addition, from 2012 to 2016 the new studies on helical anchors were performed by Tsuha et al. [4-7]. They evaluated the effect of the shape of the helix (its number and diameter) and soil properties on the uplifting capacity of multi-helix anchors under gravity and high acceleration in a centrifuge. Motamedinia et al. (2018) investigated the failure surface

and calculated the pullout capacity of helical anchors in sand using particle image velocimetry/digital image correlation (PIV/DIC) method [8]. Cerfontaine et al. (2019) studied the geometry of failure mechanism and stress distribution of plate and helical anchors in sandy soil using soil finite element method [9]. All mentioned studies stated the effect of the number of helical plates and their shape on bearing capacity of helical anchors. Moreover, all of the studies have been evaluated the vertical pull out of one or a group of helical anchor and no research have been studied the effect of anchors' deformation on the wall. Clemence and Lutenegger (2015) indicated that the behavior of the helical anchor group and its use in wall stability should be investigated in details [10]. As a result, in order to determine the behavior of helical anchor-stabilized walls as well as expanding their usage, the present study aims to evaluate the helical anchor-stabilized walls using PIV method.

2. METHODOLOGY

To determine the effect of anchor's shape on wall displacement, three types of helical anchors with two and three helices and different diameters were made. Then, the anchors were tested on 10° and 20° soil slopes over the wall. Totally, six tests were performed.

First, the sand was prepared through sand pluviation

*Corresponding author's email: j.nazariafshar@qodsiau.ac.ir



method and the wall was put in the box and was adjusted in a vertical position using a spirit level and a set square. The soil height was increased up to the location of helices by pouring the sandy soil in both sides of the wall. In the modeling, we assumed that the helices were already in the soil; because placing the helices during the construction disrupts the model and makes the test repeatability difficult or impossible. On the other hand, the effect of installing helical anchor and soil disturbance on bearing capacity of the helical anchor is insignificant. Therefore, during the model preparation, the helices were placed at a 15° angle in the sandy soil and then the soil height was increased until the next raw of helices. These steps were continued until the wall was completed. To make a 10° and 20° back-slope on the top of the wall, a transparent colored sheet was used. Finally, its surface was flattened using a spatula and ruler.

After model preparation, wall behavior was modeled during the construction. The best method of building a wall was used in the present study so that first, the excavation was done and then helices were put into the soil. As mentioned, soil disturbance during the installation of helical anchors has an insignificant effect on bearing capacity. In this regard, and to synchronize all experiments in one condition, another method is used to model this behavior. Accordingly, during the modeling, the soil was poured in both side of the wall and then the wall behavior was modeled by the excavation of the opposite side of the wall. As a result, every step of the excavation on the opposite side of the wall means that the construction of that part of the helical anchor wall. After performing eight stages of excavation, the wall was completed. In each step, photos were taken (nine photos from the opposite side of the model).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results of the test were presented as the diagrams of displacement, shear strains, and comparison of displacement rate in each excavation step. Ultimately, a comparison was made between the displacement of the stabilized wall using nailing and helical anchor methods.

An example of PIV results, the shear strain created in the soil behind the wall for three types of anchors and 20° back slope is presented in Figs. 1a, 1b, and 1c. As seen, a change in the type of the anchor and an increase in the number of helices resulted in a decrease in shear strains and their expansion behind the wall. The maximum shear strain and its expansion are observed in Fig. 1a because the anchors do not have enough bearing capacity under surcharge. In Figs. 1b and 1c, failure wedge was not formed due to enough bearing capacity of anchors and the shear strains were formed linearly in the region of the first anchor plate. Displacement led to occurring a tensile in anchors and proper bearing capacity of anchors played an important role in not forming a failure wedge.

4. CONCLUSIONS

1- The allowable displacement rare of wall determined the type of helical anchors used in stabilizing the wall. If the significant reduction in displacement is required, the number of helices should be increased and their diameter should be fixed.

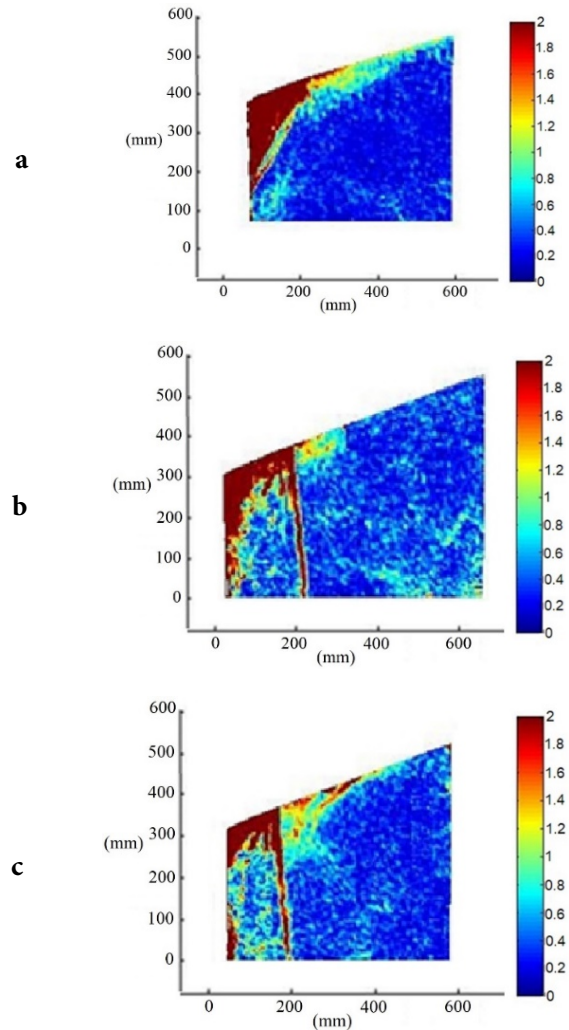


Fig. 1. The shear strain created in the stabilized wall, a: two-helices with variable diameter, b: two-helices with a fixed diameter and c: three-helices

- 2- By increasing the number of helices or their diameters, the effect of the surcharge is reduced about 32%.
- 3- All types of anchors need a small amount of displacement to be activated so if the required displacement exceeds the allowable rate of wall crest displacement, the use of post-tensioned helical anchor is suggested.
- 4- Considering that in helical anchor method, the displacement rate of wall crest is less than that in nailing method, in the regions that the results of wall displacement in nailing method are not in acceptable level for adjacent structure, the helical anchors can be the best alternative.
- 5- The slip surface created on the wall of the helical anchor was parabolic in shape. In contrast to the nailing method, the slip surface did not pass the wall foot.

REFERENCES

- [1] A. Ghaly, A. Hanna, M. Hanna, Installation torque of screw anchors in dry sand, *Soils and Foundations*, 31(2) (1991) 77-92.

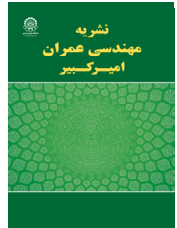
- [2] H. Perko, Summary of earth retaining methods utilizing helical anchors, Magnum® Helix Foundation.™ Technical Reference Manual. March, 4 (1999).
- [3] D. Deardorff, M. Moeller, E. Walt, Results of an instrumented helical soil nail wall, in: Earth Retention Conference 3, (2010) 262-269.
- [4] C.d.H.C. 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.
- [5] C.d.H.C. Tsuha, T.d.C. Santos, G. Rault, L. Thorel, J. Garnier, Influence of multiple helix configuration on the uplift capacity of helical anchors, Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique, 18, (2013).
- [6] C.d.H.C. Tsuha, physical modelling of the behaviour of helical anchors, in: 3rd European Conf. on Physical Modelling in Geotechnics (EUROFUGE 2016). IFSTTAR Nantes Centre, France, 1st-3rd June, (2016).
- [7] T.d.S.O. Morais, C.d.H.C. Tsuha, A new experimental procedure to investigate the torque correlation factor of helical anchors, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 19 (2014) 3851-3864.
- [8] H. Motamedinia, N. Hataf, G. Habibagahi, A Study on Failure Surface of Helical Anchors in Sand by PIV/DIC Technique, International Journal of Civil Engineering, (2018) 1-15.
- [9] B. Cerfontaine, J.A. Knappett, M.J. Brown, A.S. Bradshaw, Effect of soil deformability on the failure mechanism of shallow plate or screw anchors in sand, Computers and Geotechnics, 109 (2019) 34-45.
- [10] S. Clemence, A. Lutenegeger, Industry survey of state of practice for helical piles and tiebacks, DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute, 9(1) (2015) 21-41.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

J. Nazariafshar, M. E. Mahmoudi Mehrizi, Y. Daghigh, Physical modeling for evaluating the effect of helical anchor configuration and surcharge on wall displacement, Amirkabir J. Civil Eng., 52(10) (2021) 617-620.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15447.5922](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15447.5922)





مدلسازی فیزیکی بررسی تأثیر پیکربندی مهار مارپیچ و سربار بر جابجایی دیوار

جواد نظری افشار^{۱*}، محمدمعاد محمودی مهریزی^۲، یونس دقیق^۳

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ دانشجو دکتری، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۹-۲۴

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۲۳

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۴-۲۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۵-۰۲

کلمات کلیدی:

مهار مارپیچ

دیوار

جابجایی افقی

شیب پشت بالای دیوار

سرعت سنجی تصویری ذرات

خلاصه: مهارهای مارپیچ با ویژگی‌های منحصر به فرد خود کاربردهای فراوانی در ساخت و ترمیم پی‌ها و بهسازی خاک‌ها پیدا کرده است. با این حال تحقیقات محدودی بر روی استفاده از این مهارها در پایدارسازی دیوار و شیب‌ها و ساخت دیوارهای حائل انجام شده است. برای این منظور مطالعه‌ای آزمایشگاهی در رابطه با پایدارسازی دیوار با سه نوع مهار مارپیچ و دو نوع شیروانی در خاک ماسه‌ای طراحی و انجام شد. هدف از آزمایش‌های انجام شده بررسی تأثیر شکل مهار و شیب پشت بالای دیوار بر جابجایی تاج دیوار بوده است. برای افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها و تعیین کرنش‌های برشی از مقایسه تصاویر و روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV) استفاده شده است. در نهایت برای بررسی پتانسیل اجرایی آن، به مقایسه نتایج بدست آمده با روش میخکوبی متداول پرداخته شده است. با استفاده از مدل‌سازی‌های انجام شده مشخص شده است که میزان جابجایی تاج دیوار با افزایش قطر و تعداد صفحه‌های مارپیچ کاهش می‌یابد. این کاهش برای افزایش شعاع مارپیچ حدود ۳۰ درصد و برای افزایش تعداد صفحه و قطر در حدود ۶۰ درصد بوده است. در صورت نیاز به کاهش چشمگیر جابجایی پیشنهاد می‌شود تعداد صفحه مهار افزایش یابد و قطر آن دچار تغییر نشود. از طرف دیگر مهارها برای فعال شدن نیاز به میزان کمی جابجایی دارند و این مسئله با تغییر نوع مهار مارپیچ قابل برطرف کردن نیست. در نهایت مشخص شد که سطح لغزش ایجاد شده در دیوار مهار مارپیچ با استفاده از سربار سبک، سهمی شکل است.

۱- مقدمه

و تجهیزات ویژه تزریق در خاک‌های ریزدانه، دشواری اجرا و نصب کابل‌ها (Strand) و میلگردها (bar) درون گمانه‌های حفاری شده در خاک‌های ریزشی و زمان عمل‌آوری دوغاب برای پس کشیدگی مهار. روش مهار مارپیچ با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد خود، بخش بزرگی از مشکلات ذکر شده در بالا مرتفع کرده و امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات انجام شده و در دسترس در حوزه پایدارسازی دیوارها با استفاده از مهارهای مارپیچ بسیار اندک است. در ادامه پژوهش‌های مربوط به کاربرد اعضا مارپیچ و تعدادی از تحقیقات مربوط به مقاومت بیرون کشش مهارهای مارپیچ ارائه شده است.

افزایش ساخت و ساز در مناطق شهری و گودبرداری در مجاورت سازه‌های موجود نیاز به ایجاد سازه‌های نگهدارنده مناسب برای کنترل تغییر شکل‌ها و ممانعت از آسیب رسیدن به ساختمان‌های مجاور را افزایش داده است. از جمله روش‌های پرکاربرد در پایدارسازی دیوارها استفاده از میخکوبی‌ها و مهارهای دوغابی هستند که به شکل گسترده در کشور اجرا می‌شوند. متداول‌ترین مشکلات مهارهای دوغابی عبارت‌اند از: حفاری همراه با لرزش و صدای زیاد، دشواری اجرا در خاک‌های پوک و ریزشی و در زیر سطح ایستابی، تمهیدات

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: j.nazariafshar@qodsiau.ac.ir



مهارهای صفحه‌ای و مارپیچ در خاک ماسه‌ای پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که تغییر شکل خاک باعث تغییر میدان تنش در اطراف مهار شده و ظرفیت بیرون کشش را افزایش می‌دهد [۱۲].

Motamedinia و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی سطح گسیختگی و محاسبه ظرفیت بیرون کشش مهار مارپیچ در ماسه با روش PIV^۱ و DIC^۲ پرداخته‌اند. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که تغییر فاصله صفحه‌ها و تراکم ماسه تأثیر بیشتری نسبت به افزایش قطر صفحه بر ظرفیت باربری دارد [۱۳]. Lutenegro (۲۰۱۸) به انجام آزمایش بیرون کشش محوری گروه مهار مارپیچ اجرا شده در خاک رس پرداخته است. هدف از انجام این آزمایش‌ها تعیین رفتار گروه مهار بوده است. با انجام آزمایش‌ها مشخص شده است که در رس سخت تغییر فاصله مهارها تأثیر بیشتری بر تغییر ظرفیت باربری گروه مهار نسبت به رس نرم دارد [۱۴]. Ghosh و Samal (۲۰۱۹) به بررسی ظرفیت بیرون کشش مهارهای مارپیچ دارای پیکربندی‌های مختلف با استفاده از تحلیل اجرا محدود پرداخته‌اند [۱۵].

تمامی کارهای بیان‌شده، از تأثیر تعداد صفحه‌های مارپیچ و شکل آنها بر ظرفیت باربری مهار مارپیچ سخن به میان آورده‌اند. از طرف دیگر تمامی تحقیقات انجام شده بر روی بیرون کشش عمودی مهار مارپیچ تک و گروهی بوده و تأثیر تغییر شکل مهارها بر روی دیوار بررسی نشده است. در تحقیق Clemence و Lutenegro (۲۰۱۵) نیز بیان شده است که، رفتار گروه مهار مارپیچ و استفاده از آن در پایدارسازی دیوار نیاز به بررسی بیشتر دارد و یکی از مواردی است که اظهار نظر قطعی در رابطه با آن نشده است [۱۶].

به دلیل نیاز به تعیین رفتار دیوار پایدارسازی شده با مهارهای مارپیچ و همچنین کمک به گسترش استفاده از این اعضا، در این مقاله به بررسی دیوارهای مهار شده توسط اعضا مارپیچ با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات پرداخته شده است. هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر پیکربندی مهار مارپیچ (تعداد صفحه‌های مارپیچ و قطرهای مختلف آن) و شیب پشت بالای دیوار بر میزان جابجایی دیوار است. از طرف دیگر با استفاده از کرنش‌های برشی، گوه گسیختگی ایجاد شده نیز مشخص و بررسی شده است. در انتها برای مشخص شدن حوزه‌های اجرایی این روش به مقایسه با روش میخکوبی پرداخته شده است.

Ghaly و همکاران در دهه ۹۰ تحقیقات بسیاری بر روی انواع مهارهای مارپیچ انجام داده‌اند. آن‌ها به بررسی تأثیر شکل جز مارپیچ، خواص ماسه و عمق نصب بر مقدار گشتاور نصب مورد نیاز پرداختند. از دیگر موارد بررسی شده توسط این محققان تعیین چگونگی توسعه تنش در ماسه به علت نصب و بالآمدگی مهارهای تک و چند مارپیچ بوده است [۱]. Perko (۱۹۹۱) خلاصه‌ای از کاربرد مهارهای مارپیچ استفاده شده در سیستم‌های دیوار حائل را ارائه کرد. این خلاصه شامل روش تحلیل ظرفیت مهارمارپیچ و مثالی از طراحی دیوار حائل بوده است [۲]. پژوهش انجام‌شده توسط این محقق یکی از اولین تحقیقات انجام شده در رابطه با استفاده از مهارهای مارپیچ در دیوارها است. Deardorff و همکاران (۲۰۱۰) به تشریح نتایج آماده‌سازی دیوار خاکی میخ مارپیچ پرداخته‌اند. روش طراحی و اجرا این نوع دیوار، به همراه نتایج اولیه و حاصله از بازخوانی اطلاعات ابزار دقیق، نیز توسط آن‌ها ارائه شده است [۳].

Lutenegro (۲۰۱۱) رفتار مهارهای چند مارپیچ میله مربعی در ماسه را با انجام آزمایش‌های بالآمدگی در مقیاس واقعی مورد بررسی قرار داده است. نقطه عطف کار این محقق مقایسه نتایج، با مهارهای سه مارپیچ مورد استفاده در پروژه‌های اجراشده بوده است [۴]. تعدادی از مهم‌ترین تحقیقات در حوزه مهار مارپیچ مربوط به کارهای Tsuha و همکاران در سال‌های ۲۰۱۲ الی ۲۰۱۶ بوده است. آنها به ارزیابی شکل مارپیچ (از جمله تعداد و قطر) و خصوصیات خاک بر ظرفیت بالآمدگی مهارهای چند مارپیچ تحت گرانش و شتاب بالا در سانتریفیوژ پرداخته‌اند [۵-۷]. Tsuha و Morais در سال ۲۰۱۴ با انجام آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیدند که قطر بخش هادی، توزیع بار در امتداد مهار مارپیچ و تعداد مارپیچ‌ها بر ضریب گشتاور نصب تأثیر می‌گذارد [۸]. بخش دیگری از مهم‌ترین پژوهش‌ها مربوط به تحقیقات Mittal و Mukherjee (۲۰۱۳ و ۲۰۱۴) است. آنها به بررسی های آزمایشگاهی رفتار گروه مهارهای مارپیچ با صفحه‌های تک، دو و سه‌تایی تحت تأثیر بارهای بالآمدگی عمودی بر روی خاک ماسه‌ای پرداخته‌اند [۹، ۱۰].

Schiavon و همکاران (۲۰۱۶) به انجام آزمایش‌های بیرون کشش مهار مارپیچ در خاک ماسه‌ای با دستگاه سانتریفیوژ برای تعیین مسائل مربوط به مقیاس در مدل‌سازی پرداخته‌اند [۱۱]. Cerfontaine و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تحلیل اجزا محدود خاک به شناخت هندسه مکانیسم گسیختگی و مطالعه توزیع تنش

1 Particle image velocimetry
2 Digital image correlation

جدول ۱. لیست آزمایش‌ها

Table 1. Experimental testing program

شماره آزمایش	۱- مهار ماریچ دو ماریچ با قطر متغیر	۲- مهار ماریچ دو ماریچ با قطر ثابت	۳- مهار ماریچ سه ماریچ با قطر ثابت	۱- شیب پشت بالای دیوار ۱۰ درجه نسبت به افق	۲- شیب پشت بالای دیوار ۲۰ درجه نسبت به افق
۱	*			*	
۲		*		*	
۳			*	*	
۴	*				*
۵		*			*
۶			*		*

۲- شرح تجهیزات و آزمایش

۲-۱- طراحی آزمایش

متداول‌ترین روش برنامه‌ریزی آزمایش‌ها در ژئوتکنیک روش فاکتوریل ساده است که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷]. نوع مهار ماریچ که در قسمت‌های بعدی شرح داده شده است هر کدام برای ۲ شیب خاکی با زاویه ۱۰ و ۲۰ درجه بالای دیوار مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که در مجموع تعداد آزمایش‌ها با استفاده از روش فاکتوریل ساده، ۶ آزمایش خواهد بود که در جدول ۱ لیست آزمایش‌ها ارائه شده است. هدف از انتخاب شیب‌های خاکی، اعمال سربار کم و تسهیل در تشکیل گوه گسیختگی است. همچنین دلیل انتخاب شیب خاکی بالای دیوار با زاویه ۱۰ و ۲۰ درجه نیز امکان مقایسه با نتایج تحقیق "روش میخکوبی خاک با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی به روش PIV" بوده است [۱۸]. به دلیل فاصله گذاری مورد نیاز بین صفحه‌های ماریچ و همچنین تأمین گشتاور نصب، بیشترین تعداد ماریچ که به طور معمول در یک مهار وجود دارد محدود به ۳ ماریچ است. استفاده از مهار تک ماریچ با توجه به ظرفیت باربری محدود در پایدارسازی دیوار کاربرد نخواهد داشت و باعث افزایش تراکم استفاده از مهارها و هزینه بالای اجرا خواهد شد. با توجه به این موضوع که در پروژه‌های اجرایی تغییر قطر صفحه ماریچ و کاهش آن در طول مهار امری متداول است؛ در سه نوع مهار انتخابی پارامترهای تغییر تعداد صفحه‌ها و قطر آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲-۲- ابعاد ماریچ‌ها و دیواره

مهاریهای ماریچ شامل یک میله (دایره و یا مربع، توخالی و یا توپر)، با حداقل یک صفحه ماریچ متصل شده به آن هستند. میله مهار به طور معمول عرض و یا قطری در محدوده ۴ تا ۹ سانتی‌متر دارد. به علت گام (pitch) صفحه ماریچ، این اجزا نخاله ای تولید نمی‌کنند و حداقل اختلال در سطح اطراف تجهیزات مهاربند ایجاد می‌شود. ضخامت معمول صفحه‌های ماریچ در محدوده ۱ تا ۲ سانتی‌متر و قطر معمول صفحه‌ها بین ۱۵-۳۶ سانتی‌متر است [۱۹ و ۲۰]. بخشی از مهار که صفحه‌های ماریچ در آن قرار دارد به بخش پیشرو (Lead section) معروف است. بخش‌های پیشرو می‌توانند دارای طول‌های مختلفی باشند اما به طور معمول طولی در محدوده ۰/۲۵ تا ۳ متر دارند. به دلیل فاصله‌گذاری مورد نیاز سه قطر ماریچ، بیشترین تعداد ماریچ که به طور معمول در بخش پیشرو وجود دارد ۳ ماریچ است. برای افزایش طول کل مهار ماریچ از مقاطع بسط (Extension section) استفاده می‌شود. طول معمول مقاطع بسط از ۰/۹ تا ۳ متر متغیر است.

مدل ساخته شده نمونه ۱/۱۰ دیوار مهار ماریچ واقعی است. از این جهت، به مانند مهارهای ساخته شده توسط کارخانه‌های تولید کننده، شکل صفحه‌ها دایره‌ای کامل و چیدمان آن با قطر برابر و یا از قطر کم به قطر زیاد در طول مهار بوده است (شکل ۱). فاصله صفحه‌ها نیز بر اساس تولیدات متداول سه برابر قطر صفحه ماریچ (۳D) در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. سه نوع مهار مارپیچ مورد استفاده در آزمایش

Fig. 1. Three types of helical anchors used in the experimental

جدول ۲. مصالح معادل به منظور شبیه سازی دیوار بتنی به ضخامت ۳۰۰ میلی متر در آزمایشگاه [۲۲]

Table 2. The equivalent material to simulate a 300mm-thick concrete facing in laboratory

جنس دیوار	E_m (GPa)	جدول ۲: مصالح
فولاد	۲۱۰	۰/۶۴
آلومینیوم	۷۰	۰/۹
میکرو بتن	۱۰	۱/۷۵
پلی پروپیلن	۰/۹	۳/۹

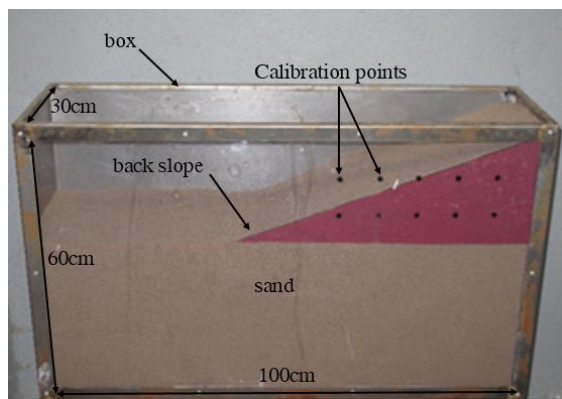
جدول ۳. مشخصات مهارهای مورد استفاده در آزمایش

Table 3. Specifications of the helical anchor

نوع	طول مهار (mm)	قطر میله (mm)	ضخامت صفحه مارپیچ (mm)	تعداد مارپیچها	قطر صفحه های مارپیچ (mm)			فاصله مارپیچها (mm)	گام مارپیچها (mm)	زاویه قرار مهارها (درجه)
					۱	۲	۳			
۱	۳۷۵	۴	۱	۲	۳۰	۲۵	-	۹۰	۴	۱۵
۲	۳۷۵	۴	۱	۲	۳۰	۳۰	-	۹۰	۴	۱۵
۳	۳۷۵	۴	۱	۳	۳۰	۳۰	۳۰	۹۰	۴	۱۵

با ضخامت ۳۰۰ میلی متر باشد، در جدول ۲ اشاره شده است [۲۲]. با توجه به محدوده های بیان شده و ضریب مقیاس مورد استفاده، طول، قطر و فاصله مارپیچها به همراه قطر میله در جدول ۳ اشاره شده است. طول مهار تنها بخشی است که نیاز به بررسی دقیق تر دارد. فاصله نزدیکترین مارپیچ به گوه گسیختگی باید بیشتر از سه برابر قطر صفحه مارپیچ باشد، در نتیجه کمترین طول مهارها برای رعایت نکات طراحی با توجه به زاویه اصطکاک خاک ۳۷۵ میلی متر است [۱۹-۲۳].

ضریب مقیاس مورد استفاده در آزمایشها ۱ به ۱۰ می باشد. به این ترتیب، برای دیواری به طول و ارتفاع ۳ متر، ابعاد دیوار به ۳۰۰ میلی متر تقلیل یافته است. بر طبق مطالعات صورت گرفته، دیوار بکار رفته در آزمایشگاه که معادل دیواری بتنی با ضخامت رایج ۳۰۰ میلی متر در شرایط واقعی است، از جنس آلومینیوم با ضخامت ۰/۹ میلی متر انتخاب و ساخته شده است [۲۱]. بر اساس پیشنهاد Wood (۲۰۱۴)، مصالح قابل کاربرد در نقش دیوار در آزمایشگاه که معادل دیواری بتنی



شکل ۲. جعبه آزمایش به همراه نقاط کالیبراسیون
Fig. 2. Test box with calibration points

جدول ۴. مشخصات خاک مورد آزمایش

Table 4. Physical properties of the soil

مقدار	مشخصه
16.76	حداکثر وزن مخصوص خشک خاک، kN/m^3
14.20	حداقل وزن مخصوص خشک خاک، kN/m^3
2.63	حجم توده ویژه، Gs
28	زاویه اصطکاک داخلی، ϕ
0.22	قطر بزرگ‌ترین دانه عبوری از الکی که ۱۰ درصد دانه‌ها از آن عبور می‌کنند، D_{10} (mm)
0.24	قطر بزرگ‌ترین دانه عبوری از الکی که ۳۰ درصد دانه‌ها از آن عبور می‌کنند، D_{30} (mm)
0.3	قطر بزرگ‌ترین دانه عبوری از الکی که ۶۰ درصد دانه‌ها از آن عبور می‌کنند، D_{60} (mm)

۲-۳- جعبه آزمایش

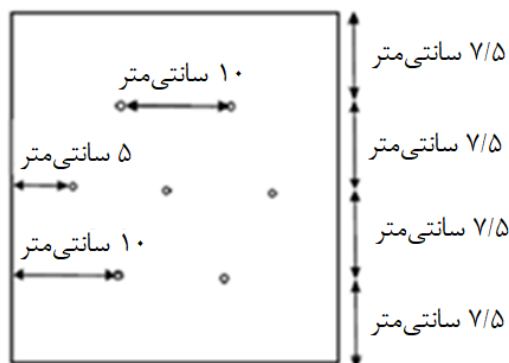
جعبه آزمایش با ورق فلزی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و ابعادی برابر با طول ۱۰۰ سانتی‌متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر ساخته شده است که در یک طرف آن از طلق به ضخامت ۲ سانتی‌متر استفاده شده است. این ضخامت به منظور حصول اطمینان از عدم تغییر شکل و شکم‌دادگی آن در جریان انجام آزمایش‌ها بوده است. نکته‌ای که در انتخاب جعبه آزمایش حائز اهمیت است صلبیت آن است، بدین معنی که جعبه تحمل تنش‌های وارده از طرف خاک درون را داشته و تحت اثر آن تغییر شکل ندهد. این شرایط با استفاده از سخت‌کننده‌هایی در بدنه جعبه تأمین شده است. جعبه دارای نقاط کالیبره بوده که برای تبدیل واحد پیکسل در عکس‌برداری به میلی‌متر و برطرف کردن تحجب چهارگوشه عکس مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۲ جعبه آزمایش و نقاط کالیبراسیون نشان داده شده‌اند.

۲-۴- خاک مورد استفاده

خاک مورد استفاده ماسه خشک منطقه صوفیان استان آذربایجان شرقی است که بر اساس طبقه‌بندی متحد، دانه‌بندی یکنواخت داشته و جزو ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) قرار می‌گیرد. مشخصات خاک مورد آزمایش در جدول ۴ اشاره شده است.

۲-۵- اتصال مهار به دیوار و نحوه آرایش ماریج‌ها

در پروژه‌های اجرایی و در مقیاس واقعی، اتصال مهار ماریج به دیوار با استفاده از صفحه باربر فولادی و مهره انجام می‌شود. عملکرد اصلی این المان‌ها ایجاد عکس‌العمل برای هر ماریج جهت انتقال نیروی کششی و همچنین ایجاد پایداری محلی خاک نزدیک سطح دیوار است. در ساخت این مدل از واش‌های دایره‌ای شکل به‌عنوان صفحه باربر و از مهره جهت نصب ماریج‌ها استفاده گردیده است. این مهره‌ها در هنگام قرارگیری ماریج‌ها و بعد از تنظیم زاویه آنها درون



شکل ۳. چیدمان مهارها

Fig. 3. Reinforcement configuration

تراز و گونیا در حالت قائم تنظیم شد. با ریزش خاک ماسه‌ای در دو طرف دیوار، ارتفاع خاک تا محل قرارگیری مارپیچ‌ها افزایش داده شد. در این مدل‌سازی فرض بر آن است که مارپیچ‌ها از قبل در خاک قرار داشته‌اند. علت این فرض آن است که قرار دادن مارپیچ‌ها در حین ساخت مستلزم به هم خوردن مدل است و تکرارپذیری آزمایش را بسیار مشکل یا ناممکن می‌سازد. از طرف دیگر اثر نصب مهار مارپیچ و دست‌خوردگی خاک بر ظرفیت باربری مهار مارپیچ ناچیز است [۱۶]. به همین دلیل مارپیچ‌ها در حین آماده‌سازی مدل درون خاک ماسه‌ای قرار داده شدند.

مارپیچ‌ها با زاویه ۱۵ درجه در محل سوراخ‌ها قرار گرفته و زاویه آنها با استفاده از شابلون‌های ساخته شده تنظیم شد. سپس ارتفاع خاک تا محل ردیف بعدی مارپیچ‌ها افزایش یافته و این مراحل تکرار شده تا ساخت دیوار تکمیل شود. برای ایجاد شیب پشت بالای دیوار ۱۰ و ۲۰ درجه از ورق شفاف رنگی بهره گرفته شده است. بدین ترتیب که زاویه موردنظر بر روی ورق رسم شده و سپس با چسباندن آن بر روی طلق، شیب موردنظر با زاویه رسم شده ایجاد شده است. درنهایت سطح آن با استفاده از کاردک و خط کش صاف شد (شکل ۲). پس از آماده شدن شیب، ورق از روی طلق جدا شده تا مانع از دید نمونه نشود.

پس از آماده‌سازی مدل، رفتار دیوار در طی ساخت مدل شده است. بدیهی است که بهترین روش برای این کار همان ساخت دیوار به روشی است که در عمل انجام می‌پذیرد، بدین ترتیب که ابتدا خاک‌برداری انجام شده و سپس با قرار دادن مارپیچ‌ها، ساخت دیوار انجام پذیرد. همان‌طور که بیان گردید دست‌خوردگی خاک در حین نصب مهارهای مارپیچ تأثیر ناچیزی بر ظرفیت باربری دارد. از این جهت و برای همگام‌سازی انجام تمامی آزمایش‌ها در یک شرایط، از روش دیگری برای مدل کردن این رفتار بهره گرفته شده است. بدین صورت که در هنگام ساخت مدل هر دو طرف دیوار خاک‌ریزی گردیده و سپس با خاک‌برداری طرف مقابل دیوار، رفتار دیوار مدل شد. در نتیجه هر مرحله خاک‌برداری در قسمت مقابل دیوار به منزله ساخت آن قسمت از دیوار مهار مارپیچ است. با انجام ۸ مرحله خاک‌برداری اجرای دیوار کامل شده است (شکل ۴ و ۵).

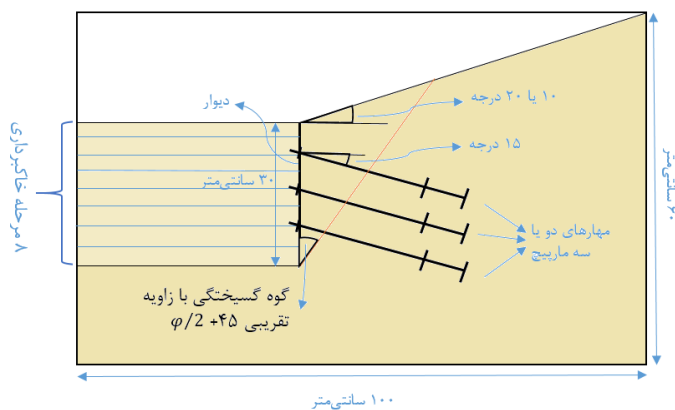
اغلب تعداد قابل توجهی از نتایج آزمون‌های تکراری موجود نیست و تعیین انحراف معیار یا ضریب تغییرات برای تعیین تکرارپذیری

خاک در قسمت رزوه شده مهار و بر روی دیوار بسته می‌شوند. با بررسی ادبیات تحقیق مشخص شده است که برای بررسی اثر متقابل گروه مهارهای مارپیچ محدوده $1D$ تا $6D$ برای فاصله مهارها محدوده‌ای مناسب است [۹-۲۴-۳۰]. در نتیجه فاصله افقی تقریباً $3D$ که در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار گرفته، انتخاب شده است. فواصل افقی و عمودی برابر ۱۰۰ و ۷۵ سانتی‌متر برای مهار انتخاب شده و با ضرب این مقدار در ضریب کاهشده مقیاس $1/10$ ، مقادیر ۱۰ و $7/5$ سانتی‌متر برای فواصل مرکز تا مرکز مسلح‌کننده‌ها در دیوار به دست آمده است. نحوه قرارگیری مهارها بر روی صفحه آلومینیومی در شکل ۳ نشان داده شده است.

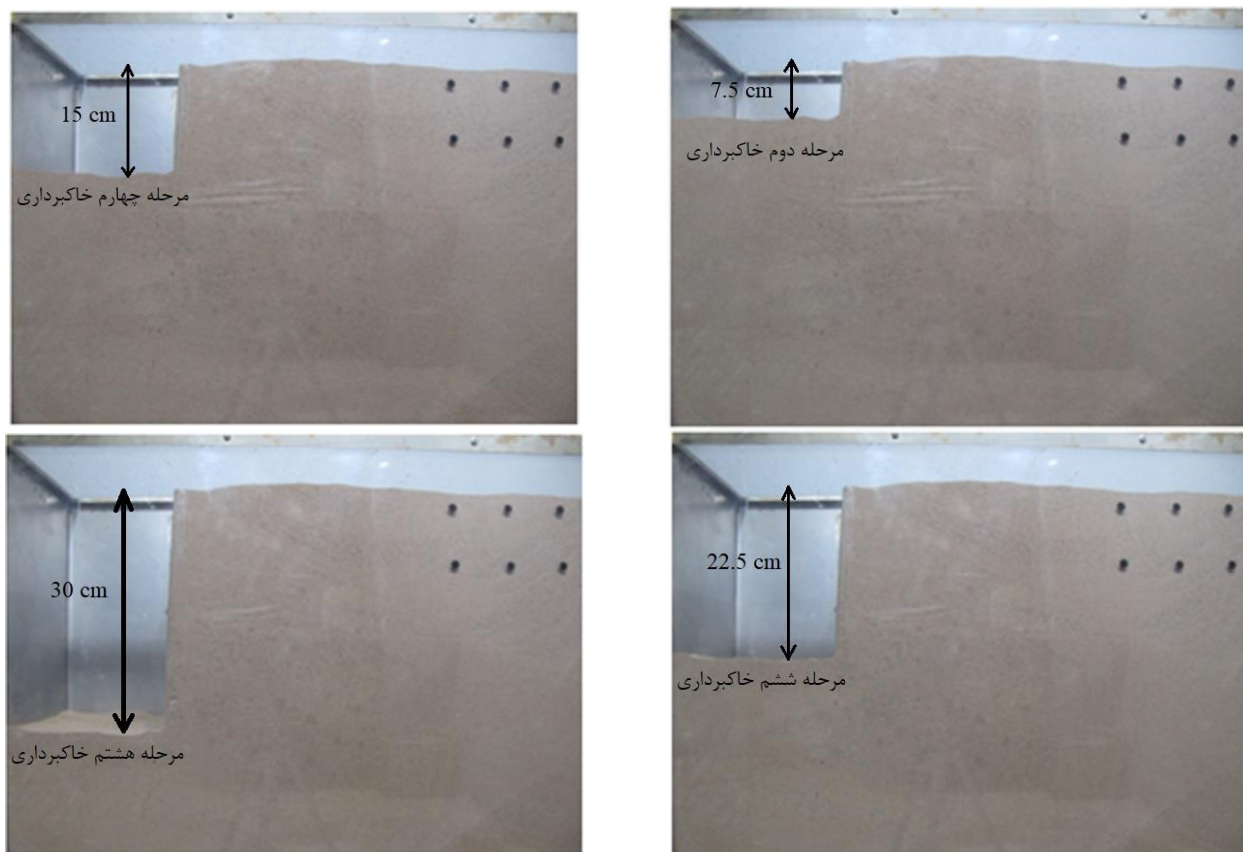
۶-۲- آماده‌سازی مدل فیزیکی

عامل مهمی که می‌تواند تأثیر چشمگیری بر روی نتایج آزمایش‌ها داشته باشد تراکم ماسه استفاده شده است. بدین ترتیب ماسه استفاده شده از ارتفاع مشخصی (۵۰ سانتی‌متر) به طور یکنواخت در جعبه ریخته می‌شود. برای آغاز آزمایش جعبه خالی با استفاده از مواد شوینده کاملاً تمیز گردیده تا هرگونه آلودگی یا خاک روی وجه طلق و فلز پاک شود. سپس با استفاده از اسپری روغن سیلیکون، لایه‌ای از روغن بر وجه طلق و فلز پاشیده شد. در این مرحله ورقه‌ای از سلفون بر روی دیواره‌ها کشیده شده و کاملاً صاف و یکنواخت شده تا جمع‌شدگی آن باعث جلوگیری از دید مدل و ایجاد نتایج اشتباه (wild rector) نشود.

در مرحله بعدی، ماسه با استفاده از روش ذکر شده تا ارتفاع کف دیوار ریخته شد. دیوار داخل جعبه قرار گرفته و با استفاده از



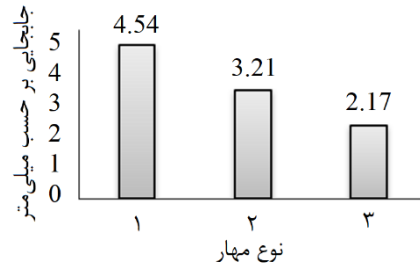
شکل ۴. نحوه قرارگیری مهارها و مراحل خاکبرداری
Fig. 4. How to place reinforcement and excavation



شکل ۵. مراحل خاکبرداری جلوی دیوار و عکس برداری از آن
Fig. 5. Excavation in the facing opposed side and photographing it

۳ هرکدام ۳ مرتبه تکرار شده‌اند و نتایج آنها مورد مقایسه قرار گرفته است. چیزی در حدود ۳ الی ۱۰ درصد اختلاف بین میزان جابجایی تاج دیوار در یک آزمایش با شرایط یکسان دیده شده است. گذشت زمان از شروع آزمایش‌ها و مسلط شدن بر روند انجام آزمایش باعث

بی‌معنا است. ساده‌ترین کار برای مطالعه تکرارپذیری در این حالت، تکرار حداقل ۳ یا ۴ بار از یک آزمایش و در شرایط یکسان است. سپس با قرار دادن نتایج در کنار هم در خصوص تکرارپذیری آزمایش می‌توان تصمیم‌گیری نمود. برای این منظور آزمایش بر روی مهار نوع



شکل ۶. میزان جابجایی‌ها در تاج دیوار برای ۳ نوع مهار ماریپج در حالت شیب پشت بالای دیوار ۱۰ درجه

Fig. 6. Wall crest displacement rate for three types of helical anchors with a back slope of 10°

کاهش اختلاف نتایج شده است.

۲-۷- عکس برداری دیجیتال و سرعت‌سنجی تصویری ذرات

با استفاده از دوربین دیجیتال، تصاویر متوالی از صفحه خاک در طول تغییر شکل گرفته شده است؛ سپس تغییر شکل خاک با استفاده از تحلیل سرعت‌سنجی تصویری ذرات، مابین هر جفت تصویر متوالی تعیین شده است. پارامترهای انتقال بر اساس مشخصات فنی دوربین، شرایط تصویربرداری و مشخصات پنجره مشاهده و با روش کانون یابی تعیین شد. عکس برداری توسط دوربین ۱۴.۷ مگاپیکسلی Cannon powershot G۱۰ و دارای حسگر تبدیل‌کننده انرژی فوتون‌های نور به پالس‌های الکتریکی (CCD) انجام شده است. برای جلوگیری از جابجایی دوربین، تمامی عکس‌ها با استفاده از نرم‌افزار Remote capture و PC تهیه شده‌اند. لازم بذکر است که دوربین روی سه پایه قرار داده شده و نسبت به سطح افق تراز بوده است. با انجام خاک‌برداری در ۸ مرحله، عکس‌برداری نیز در هر مرحله انجام گرفته است که با احتساب حالت اولیه، ۹ عکس در هر آزمایش از قسمت مقابل مدل تهیه شده است.

پس از تهیه عکس‌های گرفته‌شده، تحلیل آنها توسط روش PIV و با استفاده از مدول Geo PIV انجام شده است. Geo PIV، مدولی از نرم‌افزار MatLab است که با عمل عکس‌برداری سریع از اجزای خاک، می‌تواند تطابق خوبی با آزمایش‌های ژئوتکنیکی داشته باشد. خروجی این کد به صورت ماتریس دوبعدی u و v است که اولی نشان دهنده مولفه افقی و دومی نشان دهنده مولفه عمودی بردار جابجایی هر نقطه است. این کد توسط White و همکاران و در قالب M-file محیط نرم‌افزار MatLab در طی تحقیق مربوط به دوره

دکتری آنها نوشته شده است [۳۱].

جهت پردازش تصویر با استفاده از روش PIV عکس‌ها به شبکه‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند. هر شبکه دارای بافت تصویر مجزایی بوده و این امر اجازه می‌دهد تا محل شبکه موردنظر در عکس‌های بعدی مشخص گشته و جابجایی‌های هر شبکه در عکس دوم نسبت به عکس اول به دست آیند. نتیجه تغییر مکان شبکه‌ها در عکس‌های مختلف در واحد پیکسل است و جهت تبدیل از واحد پیکسل به میلی‌متر نیاز به نقاط کالیبراسیون است. این نقاط با استفاده از رنگ سیاه در فواصل مکانی معین (برحسب میلی‌متر) بر روی وجه طلق جایگذاری شده‌اند که در شکل ۲ قابل مشاهده هستند. مرحله بعد از شبکه‌بندی عکس‌های گرفته شده، حذف بردارهای خطا است. در نهایت بردارهای جابجایی و کرنش‌های برشی حداکثر ایجاد شده در خاک قابل استخراج است.

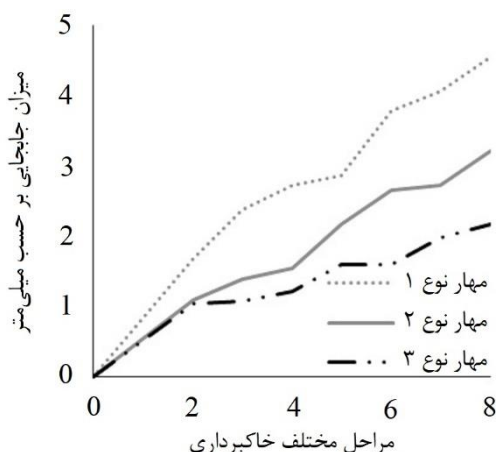
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسه تغییر شکل خاک پشت دیوار در ۳ نوع مختلف مهار

ماریپج و شیب پشت بالای دیوار ۱۰ درجه

روند تغییر میزان جابجایی‌ها در تغییر نوع مهارها در این آزمایش‌ها حائز اهمیت است. نمودارهای جابجایی تاج دیوار در ۳ نوع مهار ماریپج و میزان جابجایی‌ها در هر مرحله خاک‌برداری برای حالت شیب پشت بالای دیوار ۱۰ درجه در نمودارهای ۶ و ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در نمودار ۶ نشان داده شده است میزان کاهش جابجایی برای تغییر قطر مهار (مهار ۱ به ۲)، ۲۹٪ بوده و برای تغییر تعداد صفحه (مهار نوع ۲ به نوع ۳)، ۳۲٪ بوده است. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش تعداد صفحه‌ها در حالت وجود سربار منطقی‌تر به نظر رسد و می‌تواند در کنترل جابجایی‌ها کمک کند.

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است روند جابجایی مهار نوع ۱ و ۲ شبیه یکدیگر هستند. دلیل این مطلب تغییر اندک در افزایش ظرفیت باربری ناشی از افزایش قطر صفحه مهار بوده است. روند جابجایی دیوار در مراحل مختلف خاک‌برداری برای هر سه مهار تقریباً خطی بوده است و با افزایش تعداد صفحه‌ها و یا قطر آنها شیب این خط کاهش یافته است. از طرف دیگر برای تمامی مهارها، بیشترین میزان جابجایی در ۲ مرحله اول خاک‌برداری رخ داده است. این میزان بیش از ۳۰ درصد جابجایی کل بوده است. ایجاد جابجایی برای فعال



شکل ۷. میزان جابجایی تاج دیوار در مراحل مختلف خاک برداری ۳ نوع مهار مارپیچ در شیب پشت بالای دیوار ۱۰ درجه

Fig. 7. Wall crest displacement rate during the excavation steps for three types of helical anchors with a back slope of 10°

سه نوع مهار ارائه شده است. در تمامی نمودارهای ارائه شده بازه کرنش بین ۰ و ۲ در نظر گرفته شده است. برای ایجاد امکان مقایسه بین نمودارهای مختلف این بازه در تمامی نمودارها یکسان فرض شده است. در اشکال ۹-الف و ۹-ب کرنش‌های ایجاد شده نزدیک به هم هستند. با افزایش قطر صفحه و تعداد آن به دلیل افزایش ظرفیت باربری میزان کرنش‌های برشی و طول منطقه تأثیر در خاک پشت دیوار کاهش یافته است. از آنجا که سربار کم بوده است در هیچ یک از حالت‌ها گوه گسیختگی کاملی تشکیل نشده است. در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب به دلیل ظرفیت باربری کمتر نسبت به شکل ۹-ج کرنش‌های برشی به شکل خطی در محدوده اولین صفحه مهار تشکیل شده است. با ایجاد این جابجایی مهار تحت کشش قرار گرفته است و از تشکیل گوه گسیختگی جلوگیری کرده است. برای جلوگیری از چنین جابجایی‌هایی از پس کشیدگی مهار و با روش میخ مارپیچ خاک استفاده می‌شود. در روش میخ مارپیچ خاک، تمام طول میله دارای صفحه‌های مارپیچ بوده و کل توده خاک مسلح می‌شود. این موضوع باعث جلوگیری از جابجایی موضعی خاک می‌شود. در مهار سه مارپیچ (شکل ۹-ج) کرنش‌های برشی ایجاد شده به صورت سطحی بوده است.

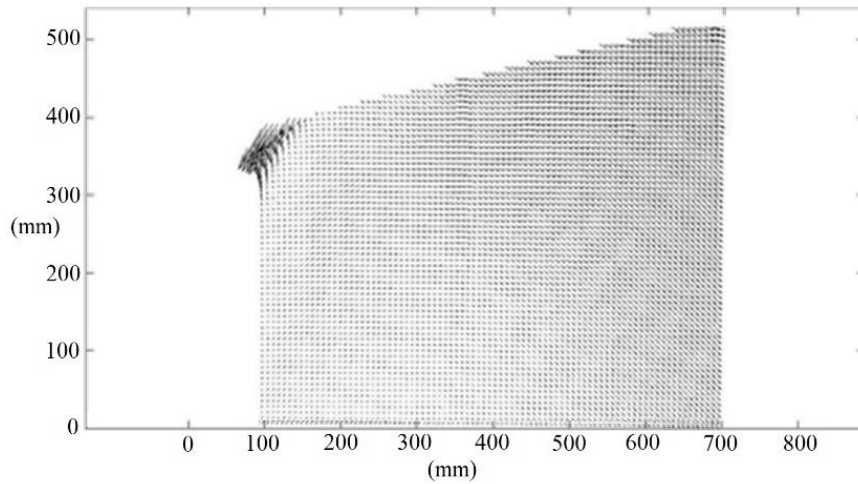
۳-۲- مقایسه تغییر شکل خاک پشت دیوار در ۳ نوع مختلف مهار مارپیچ و شیب پشت بالای دیوار ۲۰ درجه

در شکل ۱۰ جابجایی در تاج دیوار برای ۳ نوع مهار و در حالت

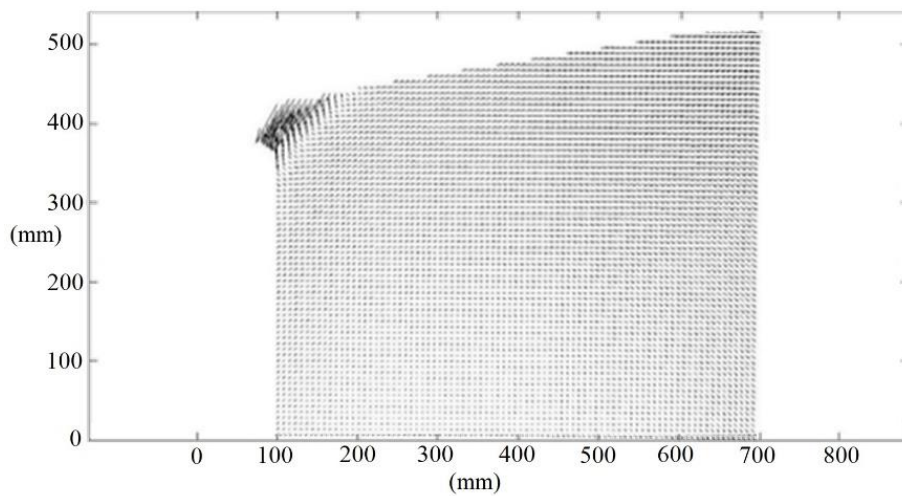
شدن مهارها در این امر نقش داشته است. پس از جابجایی اولیه و فعال شدن مهارها نرخ افزایش جابجایی کاهش یافته است. این کاهش از مرحله دوم خاک برداری تا مرحله پنجم ادامه داشته است. دلیل این موضوع وجود ریشه در دیوار نیز بوده است. از مرحله ۵ تا پایان عملیات خاک برداری به دلیل کاهش عمق گیرداری روند جابجایی تاج دیوار روندی رو به رشد داشته است. در مهار نوع ۳، بیشترین جابجایی مربوط به ۲ مرحله اول خاک برداری بوده است و وجود سه صفحه مارپیچ به کنترل جابجایی‌ها کمک بسزایی کرده است.

به منظور مقایسه تغییر شکل خاک پشت دیوار، بردارهای جابجایی کل مورد استفاده قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها با توجه به اشکال ۸-الف-ب-ج- که به ترتیب مربوط به مهار مارپیچ نوع ۱، ۲ و ۳ هستند، دیده می‌شود که با افزایش ظرفیت باربری تغییر شکل خاک پشت دیوار کاهش یافته است. در این حالت تغییر شکل مربوط به مهار نوع ۱، ۲ بسیار به یکدیگر نزدیک هستند که مربوط به مهارهای مارپیچ دو مارپیچ با قطر متغیر و ثابت هستند. از نزدیک بودن تغییرشکل‌ها در این دو نوع مهار می‌توان نتیجه‌گیری نمود که تغییر قطر صفحه تأثیر بسزایی در کنترل جابجایی‌های دیوار نداشته است. از طرف دیگر، افزایش تعداد صفحه‌های مارپیچ بر کاهش تعداد و تغییر شکل بردارهای جابجایی تأثیر بسزایی داشته است. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که، در کنترل جابجایی‌ها، افزایش تعداد صفحه‌های مارپیچ تأثیر بهتری نسبت به افزایش قطر صفحه داشته است.

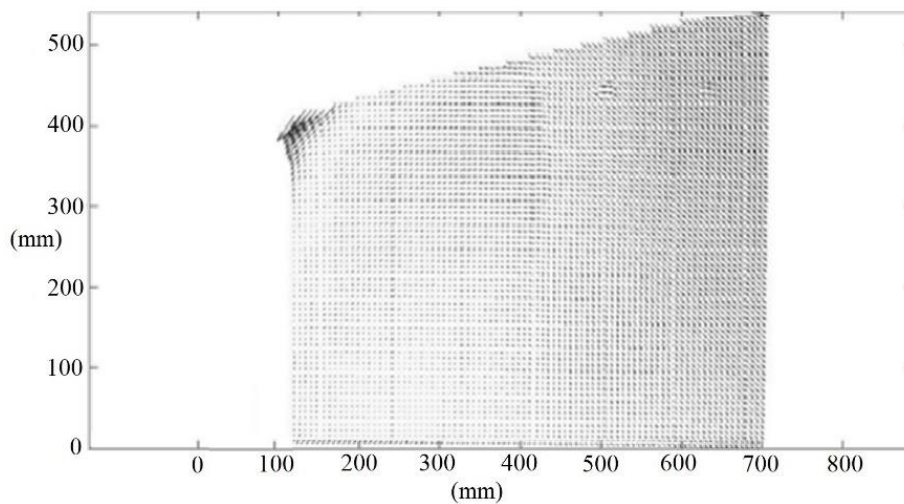
در شکل ۹ نمودارهای کرنش برشی ایجاد شده در خاک برای



الف- مهار دو مارپیچ با قطر متغیر



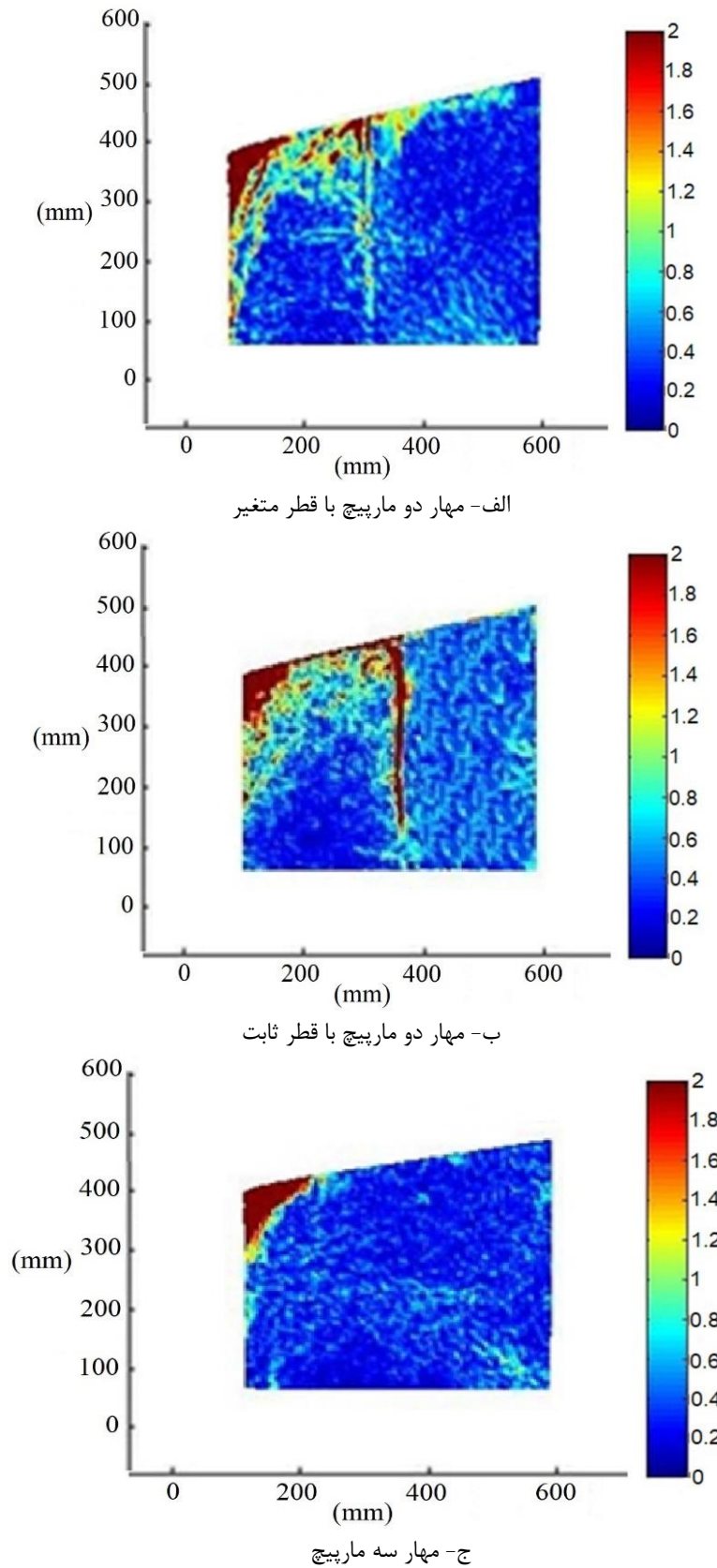
ب- مهار دو مارپیچ با قطر ثابت



ج- مهار سه مارپیچ

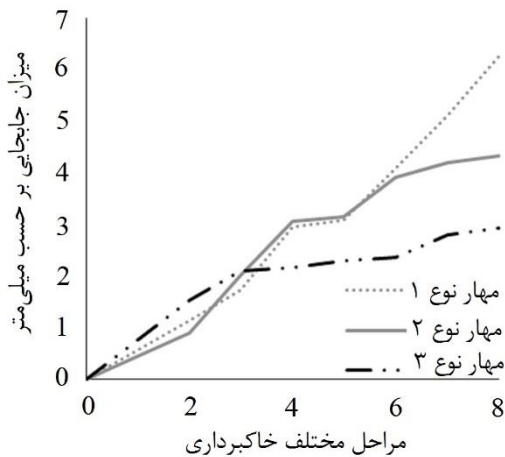
شکل ۸. بردارهای جابجایی دیوار پایدارسازی شده در حالت شیب پشت بالای دیوار ۱۰ درجه

Fig. 8. Displacement vectors of the stabilized wall with a back slope of 10° using: a double-pitch anchor with a variable diameter, c double-pitch anchor with a constant diameter, and d three-pitch anchor



شکل ۹. کرنش برشی ایجاد شده در دیوار پایدارسازی شده در حالت شیب پشت بالای دیوار ۱۰ درجه

Fig. 9. Shear strains of the stabilized wall with a back slope of 10° using: a) a double-pitch anchor with a variable diameter, b) a double-pitch anchor with a constant diameter, and c) a three-pitch anchor



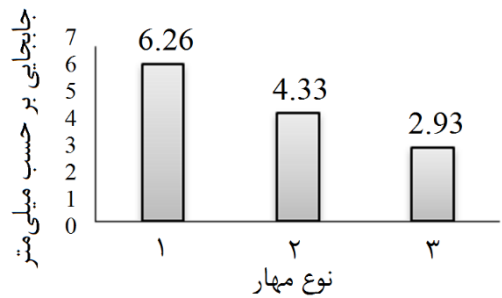
شکل ۱۱. میزان جابجایی تاج دیوار در مراحل مختلف خاک برداری نوع ۳ مهار مارپیچ در شیب پشت بالای دیوار ۲۰ درجه

Fig. 11. Wall crest displacement rate during the excavation steps for three types of helical anchors with a back slope of 20°

به ۳ مرحله ابتدایی است. مهار نوع ۱ و ۲ که هر دو دارای دو صفحه مارپیچ هستند تا مرحله ۶ خاک برداری تقریباً دارای رفتار یکسانی بوده‌اند. در انتها مهار نوع ۲ به دلیل ظرفیت باربری بیشتر نسبت به مهار نوع ۱، در کنترل جابجایی‌های کلی بهتر عمل کرده است.

در شکل ۱۲ بردارهای جابجایی برای نوع ۳ مهار در زاویه پشت ۲۰ درجه ارائه شده است. در اشکال ۱۲ ب و ج جابجایی‌های نزدیک به هم دیده می‌شود. حداکثر جابجایی مربوط به مدل ۱ و شکل ۱۲-الف است.

در شکل ۱۳ الف، ب و ج نمودارهای کرنش برشی ایجاد شده در خاک پشت دیوار ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است، با تغییر نوع مهار و افزایش تعداد صفحه‌های مارپیچ مقدار کرنش‌های برشی و نیز گستردگی آنها در پشت دیوار کاهش یافته است. بیشترین مقدار و گستردگی کرنش‌های برشی در شکل ۱۳-الف دیده می‌شود. زیرا مهار ظرفیت باربری کافی در شرایط وجود سربار را نداشته است. در شکل‌های ۱۳-ب و ۱۳-ج به دلیل ظرفیت باربری کافی مهارها گوه گسیختگی تشکیل نشده است. در این شرایط کرنش‌های برشی به شکل خطی در محدوده اولین صفحه مهار تشکیل شده‌اند. جابجایی باعث به کشش افتادن مهارها شده و ظرفیت باربری مناسب مهارها در جهت عدم تشکیل گوه گسیختگی نقش داشته است.



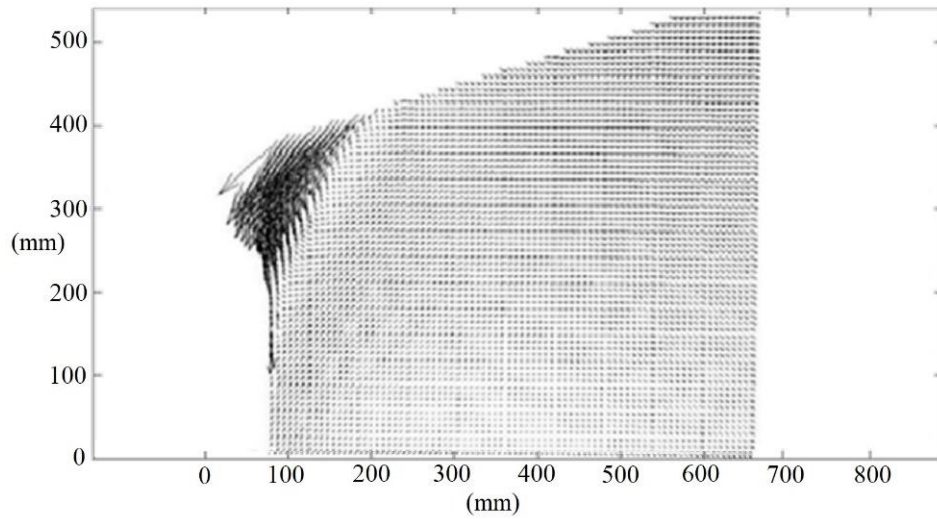
شکل ۱۰. میزان جابجایی‌ها در تاج دیوار برای نوع ۳ مهار مارپیچ در حالت شیب پشت بالای دیوار ۲۰ درجه

Fig. 10. Wall crest displacement rate for three types of helical anchors with a back slope of 20°

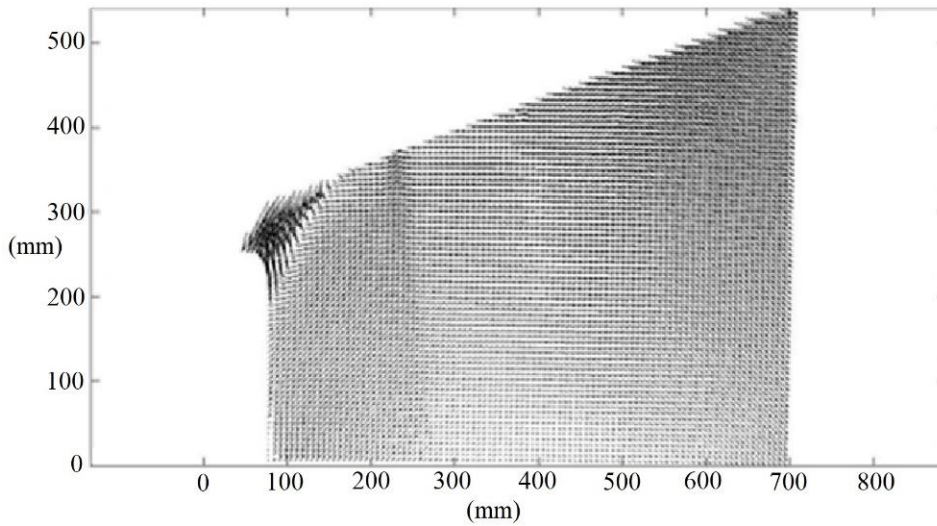
شیب پشت بالای دیوار ۲۰ درجه ارائه شده است. کاهش میزان جابجایی برای تغییر مهار از نوع ۱ به نوع ۲، ۳۱٪ بوده است. افزایش تعداد صفحه مهار از دو مارپیچ به سه مارپیچ (تغییر نوع مهار از ۲ به ۳) اثر مناسبی بر میزان جابجایی دیوار داشته و جابجایی تاج دیوار ۳۲٪ کاهش یافته است. علت کاهش جابجایی‌ها با تغییر مهارها، افزایش ظرفیت باربری مهارها است که از نوع ۱ به ۳ رخ می‌دهد. به عبارت دیگر نقش مهارها در کمک به پایدارسازی شیروانی‌ها با افزایش تعداد صفحه‌ها و یا قطر آنها افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۱ جابجایی در مراحل مختلف خاک برداری برای نوع ۳ مهار در حالت شیب ۲۰ درجه پشت بالای دیوار ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است جابجایی دیوار با افزایش ظرفیت باربری مهار کاهش یافته است. روند ابتدایی جابجایی برای هر ۳ مهار در سه مرحله اول خاک برداری تقریباً یکسان است. دلیل این موضوع نیاز به جابجایی برای فعال شدن مهارها است. برای برطرف کردن این مشکل در پروژه‌های حساس و کنترل جابجایی، می‌توان از پس کشیدگی مهارهای مارپیچ استفاده کرد. پس از آن در مراحل ۴ تا ۵ تقریباً جابجایی‌ها ثابت بوده است. این موضوع به سه دلیل بوده است: ۱- گیرداری دیوار ۲- وجود مسلح کننده‌ها و ایجاد نیروی کششی ناشی از جابجایی مراحل قبل ۳- ظرفیت کافی مهارها برای مقابله با جابجایی بیشتر.

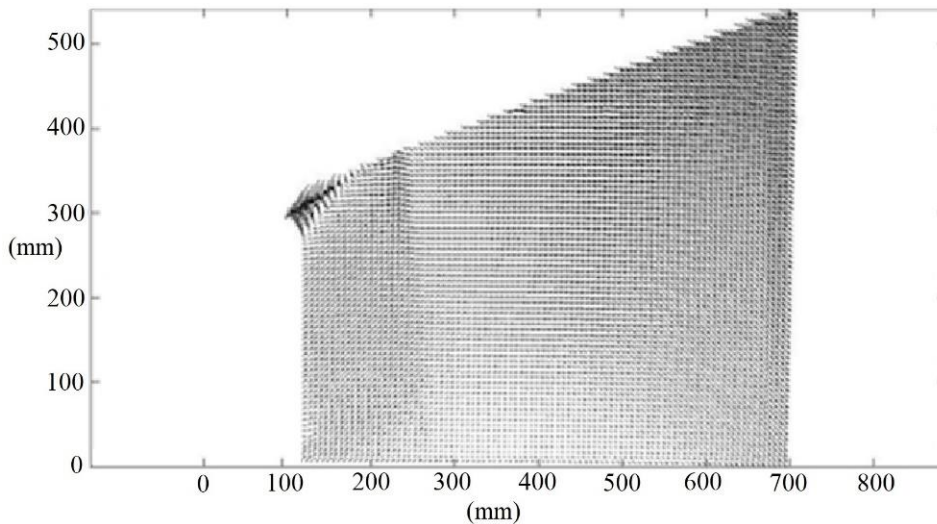
از مرحله ۶ تا ۸ به دلیل کاهش و اتمام گیرداری دیوار و ظرفیت باربری کمتر مهارهای نوع ۱ و ۲، در این دو حالت جابجایی‌ها روندی رو به رشد داشته است. در مهار نوع ۳ بیشترین میزان جابجایی مربوط



الف- مهار دو ماریچ با قطر متغیر



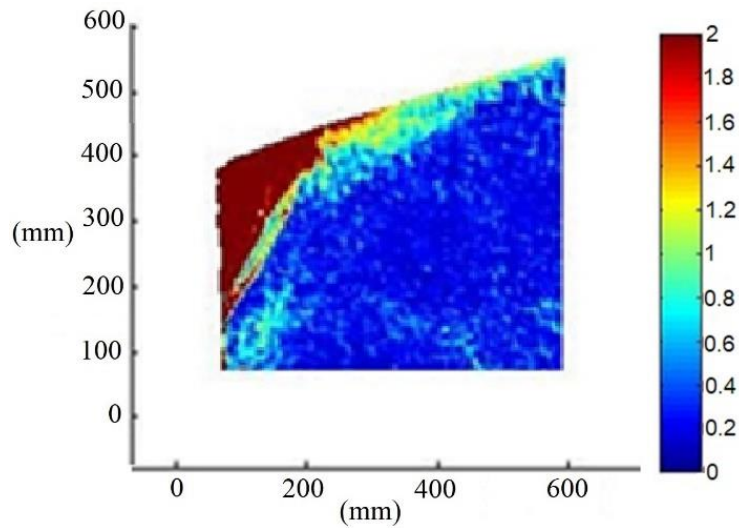
ب- مهار دو ماریچ با قطر ثابت



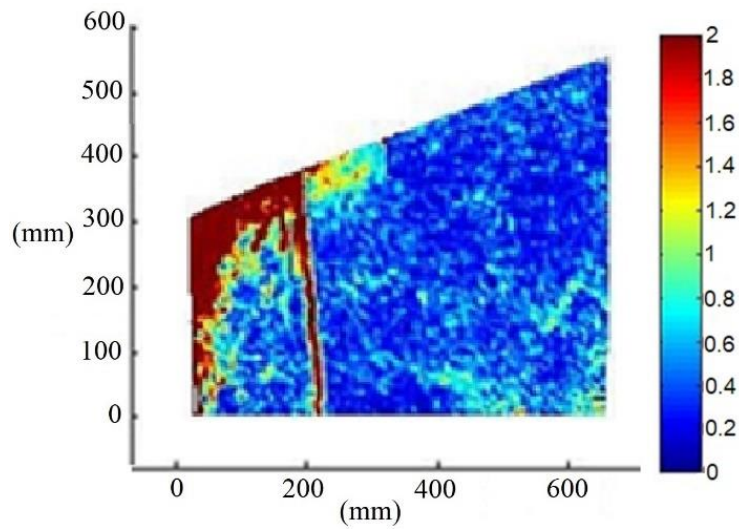
ج- مهار سه ماریچ

شکل ۱۲. بردارهای جابجایی دیوار پایدارسازی شده در حالت شیب پشت بالای دیوار ۲۰ درجه

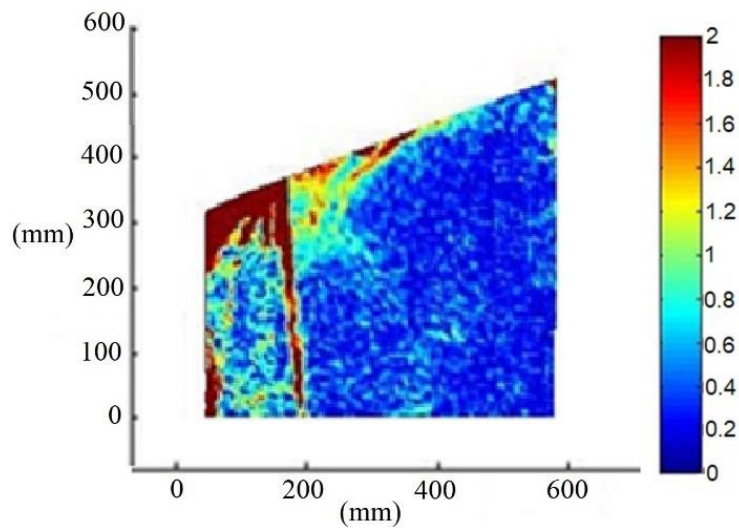
Fig. 12. Displacement vectors of the stabilized wall with a back slope of 20° using: a double-pitch anchor with a variable diameter, c double-pitch anchor with a constant diameter, and d three-pitch anchor



الف- مهار دو مارپیچ با قطر متغیر



ب- مهار دو مارپیچ با قطر ثابت



ج- مهار سه مارپیچ

شکل ۱۳. کرنش برشی ایجاد شده در دیوار پایدارسازی شده در حالت شیب پشت بالای دیوار ۲۰ درجه

Fig. 13. Shear strains of the stabilized wall with a back slope of 20° using: a double-pitch anchor with a variable diameter, c double-pitch anchor with a constant diameter, and d three-pitch anchor

جدول ۵. مقایسه نتایج روش میخکوبی خاک و مهار مارپیچ با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی به روش PIV

Table 5. The results of the PIV-based physical modeling of a nail stabilized wall and helical anchor stabilized wall

نوع مسلح کننده	میخکوبی	مهار نوع ۱	مهار نوع ۲	مهار نوع ۳
جابجایی در تاج دیوار در حالت شیب پشت بالای دیوار ۱۰ درجه (mm)	۱۵	۴/۵۴	۳/۲۱	۲/۱۷
جابجایی در تاج دیوار در حالت شیب پشت بالای دیوار ۲۰ درجه (mm)	۲۰	۶/۲۶	۴/۳۳	۲/۹۳

به روش میخکوبی باعث کاهش هزینه مصالح اجرایی می‌شود. از طرف دیگر سرعت اجرای روش مهار مارپیچ با توجه به عدم حفاری و تزریق نسبت به میخکوبی بسیار بالاتر است. تراکم کمتر نیز بر کاهش زمان اجرای روش مهار مارپیچ تأثیر خواهد داشت.

همان‌طور که از مقایسه نتایج جدول ۵ قابل مشاهده است تفاوت میان جابجایی تاج دیوار با استفاده از سیستم میخکوبی و مهار مارپیچ بسیار زیاد است. از این رو برای کنترل جابجایی‌ها می‌توان از روش مهار مارپیچ برای پایدارسازی دیوارهای دارای سربار و یا شیب‌های زیاد استفاده کرد. استفاده از مهار نوع ۱ به جای روش میخکوبی در هر دو شیب باعث کاهش میزان جابجایی تاج دیوار به اندازه ۶۹ درصد خواهد شد. بهترین جایگزین روش میخکوبی نیز مهار نوع ۳ و یا مهار سه مارپیچ است که باعث کاهش جابجایی تاج دیوار به اندازه ۸۵ درصد می‌شود. از این رو در مواردی که نتایج جابجایی دیوار در روش میخکوبی، در محدوده مقادیر قابل قبول برای سازه‌های اطراف نیست و احتمال آسیب رسیدن و خرابی آن‌ها وجود دارد استفاده از مهارهای مارپیچ جایگزین مناسبی خواهد بود.

افزایش سربار به شکل تغییر شیب از ۱۰ درجه به ۲۰ درجه در روش میخکوبی باعث افزایش جابجایی‌های تاج دیوار به اندازه ۳۳ درصد شده است. تغییر میزان جابجایی با افزایش شیب در مهارهای نوع ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۳۸٪، ۳۵٪ و ۳۵٪ بوده است. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که عملکرد روش میخکوبی و مهار مارپیچ در کنترل جابجایی تاج دیوار با تغییر سربار به یک شکل بوده است.

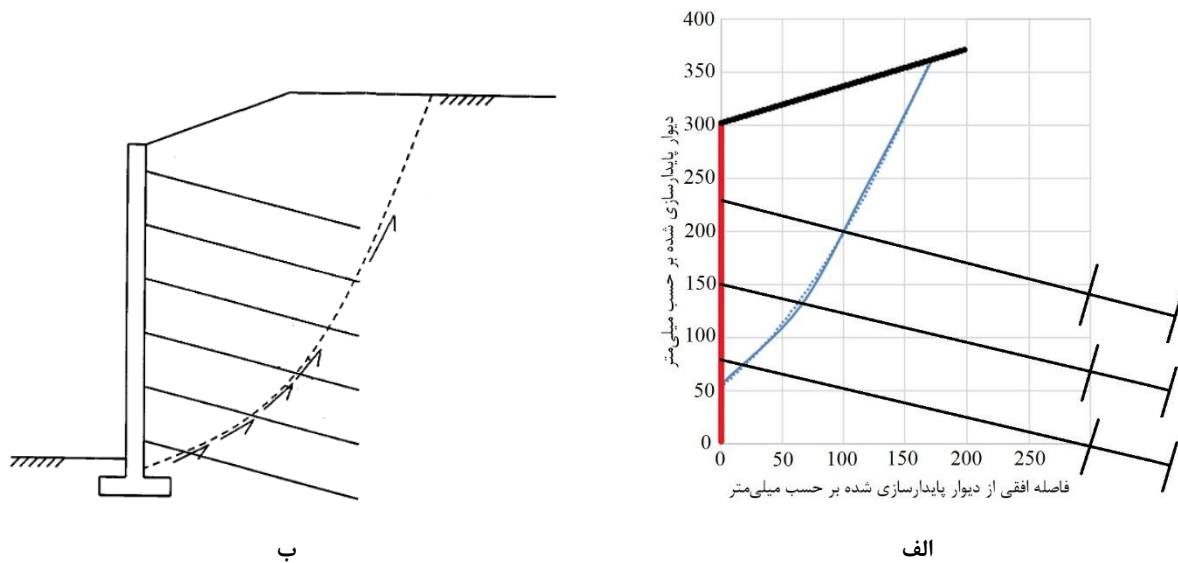
۳-۴ یافتن شکل سطوح لغزش در خاک پشت دیوار مهار مارپیچ

پیشنهادهای بسیاری برای شکل سطوح لغزش کلی پشت دیوارهای میخکوبی ارائه شده است؛ با این حال هنوز مطالعات کامل و گسترده در رابطه با پیش‌بینی سطوح لغزش دیوار مهار مارپیچ انجام نشده است. برای سطح لغزش دیوارهای میخکوبی، Stocker و

۳-۳ مقایسه جابجایی تاج دیوار در حالت پایدارسازی به روش مهار مارپیچ و میخکوبی

در تحقیقات انجام شده توسط Deardorff و همکاران در سال ۲۰۱۰ بر روی دیوار پایدارسازی شده به روش مهارهای مارپیچ مشخص شده است که دامنه جابجایی دیوار، در محدوده مقادیر ارائه شده توسط دستورالعمل طراحی اداره بزرگراه فدرال (FHWA) برای دیوار میخکوبی بوده است [۳]. تحقیق مذکور تنها موردی است که به مقایسه مهار مارپیچ و میخکوبی پرداخته است. با توجه به مزایای فراوان روش مهار مارپیچ نسبت به میخکوبی، نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج به دست آمده از تحقیق "روش میخکوبی خاک با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی به روش PIV" مقایسه شده است [۱۸]. هدف از این مقایسه رسیدن به این نتیجه است که کدام روش و با چه تراکمی به پایدارسازی بهتر دیوار کمک می‌کند.

در هر دو تحقیق مهارها و میخ‌ها تحت زاویه ۱۵ درجه نصب شده‌اند. سربارهای انتخاب شده به شکل شیب‌های خاکی نیز به یک مقدار بوده است. تعداد میخکوبی‌های مورد استفاده ۱۳ عدد ولی طول آنها نسبت به مهارهای مارپیچ کوتاه‌تر و برابر با ۳۰ سانتی‌متر بوده است. دلیل این مطلب عملکرد متفاوت دو روش میخکوبی و مهار مارپیچ بوده است. در میخکوبی توده خاک مسلح شده و از گسیختگی آن جلوگیری می‌شود در حالیکه در روش مهار مارپیچ با استفاده از المان‌های باربر گوه گسیختگی به خاک پشت آن دوخته می‌شود. قطر میخ‌های استفاده شده ۳ میلی‌متر بوده است که بعد از چسباندن ماسه به آن به ۴ میلی‌متر افزایش یافته است. تعداد مهارهای مارپیچ مورد استفاده ۷ عدد و طول آنها ۳۷/۵ سانتی‌متر بوده است. از این رو درصد تراکم استفاده شده در آزمایش‌های دیوار میخکوبی ۴۳٪ بوده در حالی که تراکم مورد استفاده برای دیوار مهار مارپیچ ۲۹٪ است (تراکم بیان شده سانتی‌متر اجرای مسلح کننده به سانتی‌متر مربع سطح پایدارسازی است). تراکم کمتر روش مهار مارپیچ نسبت



شکل ۱۴. سطوح لغزش ایجاد شده الف- مهار مارپیچ نوع ۱ و شیب پشت بالای دیوار ۲۰ درجه؛ نقطه (۰،۰) پای دیوار است؛ خط قرمز رنگ نشان دهنده دیوار؛ خط مشکی نشان دهنده شیب پشت بالای دیوار ۲۰ درجه؛ خط آبی رنگ سطح لغزش است. ب- سطح لغزش پیشنهادی Shen و همکاران (۱۹۸۱) برای دیوار میخکوبی شده [۳۲]

Fig. 14. Created slip surfaces: a Type-1 helical anchor and 20° back slope (dots (0 and 0) denote the wall foot; the red line represents the wall; the black line shows the back slope of 20°; the blue line is the slip surface) and b the slip surface proposed by Shen et al. for soil nailed wall

طول‌اند). تفاوتی که بین نتایج این تحقیق و روش Shen و همکاران (۱۹۸۱) مشاهده می‌گردد آن است که مرکز سهمی در پای دیوار قرار ندارد که می‌تواند نتیجه تفاوت روش پایدارسازی مهار مارپیچ و میخکوبی باشد. از طرف دیگر در روش ارائه شده توسط Shen و همکاران (۱۹۸۱) این امکان وجود دارد که میخ‌های نزدیک به سطح زمین سطح لغزش را قطع نکنند. این موضوع با عملکرد صحیح مهارهای مارپیچ در تناقض است. مهارهای مارپیچ زمانی به درستی عمل خواهند کرد که فاصله آخرین صفحه از گوه گسیختگی حداقل سه برابر قطر صفحه باشد. برای رسیدن به سطوح لغزش واقعی‌تر و دقیق‌تر نیاز به ایجاد سربار بیشتر است؛ برای این منظور تحقیقات دیگری بر روی دیوار مهار مارپیچ با اعمال سربار بیشتر توسط این تیم تحقیقاتی در حال انجام است.

$$y = 0.0508x^2 + 0.9416x + 5.4142 \quad (1)$$

که در آن x فاصله افقی از دیوار پایدارسازی شده بر حسب سانتی‌متر و y فاصله قائم از پاشنه دیوار پایدارسازی شده بر حسب سانتی‌متر است.

همکاران (۱۹۷۹) سطح لغزش دو خطی، Shen و همکاران (۱۹۸۱) سهمی و Juran و همکاران (۱۹۹۰) اسپیرال لگاریتمی و Oral و Sheahan (۱۹۹۸) حالت مسطح را در نظر گرفته‌اند [۳۲-۳۶]. آزمایش شیب پشت بالای دیوار ۲۰ درجه و مهار نوع ۱ تنها آزمایشی بوده است که با توجه به پایین بودن ظرفیت باربری و زیاد بودن سربار گوه گسیختگی تشکیل شده است. از این رو در شکل ۱۴-الف سطح لغزش ایجاد گردیده مربوط به شکل ۱۳-الف را نشان می‌دهد. سطح لغزش در این حالت به شکل سهمی بوده و در معادله ۱ به آن اشاره شده است. همان‌طور که در شکل ۱۴-ب نشان داده شده است، در روش Shen و همکاران (۱۹۸۱) سطح لغزش پیشنهادی برای دیوارهای میخکوبی شده به شکل سهمی پیش‌بینی شده است [۳۴]. این روش که در دانشگاه کالیفرنیا ارائه گردیده است، یک روش تعادل حدی است. در این روش فرض می‌شود که سطوح لغزش سهمی‌هایی با محورهای قائم هستند که مرکز آنها در پای دیوار قرار دارد. در این روش فرض می‌گردد که خاک همگن بوده و کاملاً خشک است و همچنین شکل ساده‌ای برای دیوار در نظر گرفته می‌شود (دیوار قائم، سطح خاک افقی، ردیف‌های موازی میخ‌ها که هم فاصله و هم

۴- نتیجه‌گیری

بوده است. در روش Shen و همکاران (۱۹۸۱) نیز سطح لغزش پیشنهادی برای دیوارهای میخکوبی شده به شکل سهمی پیش‌بینی شده است. با این تفاوت که سطح لغزش دیوار مهار مارپیچ برخلاف روش میخکوبی از پای دیوار عبور نکرده است. در آزمایش‌های انجام‌شده سربار به‌صورت شیب خاکی و به مقدار کمی بوده است. برای تعیین سطوح لغزش در سربار بیشتر، پیشنهاد می‌شود در بالای دیوار از پاشنه بارگذاری استفاده شود.

آزمایش‌های انجام شده جهت بررسی تأثیر شکل مهار مارپیچ و شیب‌های مختلف خاک بر روی تغییر شکل خاک پشت دیوار مهار مارپیچ صورت پذیرفته است. نتایج به صورت نمودارهای بردارهای جابجایی، کرنش‌های برشی و مقایسه میزان جابجایی‌ها در هر مرحله خاک‌برداری ارائه شده است. تعدادی از مهم‌ترین نتایج به شرح زیر هستند.

منابع و مراجع

- [1] A. Ghaly, A. Hanna, M. Hanna, Installation torque of screw anchors in dry sand, *Soils and Foundations*, 31(2) (1991) 77-92.
- [2] H. Perko, Summary of earth retaining methods utilizing helical anchors, *Magnum® Helix Foundation™ Technical Reference Manual*. March, 4 (1999).
- [3] D. Deardorff, M. Moeller, E. Walt, Results of an instrumented helical soil nail wall, in: *Earth Retention Conference 3*, (2010) 262-269.
- [4] A. Lutenneger, Behavior of multi-helix screw anchors in sand, in: *Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Toronto, Ont. (2011).
- [5] 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.
- [6] C.d.H.C. Tsuha, T.d.C. Santos, G. Rault, L. Thorel, J. Garnier, Influence of multiple helix configuration on the uplift capacity of helical anchors, *Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique*, 18, (2013).
- [7] C.d.H.C. Tsuha, physical modelling of the behaviour of helical anchors, in: *3rd European Conf. on Physical Modelling in Geotechnics (EUROFUGE 2016)*. IFSTTAR Nantes Centre, France, 1st-3rd June, (2016).
- [8] T.d.S.O. Morais, C.d.H.C. Tsuha, A new experimental procedure to investigate the torque correlation factor of helical anchors, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19 (2014) 3851-3864.

۱- افزایش ظرفیت باربری مهار، به افزایش قطر و تعداد صفحه‌های مارپیچ همراه با کاهش جابجایی تاج دیوار نقش موثری داشته است. این کاهش با افزایش شعاع حدود ۳۰ درصد و با افزایش تعداد صفحه و قطر در حدود ۶۰ درصد بوده است.

۲- میزان جابجایی مجاز دیوار تعیین‌کننده نوع مهار مارپیچ مورد استفاده برای پایدارسازی دیوار است. در صورت نیاز به کاهش چشمگیر جابجایی، پیشنهاد می‌شود تعداد صفحه‌های مهار افزایش یابد و قطر آن ثابت باشد.

۳- با افزایش شیب پشت بالای دیوار، میزان جابجایی تاج دیوار افزایش یافته است، این موضوع به دلیل افزایش سربار بوده است. با افزایش تعداد صفحه‌ها و یا قطر صفحه، اثر سربار در حدود ۳۲٪ کاهش یافته است.

۴- همه مهارها برای فعال شدن نیاز به میزان کمی جابجایی دارند. این مسئله با تغییر نوع مهار مارپیچ قابل برطرف کردن نیست. از این رو در صورتی که مقدار جابجایی لازم برای فعال‌سازی مهارها بیش از مقدار مجاز جابجایی تاج دیوار باشد، استفاده از مهار مارپیچ پس کشیده توصیه می‌شود.

۵- با توجه به این موضوع که میزان جابجایی در تاج دیوار در روش مهار مارپیچ بسیار کمتر از روش میخکوبی است؛ در مواردی که نتایج جابجایی دیوار در روش میخکوبی، در محدوده مقادیر قابل قبول برای سازه‌های اطراف نیست و احتمال آسیب رسیدن و خرابی آن‌ها وجود دارد استفاده از مهارهای مارپیچ جایگزین مناسبی خواهد بود. از طرف دیگر تراکم دیوار پایدارسازی شده با استفاده از مهار مارپیچ نسبت به روش میخکوبی کمتر بوده است. بنابراین اجرای آن نیاز به نیروی انسانی کمتری داشته، سرعت اجرای آن بالاتر است و از نظر اقتصادی مناسب‌تر خواهد بود.

۶- سطح لغزش ایجاد شده در دیوار مهار مارپیچ سهمی شکل

- [20] H.A. Perko, Helical piles: a practical guide to design and installation, John Wiley & Sons, (2009).
- [21] A. Ghaly, A. Hanna, M. Hanna, Uplift behavior of screw anchors in sand. II: hydrostatic and flow conditions, Journal of geotechnical engineering, 117(5) (1991) 794-808.
- [22] D.M. Wood, Geotechnical modelling, CRC Press, (2014).
- [23] J.J.M. Young, Uplift capacity and displacement of helical anchors in cohesive soil, Oregon State University, (2012).
- [24] S.A. Lanyi-Bennett, L. Deng, Axial load testing of helical pile groups in a glaciolacustrine clay, Canadian Geotechnical Journal, (2018).
- [25] S. Mittal, S. Mukherjee, Behaviour of group of helical screw anchors under compressive loads, Geotechnical and Geological Engineering, 33(3) (2015) 575-592.
- [26] P. Ghosh, S. Samal, Interaction effect of group of helical anchors in cohesive soil using finite element analysis, Geotechnical and Geological Engineering, 35(4) (2017) 1475-1490.
- [27] T.W. Dong, Y.R. Zheng, Limit analysis of vertical anti-pulling screw pile group under inclined loading on 3D elastic-plastic finite element strength reduction method, Journal of central south university, 21(3) (2014) 1165-1175.
- [28] B.S. Albusoda, H.O. Abbase, Performance assessment of single and group of helical piles embedded in expansive soil, International Journal of Geo-Engineering, 8(1) (2017) 25.
- [29] Z. Elsherbiny, M. El Naggar, The performance of helical pile groups under compressive loads: a numerical investigation, in: Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paper, (2013).
- [30] M. Sakr, A. Nazir, W. Azzam, A. Sallam, Uplift capacity of group screw piles with grouted shafts in sand, (2017).
- [31] D. White, W. Take, M. Bolton, Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, Geotechnique, 53(7) (2003) 619-631.
- [32] C.A. Lazarte, H. Robinson, J.E. Gómez, A. Baxter, A. Cadden, R. Berg, Soil nail walls Reference Manual, (2015).
- [9] S. Mittal, S. Mukherjee, Vertical uplift capacity of a group of helical screw anchors in sand, Indian Geotechnical Journal, 43(3) (2013) 238-250.
- [10] S. Mittal, S. Mukherjee, Vertical pullout capacity of a group of helical screw anchors in sand: An Empirical Approach, Indian Geotechnical Journal, 44(4) (2014) 480-488.
- [11] J.A. Schiavon, C.d.H.C. Tsuha, L. Thorel, Scale effect in centrifuge tests of helical anchors in sand, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 16(4) (2016) 185-196.
- [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, Computers and Geotechnics, 109 (2019) 34-45.
- [13] H. Motamedinia, N. Hataf, G. Habibagahi, A Study on Failure Surface of Helical Anchors in Sand by PIV/DIC Technique, International Journal of Civil Engineering, (2018) 1-15.
- [14] A. J. Lutenegeger, Axial uplift of square-shaft single-helix helical anchor groups in clay, in: IFCEE 2018 Orlando, Florida, (2018) 403-416.
- [15] P. Ghosh, S. Samal, Ultimate pullout capacity of isolated helical anchor using finite element analysis, in: Soil Dynamics and Earthquake Geotechnical Engineering, Springer, (2019) 237-245.
- [16] S. Clemence, A. Lutenegeger, Industry survey of state of practice for helical piles and tiebacks, DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute, 9(1) (2015) 21-41.
- [17] W.P. Gardiner, G. Gettinby, Experimental design techniques in statistical practice: A practical software-based approach, Elsevier, (1998).
- [18] H. Mahdavi, H. Katebi, M.H. Aminfar, Investigation of soil nailing method using PIV physical modeling, faculty of Civil Engineering, Tabriz, (2008), (in persian).
- [19] M.E. Mahmoudi Mehrizi, M. Jalali Moghadam, Mechanical ground anchors design and construction, ACECR Publication, Amirkabir University of Technology Branch, (2016), (in persian).

- [35] I. Juran, G. Baudrand, K. Farrag, V. Elias, Kinematic limit analysis for design of soil-nailed structures, *J. Geotech. Eng.*, 116(1) (1990) 54 –72.
- [36] T. Oral, T.C. Sheahan, The use of soil nails in soft clays, in: *Design and construction of earth retaining systems*, ASCE, (1998) 26 – 40.
- [33] M.F. Stocker, G.W. Korber, G. Gassler, G. Gudehus, Soil nailing, in: *Proceedings of the Conference on Soil Reinforcement*, Paris, 2 (1979) 469– 474.
- [34] C.K. Shen, S. Bang, L.R. Hermann, Ground movement analysis of earth support system, *J. Geotech. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 107(12) (1981) 1609–1624.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

J. Nazariafshar, M. E. Mahmoudi Mehrizi, Y. Daghighi, Physical modeling for evaluating the effect of helical anchor configuration and surcharge on wall displacement, Amirkabir J. Civil Eng., 52(10) (2021) 2529-2548.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15447.5922](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15447.5922)



