



Investigation on the performance of walls reinforced by helical nails under strip footing loading using physical model test

M. Yazdandoust^{1*}, S. Yadegari²

¹ Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

² Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT: In the current study, the performance of helical soil-nailed walls (HSNWs) was evaluated under footing loading using reduced-scale model tests. For this purpose, sixteen soil-nailed wall models were constructed with different lengths, patterns, and inclinations of the helical nails and then were loaded to failure using the strip footing. The quantitative and qualitative responses of the models to footing loading were identified in terms of the wall displacements, the deformation modes, and the bearing capacity of footing. Particle Image Velocimetry (PIV) technique was also used to trace shear bands and identify the failure mechanism. PIV results showed that increasing the nail length, as well as using a square pattern and a 15° angle to install the nails, could be three effective solutions to reduce the penetration depth of the slip surface and, consequently, to limit wedge failure dimensions. Findings also indicated that 15° can be introduced as the optimal inclination for installing helical nails in walls under strip footings to achieve the maximum bearing capacity and minimum lateral wall displacements.

Review History:

Received: Nov. 30, 2022

Revised: Nov. 07, 2023

Accepted: Dec. 10, 2023

Available Online: Jan. 05, 2024

Keywords:

Soil-nailed wall

helical nail

failure surface

physical model test

strip footing loading

1- Introduction

A novel nail element was introduced in 1996 in which the cement grout as the bonding agent has been removed and a series of flights have been employed to provide interaction with the soil mass. This novel nail, which is known as the helical nail, typically consists of a longitudinal shaft with helical flights that are attached to the shaft at equal intervals. These nails are installed in the soil mass by application of torque and the passive pressure mobilized in front of the flights provides the required resistance against pulling out. Due to the lack of need to drill hole for installing helical nails, their installation process is very fast and causes minimal site disturbance.

Although the use of helical nails dates back to 1996, the investigation on the performance of these walls began in 2010 with studying on two instrumented helical soil-nailed walls (HSNWs) by Deardorff et al. [1]. This investigation is one of the few studies that has been done on these structures. They found that the forces mobilized in the helical nails were within the range of values provided by FHWA [2]. The numerical study conducted by Sharma et al. [3] is the only seismic investigation on the performance of helical soil-nailed walls. It was found in this study that the seismic stability of HSNWs decreased by increasing nail inclination and the ratio of helix spacing to helix size. Using numerical study, Zahedi et al. [4]

found that helical nails are more efficient than grouted ones for reducing wall displacement under service loading.

Despite the widespread use of helical soil-nailed walls, the studies conducted on them are limited to these few studies. Hence, an attempt was made in the current study to investigate the performance of helical soil-nailed walls under footing loading using reduced-scale model tests. For this purpose, sixteen soil-nailed wall models were constructed with different lengths, patterns, and inclinations of the helical nails and were loaded to failure using the strip footing. The quantitative and qualitative responses of the models to footing loading were identified in terms of the facing displacement, the load of the nail head, the crest settlement, and the failure mechanism, and the load–deformation behavior of models was evaluated.

2- Physical Model Tests

The footing loading simulator located at the Geotechnical Center at the Science and Research Branch of Islamic Azad University was used to perform the physical model tests. The main components of this 1-g simulator included a testing tank, a loading system, and a reaction frame, as seen in Fig. 1. Given that the height of helical soil-nailed walls is practically limited to 6 to 9 m, a 0.6 m-high model with a geometric scaling factor of 1:10 (N = 10) was selected as representative

*Corresponding author's email: M.yazdandoust@Qom.ac.ir



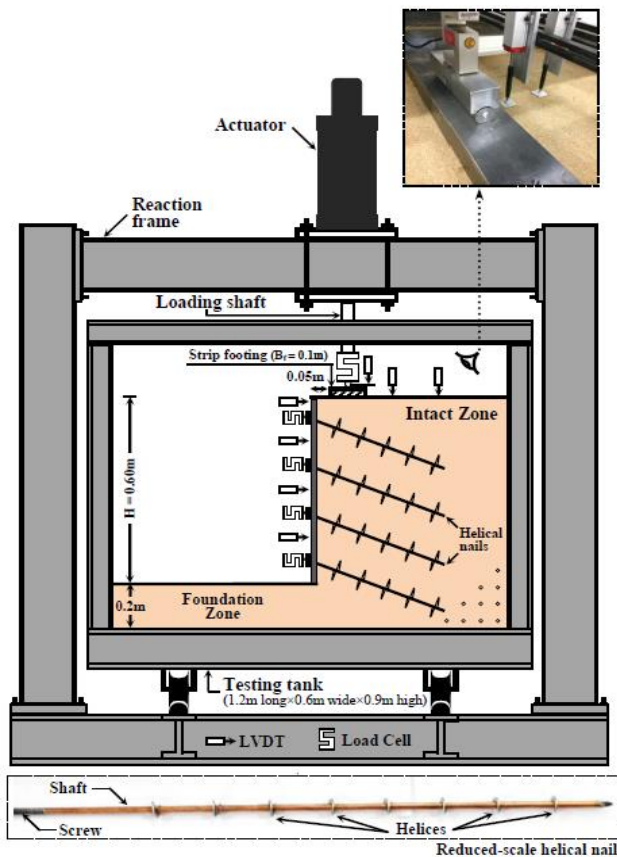


Fig. 1. Schematic representation of the test setup, model geometry, and instrumentation.

of a 6 m-high HSNW.

Two nail arrangements were selected to reinforce the wall models. In the first arrangement, helical nails of uniform length were used at L/H ratios of 0.5 and 0.7. These ratios were less than and equal to the optimal value recommended by FHWA [2], respectively. In the second arrangement, helical nails of non-uniform length were used. In this arrangement, the length of the nails located in the upper and lower halves of the wall were selected as $0.7H$ and $0.5H$, respectively. The nails were installed at two different angles of 0° (horizontal) and 15° . In addition to these two angles, the third angle of 30° was also used in the first arrangement. These angles were based on the minimum and maximum values recommended by the FSI [5] for the installation of helical nails and made it possible to investigate the effect of nail inclination (α) on the behavior of HSNWs. Staggered and square were also used as two different patterns to install the nail elements on the wall face. In both nail patterns, the nails were installed on the wall face with a horizontal and vertical spacing of 0.20 m and 0.15 m, respectively. These intervals are within the range recommended for helical nails by the FSI [5].

Silica sand with a moisture content of 6% was used at a relative density (D_r) of 65% to construct all main parts of the wall models. This soil material, called Firuzkooh #161 sand, was a synthetic soil composed of angular particles with a specific gravity of 2.654 and a fines content of about 6% that

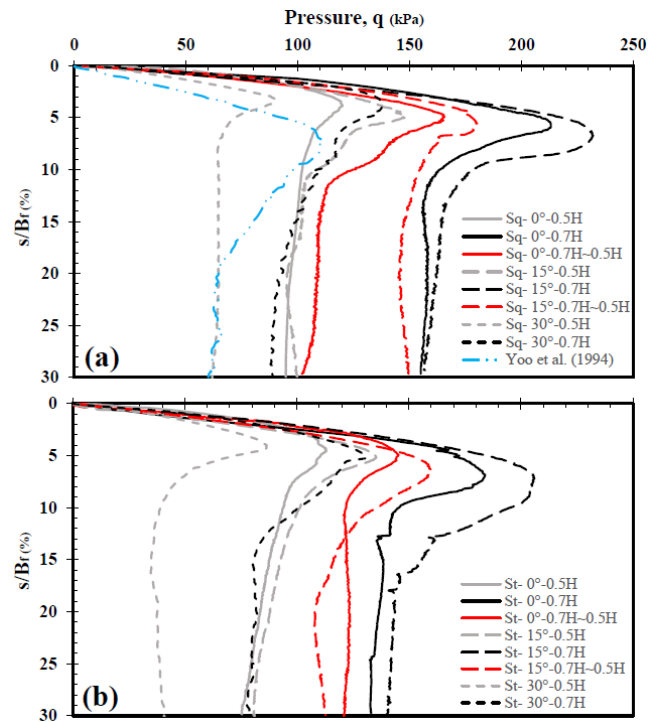


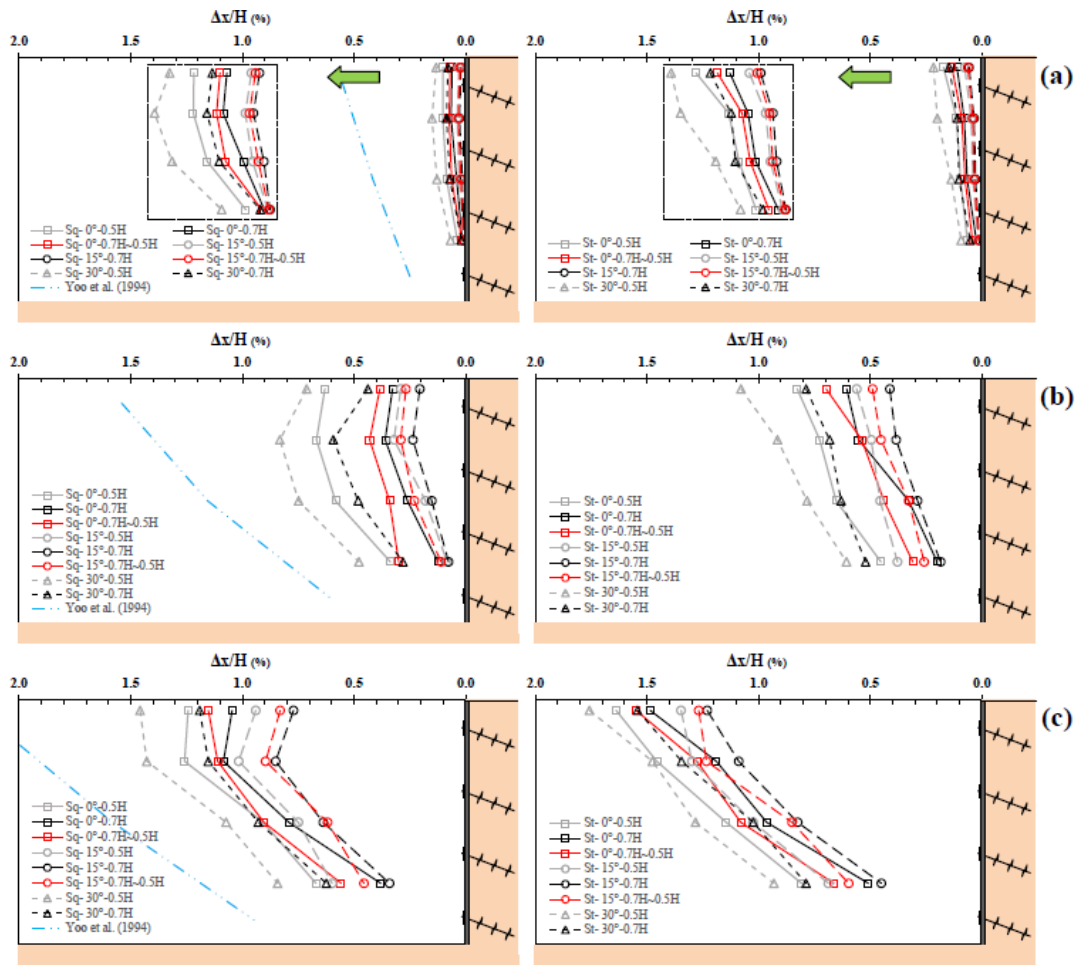
Fig. 2. Pressure-settlement relationships for HSNWs with: (a) a square pattern; (b) a staggered pattern.

had the minimum and maximum dry unit weights of 14.6 kN/m^3 and 16.6 kN/m^3 , respectively. Based on the axial stiffness relationship and the similitude rules for axial stiffness, a 2.5 mm diameter rod composed of phosphor bronze was selected as the nail shaft which was equivalent to a real helical nail with a 38 mm diameter steel shaft. Moreover, a series of pull-out tests were carried out on reduced-scale models of helical nails with different ratios of helix spacing to helix diameter (S_{hx}/D_h) to determine the appropriate arrangement of helices in reduced-scale helical nails. Based on these tests, helices with a diameter of 10 mm and distances of 33 mm were selected to make helical nails with a geometric scale of 1/10, as shown in Fig. 1. A facing panel with a thickness of 10 mm, which was composed of steel wire mesh surrounded by cement grout, was selected for use in the reduced-scale models. The specifications of steel wire mesh and cement grout were selected using the results of flexural tests and considering the scaling relationship for flexural resistance.

After constructing the wall models according to a real construction process of helical soil-nailed walls, the models were loaded using a stiff steel plate with a width of $B_f = 0.1 \text{ m}$ that was located 0.05m from the wall crest (Fig. 1). This steel plate corresponded to a real strip footing with a width of 1.0m.

3- Results and Discussion

The pressure–settlement (q – s/B_f) responses of the strip footing located on HSNWs with different arrangements, inclinations, and patterns of helical nails are presented in Fig. 2. Comparison of the q – s/B_f curves for the wall models with different nail patterns in Figs. 2(a) and 2(b) show that



Note: Δx is the lateral wall displacement

Fig. 3. Lateral deformations of the wall facing at different footing settlements: (a) $s/B_f = 2\%$; (b) $s/B_f = 8\%$; (c) $s/B_f = 14\%$

the use of a square pattern to install helical nails not only increased the ultimate bearing capacity of the footing but also decreased the settlement needed to reach failure (s/B_{pf}). This means that the bridge footings located on HSNWs with a square pattern experience a pressure–settlement behavior in a rigid manner before reaching ultimate bearing capacity. On the other hand, because the ultimate bearing capacity can be used in the footing design when it occurs within the range of allowable settlements, the reduction of (s/B_{pf}) can be considered an advantage for the square pattern. As seen in Fig. 2, the bearing capacity improvement due to the square pattern is more evident in long nails and gradually fades with an increase in the nail inclination so that the effect of nail pattern in calculating the bearing capacity can be ignored in HSNWs with 30-degree nails.

A comparison of the lateral displacement profiles in Fig. 3 shows that an increase in the nail length played an important role in reducing the lateral displacements of

HSNWs subjected to footing loading. This displacement reduction, which was maximized by installing the nails at a 15-degree angle, was greater when the length of the nails increased uniformly along with the wall height. As the nail inclination continued to increase, the wall displacement increased again and reached more than those experienced in the walls with horizontal helical nails. Hence, 15° and 30° can be introduced as the most efficient and inefficient angles for installing the helical nails to control the wall deformation, respectively. The pattern of nail installation was found as another factor affecting the wall displacements. As can be seen in Fig. 10, the use of a square pattern in installing the helical nails not only reduced the wall displacement but also added a bulging to the predominant deformation mode, which was overturning. The change in deformation mode caused the location of the maximum lateral displacement (Δx_{max}) to move from the wall crest to the middle third of the wall. Because limiting the lateral displacement of the wall crest plays an

effective role in providing the confining pressure around the footing, moving the location of Δx_{max} to a lower point of the wall can play an effective role in improving the performance of the bridge footings located on HSNWs.

The change in the geometry of the slip surfaces due to the change in the pattern of the nail installation was the first finding obtained from the comparison of the failure mechanism in the HSNW models with the square and staggered patterns. As seen, the slip surface in HSNWs with a square pattern started from the one-side edge of the footing and developed through the nail rows in the form of a convex curve toward the wall and finally led to the deformation of the wall facing, as reported for grouted-nail walls [6] and soil-nailed slopes [7]. The slip surface was developed to form a concave curve in HSNWs with a staggered pattern. The change in the geometry of the slip surface can be attributed to the amount of wall tendency to move outward. Inclination and length of nails were also found to be the other two structural factors to affect wedge failure dimensions in HSNWs. A uniform increase in the nail length along with the wall height, as well as the use of a 15-degree angle to install nails, reduced the penetration depth of the slip surface in all the wall models. The reduction of wedge failure dimensions, which was not observed in the local increase in nail length, can be considered as an advantage in the design of the walls. The failure to change the wedge failure dimensions due to the increase in the length of the nails located in the upper half of the walls indicates that the role of the lower rows of nails in the stability of HSNWs is more prominent than the upper rows. Therefore, it can be concluded that to maintain the performance of HSNWs when using non-uniform nail arrangements, attention to the lower rows of nails should be a priority. It should be noted that this conclusion is for footing loading only and may change under other loading conditions.

4- Conclusion

The main conclusions regarding physical models can be summarized as follows:

1) 15° and 30° were found to be the most efficient and inefficient angles for installing the helical nails to control the wall deformation, respectively, and vice versa as the inefficient and the most efficient angles for installing the helical nails to reduce the induced lateral pressure behind the

facing in HSNWs under footing loading.

2) The use of a staggered pattern to install helical nails was found to be an effective solution to reduce the lateral pressure induced by the footing located on HSNWs.

3) The change in the pattern of the nail installation was recognized as the only factor in causing a fundamental change in the geometry of the slip surfaces. This fundamental change was a change of curvature from convex to concave due to the use of a square pattern instead of a staggered one.

4) The addition of bulging to the predominant deformation mode (overturning) and the change in slip surface geometry from a concave curve to a curve convex were observed as two important consequences of changing the pattern of nail installation from staggered to square.

References

- [1] D. Deardorff, M., Moeller, and E. Walt. "Results of an instrumented helical soil nail wall." In Earth Retention Conference 3 (2010) 262-269.
- [2] FHWA. "Geotechnical Engineering Circular No. 7: Soil Nail Walls - Reference Manual. FHWA Rep." No. FHWA-NHI-14-007, Washington, D.C, (2015).
- [3] M. Sharma, D. Choudhury, M. Samanta, S. Sarkar, V.R. Annapareddy. "Analysis of helical soil-nailed walls under static and seismic conditions." *Canadian Geotechnical Journal* 57(6) (2020) 815-827.
- [4] P. Zahedi, A. Rezaei-Farei, H. Soltani-Jigheh. "Performance Evaluation of the Screw Nailed Walls in Tabriz Marl." *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 7(1) (2021) 1-15.
- [5] FSI. "Technical manual: helical piles and anchors, hydraulically driven push piers, polyurethane injection & supplemental support systems." second ed. Omaha: Foundation Support Works (2014).
- [6] N-J. Yoo, K-S. Yoo, J. Kim. "Model Tests of Soil Nailing System under Surcharges." *Journal of Industrial Technology* 14 (1994) 77-87.
- [7] G. Zhang, J. Cao, and L. Wang. "Failure behavior and mechanism of slopes reinforced using soil nail wall under various loading conditions." *Soils and Foundations* 54(6) (2014) 1175-1187.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Yazdandoust, S. Yadegari, *Investigation on the performance of walls reinforced by helical nails under strip footing loading using physical model test, Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(12) (2024) 531-534.

DOI: 10.22060/ceej.2024.21978.7869





بررسی عملکرد دیوارهای مسلح شده با میخ‌های مارپیچی تحت بارگذاری پی نواری با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی

مجید یزدان دوست^{۱*}، سمانه یادگاری^۲

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

۲- دانشکده عمران، هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۱۰/۱۵

کلمات کلیدی:

دیوار میخکوبی شده
میخ مارپیچی
سطح گسیختگی
مدل فیزیکی
بارگذاری قائم

خلاصه: میخ‌های مارپیچی یکی از انواع المان تسلیح است که در راستای رفع معایب میخ‌های تزریقی معرفی شده است. به دلیل نوظهور بودن میخ‌های مارپیچی و محدود بودن مطالعات انجام شده جهت شناخت کافی و دقیق از عملکرد سیستم‌های مسلح شده با این نوع از میخ‌ها و عدم وجود دستورالعمل‌های مستقل در این زمینه، ضروریست تا با گسترش مطالعات کاربردی بر روی رفتار سیستم‌های مسلح شده با میخ‌های مارپیچی، بستری مناسب جهت تدوین دستورالعمل‌های لازم برای تحلیل و طراحی این سیستم نوظهور فراهم شود. برای دستیابی به این هدف، در مطالعه حاضر به بررسی تأثیر زاویه، طول، چیدمان و آرایش طولی میخ‌ها بر عملکرد دیوارهای مسلح شده با میخ‌های مارپیچی تحت بارگذاری یک پی نواری پرداخته شده است. به این منظور تعدادی آزمایش بارگذاری سطحی بر روی مدل‌های فیزیکی با مقیاس ۱:۱۰ و در شرایط ۱ g انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که زاویه ۱۵ درجه می‌تواند به عنوان زاویه بهینه برای اجرای میخ‌های مارپیچی معرفی شود. از سوی دیگر مشاهده شد که افزایش یکنواخت طول میخ در امتداد ارتفاع دیوار و همچنین استفاده از زاویه ۱۵ درجه برای نصب میخ‌های مارپیچی باعث کاهش عمق نفوذ سطح گسیختگی و ابعاد گوه گسیختگی می‌شود. همچنین مشاهده شد که افزایش ظرفیت باربری پی نواری، به تعویق انداختن گسیختگی و همچنین کاهش جابجایی‌های جانبی دیواره از مزایای استفاده از میخ‌های مارپیچی به جای میخ‌های تزریقی می‌باشد.

استفاده از این نوع میخ جهت پایدار سازی دیوارهای حائل مربوط به یک

دیوار با ارتفاع ۷/۶ متر در سال ۱۹۹۶ می‌باشد.

گسترش روزافزون استفاده از میخ‌های مارپیچی جهت تسلیح سازه‌های ژئوتکنیکی در حوزه‌های مختلف، لزوم شناخت عملکرد این سیستم را در شرایط مختلف مسجل می‌سازد. این در حالی است که به دلیل نوظهور بودن این روش تسلیح، علی‌رغم مزایا و کارایی قابل توجه آن، تاکنون تحقیقات قابل ملاحظه‌ای جهت دستیابی به شناختی جامع از رفتار سیستم‌های مسلح شده با میخ‌های مارپیچی صورت نپذیرفته است، بطوریکه قسمت عمده مطالعات صورت گرفته تنها به بررسی ظرفیت بیرون کشیدگی میخ‌ها محدود می‌گردد.

در راستای بررسی رفتار اندرکنشی مهارهای مارپیچی در خاک ماسه‌ای، قالی^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۰ به انجام یک سری مطالعات تئوری و آزمایشگاهی پرداختند. در این مطالعات ۵۶ آزمایش بیرون کشیدگی بر روی ۵ مدل از مهارهای نصب شده در خاک ماسه‌ای خشک با سه وضعیت

۱- مقدمه

افزایش ساخت و ساز در مناطق شهری و لزوم احداث گودبرداری در مجاورت سازه‌های موجود و همچنین توسعه راه‌ها به ویژه در مناطق کوهستانی، لزوم استفاده از سازه‌های نگهدارنده جهت تأمین پایداری و کنترل تغییر شکل‌ها را مسجل می‌سازد. صرفه اقتصادی و سرعت اجرای بالا، قابلیت نصب در لایه‌های واقع شده در زیر جریان آب‌های زیرزمینی، امکان استفاده جهت پایدارسازی توده‌های ریزشی به دلیل سرعت نصب بالا و همچنین قابلیت اجرا در خاک‌هایی با نفوذپذیری بالا که امکان تزریق وجود ندارد، سبب شده است تا استفاده از میخ‌های مارپیچی به عنوان یک گزینه مناسب و کارآمد جهت پایدارسازی توده خاک برجا مطرح گردد. این سیستم برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ در فرانسه به منظور توسعه خطوط راه آهن توسط شرکت‌های سولتانکه^۱ و بویگس^۲ به کار گرفته شد. همچنین، اولین

- 1 Soletanche
- 2 Bouygues

3 Ghaly

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: M.yazdandoust@qom.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



چسبنده پرداختند. آنها نشان دادند مکانیزم گسیختگی اطراف میخ که رفتار بیرون کشیدگی را کنترل می کند، در این دو گروه از میخ‌ها متفاوت می باشد بطوریکه منحنی بار-جابجایی میخ‌های تزریقی قبل از رسیدن به ظرفیت نهایی، یک نقطه بیشینه را تجربه می کنند. این در حالی است که ظرفیت بیشینه و نهایی در میخ‌های ماریپیچی بر هم منطبق می باشند. از سوی دیگر، تایج نشان داد که تأثیر فشار سربار بر میخ‌های ماریپیچی به مراتب بیشتر از میخ‌های تزریقی است [۵]. بررسی عددی پاسخ نیروی بیرون کشیدگی میخ‌های ماریپیچی توسط راوات و کومار^۶ با استفاده از نرم افزار پلکسیس^۷ دو بعدی انجام شد. مدلسازی در این تحقیق بر اساس تقارن محوری انجام و سطوح گسیختگی برای آرایش‌های مختلف میخ و همچنین مکانیزم نیروی بیرون کشیدگی تحت شرایط بارگذاری افقی مورد بحث قرار گرفت. مشاهدات نشان داد که با افزایش قطر و تعداد صفحات ماریپیچی و همچنین کاهش فاصله این صفحات، نیروی بیرون کشیدگی نهایی افزایش می یابد. همچنین مشاهده شد در صورت استفاده از تقارن محوری در شبیه سازی المان محدود، پاسخ میخ‌های ماریپیچی شبیه رفتار بیرون کشیدگی عمودی شمع‌ها و مهارهای ماریپیچی می باشد. لذا در صورت موجود نبودن مدل عددی میخ‌های ماریپیچی می توان از نتایج شبیه سازی مهارها یا شمع‌های ماریپیچی استفاده نمود [۶]. در مطالعه‌ای مشابه، راوات^۸ و همکاران با بررسی ۶۷ نمونه در نرم افزار سه بعدی المان محدود آباکوس^۹، به پیش بینی رفتار بیرون کشیدگی میخ‌ها پرداختند. صفحات ماریپیچی میخ‌ها بین یک تا چهار عدد متغیر بوده و مشخصه‌های تغییر مکان-بار نیروی بیرون کشیدگی، تنش‌ها در پیرامون میخ‌ها و مکانیزم گسیختگی در حین بیرون کشیدگی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش صفحات ماریپیچی، نیروی بیرون کشیدگی بیشتری در میخ بسیج خواهد شد و همچنین رفتار بیرون کشیدگی میخ‌ها با تغییر نسبت فاصله صفحات ماریپیچی بحرانی و نسبت قطرها بحرانی، دستخوش تغییرات قابل ملاحظه‌ای خواهند شد [۷]. محمودی مهریزی^{۱۰} و همکاران با انجام یکسری آزمایش بیرون کشیدگی نشان دادند که با تزریق دوغاب سیمان اطراف میخ‌های ماریپیچی، ظرفیت بیرون کشیدگی آنها تا ۴۵٪ افزایش می یابد [۸].

یکی از این معدود مطالعات انجام شده بر روی دیوارهای میخ کوبی شده

تراکمی (سفت، متوسط و سست) انجام شد. نتایج نشان داد که مکانیزم گسیختگی و ظرفیت بیرون کشیدگی با تغییر عمق نصب مهار و زاویه اصطکاک داخلی ماسه دستخوش تغییر می شوند. براساس نتایج بدست آمده، معادله‌ای ساده جهت تعیین نیروی بسیج شده در مهارها بر حسب ضریب فشار مقاوم خاک پیشنهاد شد. آنها همچنین با استفاده از یک مدل ریاضی مبتنی بر روش تعادل حدی، به تخمین مکانیزم گسیختگی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی پرداختند [۱]. در مطالعه‌ای دیگر، تسوها^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از آزمایشات بیرون کشیدگی در مدل سانتیفریوژ به بررسی تأثیر صفحات ماریپیچ بر ظرفیت بیرون کشیدگی مهارهای ماریپیچی پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که ظرفیت بیرون کشیدگی مهار ماریپیچ به طور معمول با تعداد صفحات ماریپیچ افزایش می یابد بطوریکه این افزایش با میزان به هم خوردگی ناشی از نصب مهار تغییر می کند. به عبارت دیگر، به دلیل عبور تمامی صفحات میخ از محدوده ورودی میخ به خاک، به هم خوردگی ناشی از نصب مهار به طور کلی در صفحات انتهایی نسبت به صفحات نزدیک به نوک مهار برجسته تر است [۲]. در مطالعه‌ای مشابه که در سال ۲۰۱۳ توسط وانگ^۲ و همکارانش انجام شده، رفتار بیرون کشیدگی مهارهای ماریپیچی در رس زهکشی نشده به وسیله آزمایش مدل سانتیفریوژ مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، ۹ مدل از مهارها با تعداد و فواصل صفحات و همچنین طول متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و از نتایج بدست آمده جهت شبیه سازی عددی مهارها استفاده شد و در نهایت با در نظر گرفتن اثر همزمان طول مهار و فاصله صفحات ماریپیچی و مقاومت خاک، ظرفیت بیرون کشیدگی مهارهای ماریپیچی در قالب یک معادله ریاضی پیشنهاد شد [۳]. بررسی رفتار بیرون کشیدگی گروه مهارهای ماریپیچی در سال ۲۰۱۴ توسط میتال^۳ و موکرجی^۴ انجام شده. بر اساس این آزمایشات مشاهده شد که ظرفیت بیرون کشیدگی به طور قابل توجهی با افزایش عمق قرارگیری مهار، تعداد مهارهای ماریپیچ و تعداد صفحات ماریپیچ، افزایش می یابد. از سوی دیگر، بر اساس روابط بار-جابجایی بدست آمده برای همه گروه‌ها، نمودار ظرفیت بیرون کشیدگی نهایی گروه مهارها رسم و معادلات طراحی برای هر گروه از مهارها بر اساس ظرفیت بیرون کشیدگی نهایی یک مهار پیشنهاد شد [۴]. در سال ۲۰۱۶ تخی^۵ و همکاران با استفاده از آزمایشات سانتیفریوژ به مقایسه رفتار بیرون کشیدگی میخ‌های ماریپیچی و میخ‌های تزریقی در خاک‌های غیر

6 Rawat and Kumar

7 Plaxis

8 Rawat

9 Abaqus

10 Mahmoudi-Mehrzi

1 Tsuha

2 Wang

3 Mittal

4 Mukherjee

5 Tokhi

۶ متری با فواصل میخ‌گذاری افقی و قائم برابر با ۲ و ۱/۵ متر به عنوان مدل اصلی جهت شبیه سازی مدل مقیاس شده در نظر گرفته شد. این فواصل بر اساس آیین نامه FSI انتخاب شد [۱۵]. با توجه به محدودیت‌های دستگاه مدل فیزیکی، ۱:۱۰ به عنوان ضریب مقیاس انتخاب و با تکیه بر قوانین مقیاس (جدول ۱) و همچنین استفاده از نتایج آزمایشات مقیاس کامل، تمامی اجزاء دیوارهای میخکوبی شده (المانهای میخ و رویه) شبیه سازی شد. با استفاده از اجزاء شبیه سازی شده دیوار در مقیاس ۱:۱۰، ۱۶ مدل دیوار میخکوبی شده با ارتفاع ۰/۶ متر ساخته شد. همانطور که در جدول ۲ نیز اشاره شده است، چیدمان هندسی، آرایش طولی، زاویه و طول میخ‌ها نیز به عنوان متغیر در ساخت این مدلها مد نظر قرار گرفت. برای این منظور، در محدوده‌های توصیه شده توسط آیین نامه FSI، طول میخ‌ها برابر با 0.5H و 0.7H، زاویه نصب آنها ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه، چیدمان نصب میخ‌ها به شکل مربعی و شطرنجی و همچنین آرایش طولی آنها یکنواخت و غیر یکنواخت (پله‌ای) در نظر گرفته شد [۱۵]. علاوه بر آن، بمنظور کنترل پایداری مدلها، ضرایب اطمینان هر مدل براساس روش تعادل حدی تعیین شد. مقادیر بدست آمده نشان داد که حداقل ضریب اطمینان مربوط به پایداری داخلی بود و مدلها نیز از پایداری مناسب برخوردارند. این ضرایب در محدوده ۱/۲۵ تا ۱/۹ تعیین شد. جهت نامگذاری مدلها از یک شناسه سه جزئی استفاده شد که بخش اول آن نشان دهنده چیدمان هندسی میخ‌ها، بخش دوم نشان دهنده زاویه نصب و بخش سوم به چیدمان طولی میخ‌ها اشاره دارد. پس از ساخت مدلها، با شبیه سازی بار ناشی یک پی نواری واقع بر تاج دیوار بواسطه یک اکچویاتور الکترومکانیک، اقدام به بارگذاری و تعیین پاسخ مدلها در قالب جابجایی افقی دیوار، جابجایی قائم خاکریز، توزیع فشار افقی وارد بر رخپوش، رفتار بار-نشست پی و مکانیزم گسیختگی مدلها شد. این نوع بارگذاری می‌تواند مشابه شرایط یک کوله پل میخکوبی شده و یا اجرای همزمان دو گود برداری در کنار هم با اعماق مختلف باشد.

۳- آماده سازی مدل‌های فیزیکی

از آنجا که خاک، میخ و رخپوش به عنوان سه جزء اصلی در دیوارهای میخکوبی شده محسوب می‌شوند، فرایند شبیه سازی هر یک از این اجزاء در مقیاس کوچک می‌بایستی با تکیه بر روابط دقیق مقیاس و صرف دقت نظر کافی انجام گیرد. در خلال این فرایند، پارامترهای شاخص هر یک از این سه جزء در مقیاس کامل به عنوان مرجع اصلی انتخاب و سپس با انجام آزمایشات مربوطه، اجزاء در مقیاس کوچک به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که

با میخ‌های ماریپچی توسط دیردروف^۱ و همکاران انجام شد. آنها دریافتند که بسیج نیرو در میخ‌های ماریپچی در محدوده‌ی آیین‌نامه می‌باشد [۹]. در پژوهشی دیگر که توسط شارما^۲ و همکاران [۱۰] انجام شد، مشخص گردید که با افزایش زاویه‌ی نصب میخ‌ها و نسبت گام ماریپچ‌ها به قطر آن پایداری لرزه‌ای سیستم مسلح شده با میخ‌های ماریپچی کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ی مشابه، مولائی و همکاران [۱۱] نشان دادند که استفاده از نصب میخ بصورت زاویه‌دار راه حلی کارآمد جهت کاهش جابجایی جانبی و بزرگنمایی شتاب و همچنین افزایش فرکانس طبیعی دیوارهای میخکوبی شده با میخ‌های ماریپچی است. زاهدی و همکاران [۱۲] با استفاده از مدل‌سازی عددی نشان دادند که میخ‌های ماریپچی نسبت به میخ‌های تزریقی تأثیر بیشتری بر کاهش جابجایی دیوار دارد، به ویژه در طی عملیات حفاری این اثرات مثبت نمایان تر است. محمودی مهریزی^۳ و همکاران [۱۳] در یک سری آزمایش مدل فیزیکی نشان دادند که چیدمان و تعداد صفحات ماریپچ نسبت به تعداد میخ‌ها اثر بیشتری بر افزایش ظرفیت باربری فونداسیون واقع شده به روی دیوارهای سیستم مسلح شده با میخ‌های ماریپچی دارد.

با توجه به موارد فوق‌الذکر، مشاهده می‌شود که اکثر مطالعات انجام شده در حوزه میخ‌های ماریپچی، تنها به بررسی رفتار بیرون کشیدگی این میخ‌ها محدود می‌شود. این امر سبب شده است که تاکنون شناختی کافی از عملکرد سیستم‌های مسلح شده با میخ‌های ماریپچی جهت تدوین دستورالعمل‌های مستقل حاصل نشود. از اینرو، تحلیل و طراحی این سیستم همچنان بر اساس آیین‌نامه‌های مربوط به میخ‌های تزریقی صورت می‌گیرد [۱۴]. این در حالی است که عدم تطابق میان عملکرد سیستم‌های مسلح شده با میخ‌های تزریقی و میخ‌های ماریپچی، صحت استفاده از دستورالعمل‌های مربوط به میخ‌های تزریقی را جهت بکارگیری در میخ‌های ماریپچی در حاله‌ای از ابهام قرار می‌دهد. لذا در این تحقیق تلاش شده است تا با انجام یکسری آزمایش بارگذاری سطحی بر روی دیوارهای مسلح شده با میخ‌های ماریپچی، گامی موثر در توسعه شناخت این سیستم برداشته شود.

۲- برنامه آزمایش‌ها

در این تحقیق، با استفاده از مدلسازی فیزیکی در شرایط g ۱، عملکرد دیوار میخکوبی شده با چیدمان‌های مختلف از میخ‌های ماریپچی تحت بارگذاری پی نواری مورد بحث و بررسی قرار گرفت. بدین منظور، یک دیوار

- 1 Deardorff
- 2 Sharma
- 3 Mahmoudi-Mehrizi

جدول ۱. روابط مقیاس

Table 1. Similitude rules

ضریب مقیاس	نماد	پارامتر
1	ρ	وزن مخصوص
N	L	طول
N	σ	تنش
$N^{1-\alpha}$	ϵ_s	کرنش خاک
N^α	E	سختی خاک
$N^{2-\alpha}$	Δx	جابجایی
N^3	F	نیرو
N^3	M	مقاومت خمشی در واحد عرض
1	ϵ_r	کرنش المان تسلیح
N	E_s	سختی کششی المان تسلیح
N^3	R_p	ظرفیت بیرون کشیدگی المان تسلیح

A: ۰/۵ برای خاکهای غیر چسبنده

جدول ۲. مشخصات مدل‌های مورد استفاده

Table 2. Configuration of wall models

شناسه مدل	چیدمان هندسی میخ‌ها	زاویه میخ	L_{Up}	L_{Down}	h	
					سطح فوقانی	سطح تحتانی
$Sq-0^\circ-0.5H$		0°				$H/2$
$Sq-15^\circ-0.5H$		15°	$0.5H$	$0.5H$		$3H/8$
$Sq-30^\circ-0.5H$	مختلط	30°				$5H/8$
$Sq-0^\circ-0.7H$		0°				$3H/4$
$Sq-15^\circ-0.7H$		15°	$0.7H$	$0.7H$		$5H/8$
$Sq-30^\circ-0.7H$		30°				$3H/4$
$St-0^\circ-0.5H$		0°				$3H/4$
$St-15^\circ-0.5H$		15°	$0.5H$	$0.5H$		$5H/8$
$St-30^\circ-0.5H$	مختلط	30°				$3H/4$
$St-0^\circ-0.7H$		0°				H
$St-15^\circ-0.7H$		15°	$0.7H$	$0.7H$	$5H/8$	$3H/4$
$St-30^\circ-0.7H$		30°				H
$Sq-0^\circ-0.7H\sim 0.5H$	مختلط	0				$5H/8$
$Sq-15^\circ-0.7H\sim 0.5H$		15				$3H/8$
$St-0^\circ-0.7H\sim 0.5H$	مختلط	0				$3H/4$
$St-15^\circ-0.7H\sim 0.5H$		15				$5H/8$

L_{up} : طول میخ واقع در نیمه فوقانی مدل

L_{down} : طول میخ واقع در نیمه تحتانی مدل

h : پارامتر مورد استفاده در روابط ۳ و ۴ جهت تعیین هندسه سطح گسیختگی

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی توده خاک

Table 3. Physical and mechanical properties of soil

مشخصات	مقدار
اندازه متوسط D_{50} [mm]	0.285
ضریب یکنواختی C_u	2.655
ضریب انحنای C_c	1.147
نسبت منافذ بیشینه e_{max}	0.786
نسبت منافذ کمینه e_{min}	0.571
چگالی ذرات جامد	2.66
حد خمیری PL [%]	27
دامنه خمیری PI [%]	11.5
وزن مخصوص خشک γ_d [kN/m ³]	15.84
چسبندگی c [kPa]	4
زاویه اصطکاک بیشینه ϕ_p [°]	41-45
زاویه اصطکاک نهایی ϕ_u [°]	35-37
زاویه اتساع ψ [°]	5-7

روابط مقیاس ارضاء گردند [۱۶].

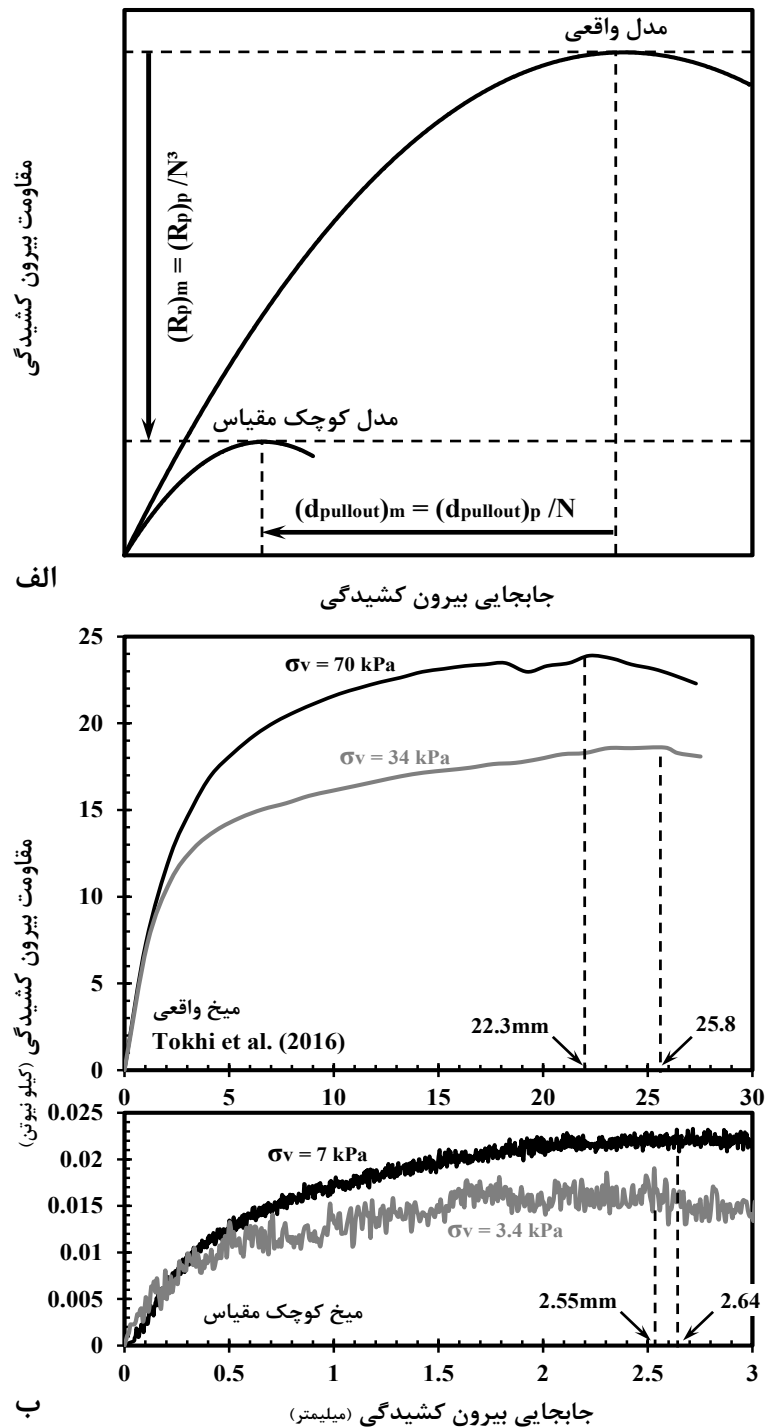
از آنجا که اجرای میخ‌های مارپیچی تنها در غیاب ذرات درشت خاک امکان‌پذیر است و شکل‌گیری فشار مقاوم در پشت صفحات مارپیچ به طور مستقیم از زاویه اصطکاک خاک نشأت می‌گیرد، کاربرد این نوع میخ معمولاً محدود به خاک‌های دانه‌ای فاقد ذرات درشت می‌شود. از اینرو، در پژوهش حاضر از یک ماسه سیلت دار با تراکم نسبی ۶۰٪ استفاده شد. خاک مورد استفاده، ترکیبی از ماسه ۱۶۱ و سیلت فیروزکوه می‌باشد که با درصد رطوبت ۶٪ مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی این خاک در جدول ۳ ارائه شده است.

به منظور انتخاب المان‌های میخ با مقیاس ۱:۱۰، مقاومت کششی و ظرفیت بیرون کشیدگی^۱ به عنوان دو معیار اصلی انتخاب شد. از معیار مقاومت کششی جهت تعیین سطح مقطع و جنس شفت میخ مارپیچی و از ظرفیت بیرون کشیدگی جهت انتخاب قطر و فواصل صفحات میخ کوچک مقیاس استفاده شد. در این راستا، با استناد بر نتایج گزارشات ارائه شده توسط تخی و همکاران در خصوص آزمایشات بیرون کشیدگی بر روی میخ‌های

واقعی و همچنین انجام یکسری آزمایش بیرون کشیدگی بر روی میخ‌های مارپیچی کوچک مقیاس، کوشش شده تا ضمن ارضاء قوانین مقیاس، بهترین جایگزین میخ‌های واقعی در مقیاس ۱:۱۰ انتخاب شود. روابط مقیاس و نتایج آزمایشات بیرون کشیدگی گزارش شده توسط تخی و همکاران و همچنین آزمایشات بیرون کشیدگی کوچک مقیاس در شکل ۱ ارائه شده است. از سوی دیگر، با توجه به لزوم کاهش ۱۰ برابری مقاومت کششی المان‌های تسلیح در مدل‌های کوچک مقیاس با ضریب مقیاس ۱:۱۰، از فسفربرنز جهت ساخت شفت المان‌های میخ استفاده شد [۱۷]. مشخصات المان میخ کوچک مقیاس در جدول ۴ ارائه شده است.

فرایند شبیه سازی المان رخ پوش نیز همانند شبیه سازی المان میخ انجام شد با این تفاوت که در این فرایند، مقاومت خمشی به عنوان معیار اصلی شبیه سازی در نظر گرفته شد. در این راستا، با در نظر گرفتن روابط مقیاس حاکم بر ظرفیت خمشی و همچنین انجام آزمایشات خمش بر روی یک رخ‌پوش واقعی و رخ‌پوش‌های کوچک مقیاس، طرح اختلاط مورد نیاز جهت ساخت رخ‌پوش با مقیاس ۱:۱۰ تعیین شد. روابط مقیاس حاکم بر ظرفیت خمشی، نتایج آزمایشات خمش و همچنین مشخصات رخ‌پوش

1 Pull-out resistance



شکل ۱. الف) روابط مقیاس ظرفیت بیرون کشیدگی [۱۰]، ب) نتایج آزمایشات بیرون کشیدگی بر روی میخ‌های واقعی و کوچک مقیاس

Fig. 1. (a) Similitude rules for pull-out; (b) the results of pull-out tests on real and reduced-scale helical nails

جدول ۴. پارمترهای فیزیکی میخ‌های مایچی با مقیاس ۱:۱۰

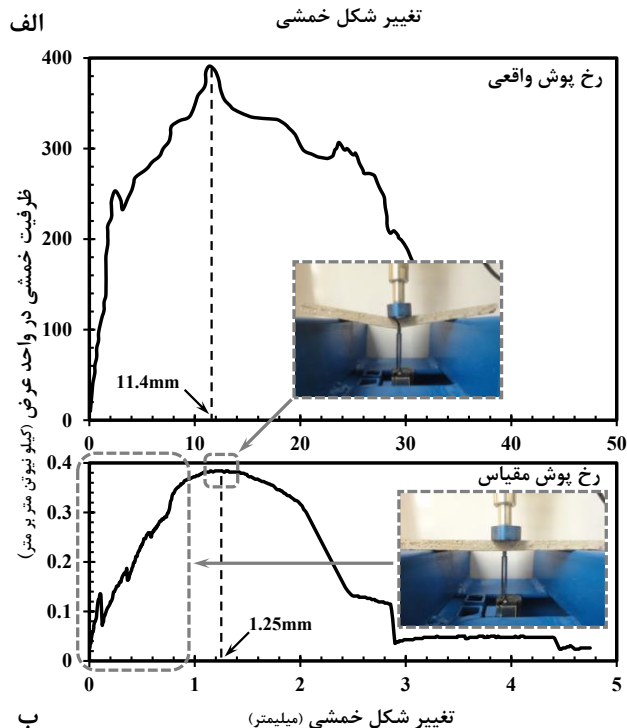
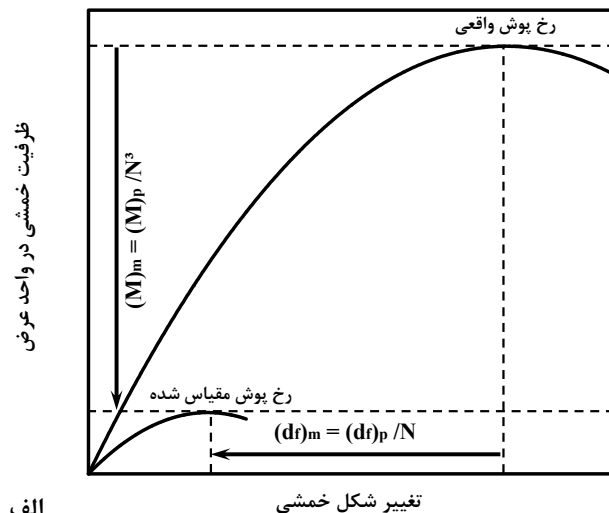
Table 4. Physical properties of reduced-scale helical nail

واحد	مقدار	پارامتر
mm	۲/۵	قطر شفت
mm	۱۰	قطر صفحات
mm	۱	ضخامت صفحات
mm	۳۳	فاصله صفحات

جدول ۵. پارمترهای فیزیکی رخ‌پوش با مقیاس ۱:۱۰

Table 5. Physical properties of reduced-scale facing

واحد	مقدار	پارامتر
mm	۱۰	ضخامت رویه
mm	۰/۸	قطر مفتول مش
mm	۱۰	ابعاد چشمه مش
---	۰/۵	نسبت آب به مصالح سیمانی
---	۰/۲	نسبت سیلت به سیمان
Kg/m ³	۳۰۰	عیار سیمان
Kg/m ³	۱۵۵۰	عیار ماسه ۱۰۱



شکل ۲. الف) روابط مقیاس حاکم بر ظرفیت خمشی، ب) نتایج آزمایشات خمش بر روی رخ‌پوش واقعی و کوچک مقیاس

Fig. 2. (a) Similitude rules for flexural strength; (b) the results of pull-out tests on real and reduced-scale facing

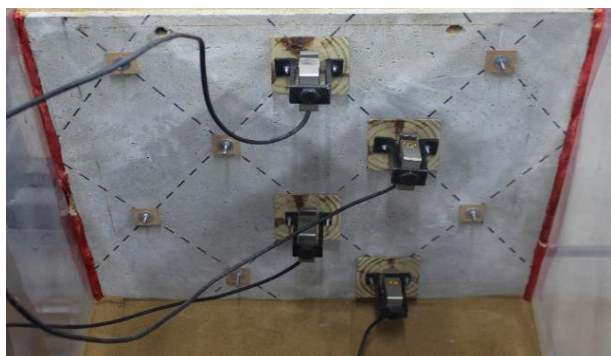
۳-الف مشاهده می‌شود، این قاب مهارتی که توسط ۴ بازو به جعبه آزمایش متصل می‌شود، با در برگرفتن رخ‌پوش، امکان اجرای خاکریز و شرایط سکون^۱ را برای آن فراهم می‌ساخت. پس از اجرای لایه به لایه خاکریز به روش تراکم مرطوب در پشت رخ‌پوش و تکمیل آن، میخ‌ها بوسیله یک دریل و با کمک یک بازوی متحرک درون خاکریز هدایت می‌شدند. این بازو که

مقیاس شده به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۵ ارائه شده است. پس از تهیه اجزاء اصلی مدل، ساخت مدل‌ها مطابق با فرایند واقعی اجرای دیوارهای مسلح شده با میخ‌های ماریچی انجام شد. بدین منظور، ابتدا خاکریز با استفاده از یک قاب مهارتی درون جعبه آزمایش به ابعاد ۹۰×۱۲۰×۶۰ سانتیمتر اجرا و سپس میخ‌ها توسط یک دریل با گشتاور و سرعت کالیبره شده درون خاکریز نصب می‌شدند. همانطور که در شکل

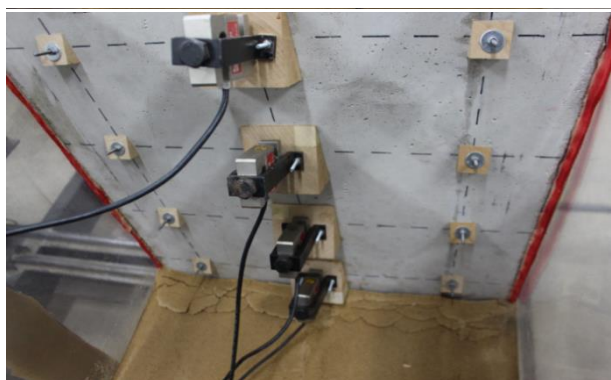
1 At rest



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳. الف) نحوه نصب میخ، ب) نمایی از چیدمان شطرنجی، ج) نمایی از چیدمان مربعی

Fig. 3. (a) The installation process of helical nails; (b) the picture of staggered arrangement; (c) the picture of square arrangement

در شکل ۳-الف نیز مشاهده می‌شود، بگونه‌ای طراحی شده بود که علاوه بر قابلیت نصب در نقاط مختلف رخ‌پوش، قابلیت هدایت میخ‌ها با زوایای مختلف را نیز فراهم می‌ساخت. لذا با استفاده از این قابلیت، میخ‌ها در دو چیدمان مربعی و شطرنجی و همچنین سه زاویه ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه اجرا شدند. پس از نصب تمامی میخ‌ها و اتصال آنها به رخ‌پوش توسط واشر و مهره مناسب، در انتها با رهاسازی بازوهای قاب مهاری از بالا به پایین، فرایند خاکبرداری و تشکیل حالت فعال^۱ در سیستم شبیه سازی می‌شد. نمایی از چیدمان شطرنجی و مربعی بترتیب در شکل ۳-ب و ۳-ج نشان داده شده است.

پس از تکمیل هر یک از مدل‌های فیزیکی با پیکربندی مدنظر، با استفاده از یک صفحه فلزی طولی به عرض و ضخامت ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر که در فاصله ۵۰ میلی‌متری از تاج دیوار واقع شده بود، اقدام به بارگذاری مونوتونیک دیوار با سرعت ۱ mm/min شد (شکل ۴-الف). این سرعت به عنوان یک سرعت متداول جهت بارگذاری مونوتونیک در خاکهای دانه‌ای غیر اشباع مطرح می‌باشد [۱۲، ۱۸ و ۱۹]. صفحه فلزی مورد استفاده جهت بارگذاری شرایط یک پی نواری به عرض ۱ متر را در فاصله ۰/۵ متری از تاج دیوار واقعی شبیه‌سازی می‌نمود.

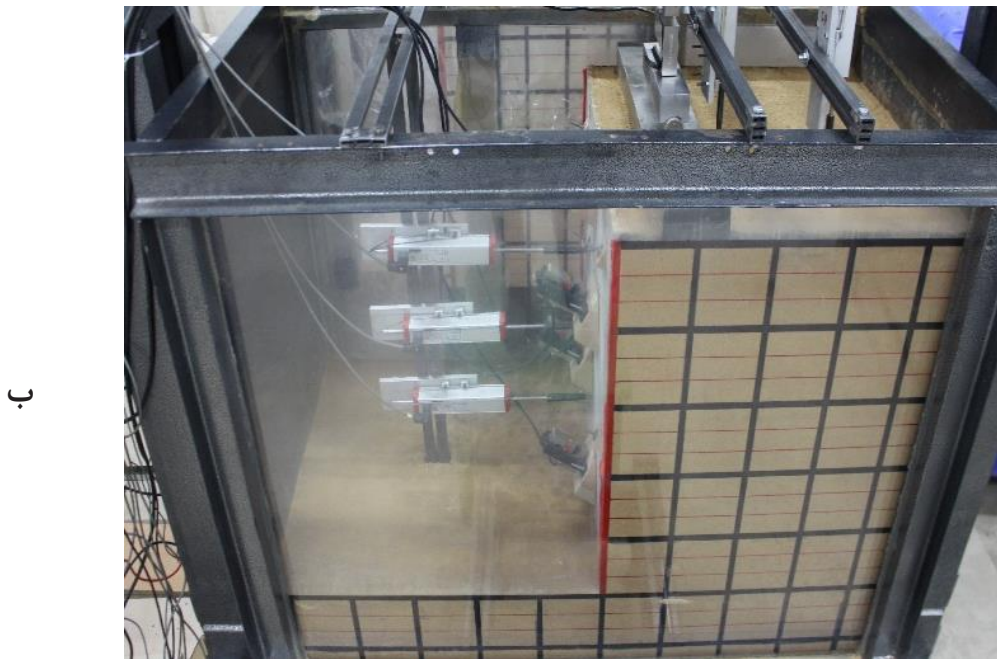
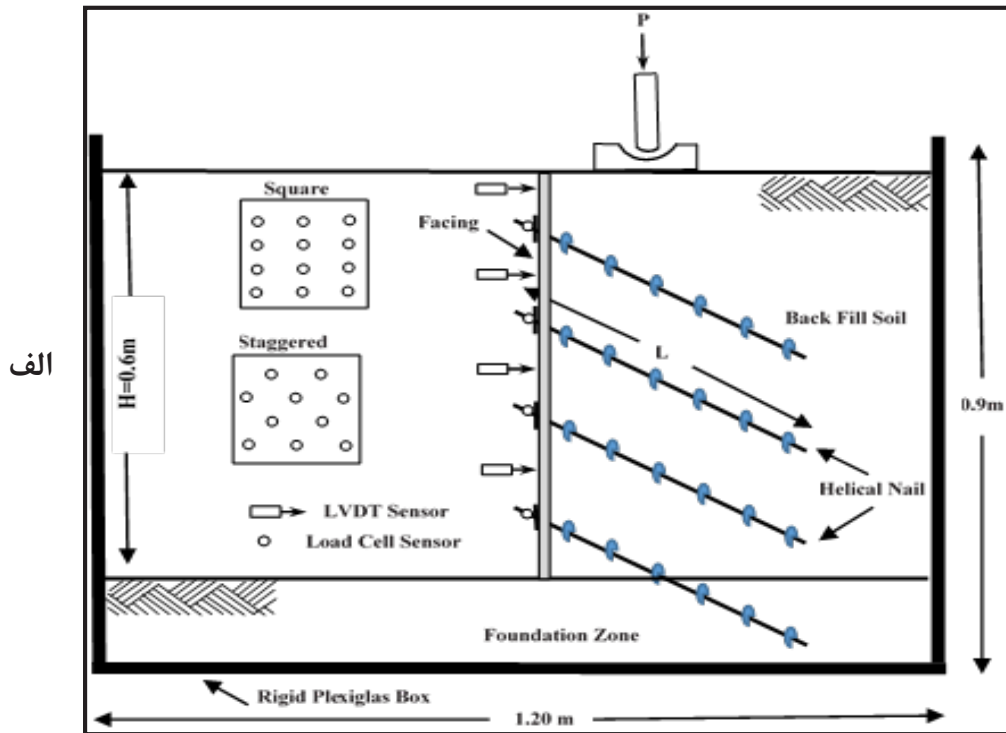
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تغییر شکل‌های افقی دیوار با بهره‌گیری از ۴ عدد جابجایی‌سنج نصب شده در ارتفاعهای مختلف رخ‌پوش و نیروی بسیج شده در سر میخ‌ها به واسطه ۴ عدد نیروسنج نصب شده بر روی رخ‌پوش در طول بارگذاری قرائت شد.

۴- ارائه نتایج و تفسیر داده‌ها

بمنظور بررسی تأثیر چیدمان هندسی، آرایش طولی، زاویه و طول میخ‌ها بر عملکرد دیوار میخ‌کوبی شده، پاسخ مدل‌ها به بارگذاری پی نواری در قالب رفتار بار-نشست پی، جابجایی افقی دیوار، جابجایی قائم خاکریز، نیروی بسیج شده در سر میخ‌ها و همچنین مکانیزم گسیختگی مدل‌ها بطور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

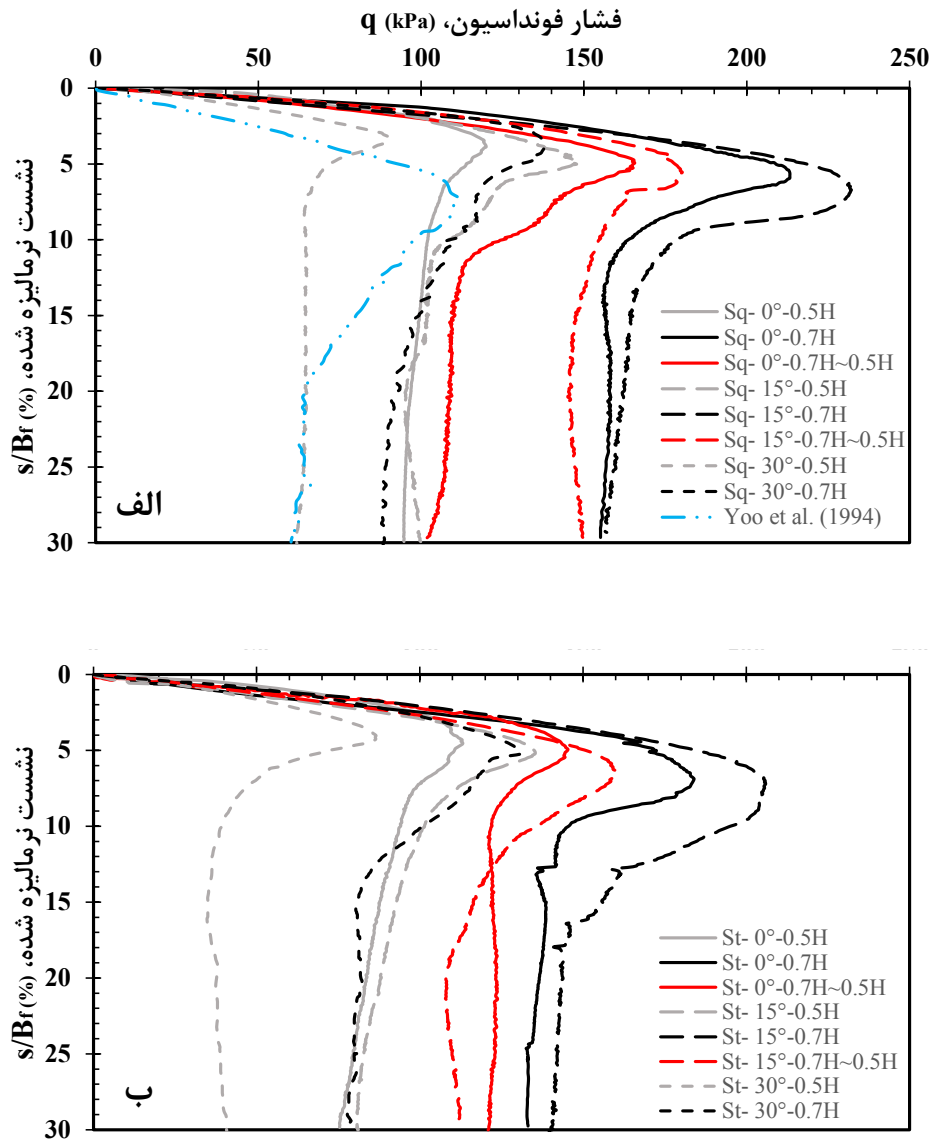
۴-۱ رفتار بار-نشست پی نواری

رفتار بار-نشست پی واقع بر دیوارهای میخ‌کوبی شده با چیدمان هندسی، زاویه و طول میخ مختلف در شکل ۵ ارائه شده است. اولین نکته قابل توجه در رفتارهای بار-نشست ارائه شده در شکل ۵، نیاز به نشست‌های قابل توجه جهت شکل‌گیری مکانیزم باربری و وقوع ظرفیت باربری بیشینه در مدل‌ها



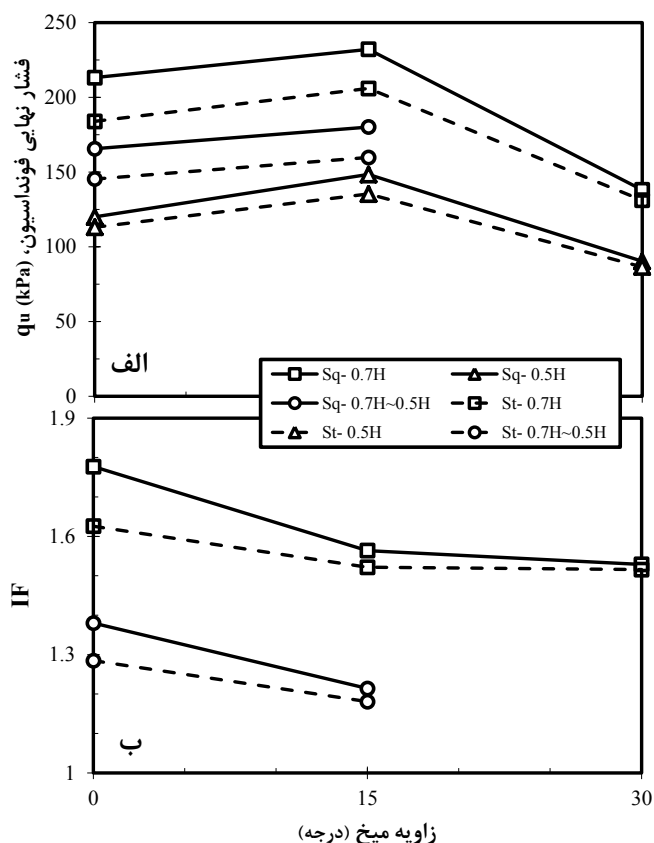
شکل ۴. (الف) شمای شماتیک از هندسه و ابزار گذاری مدل؛ (ب) نمای دیوار میخکوبی شده کوچک مقیاس

Fig. 4. (a) The picture of instrumentation and medel geometry; (b) the pictute of completed medel



شکل ۵. نمودارهای بار- نشست مربوط به دیوار میخکوبی شده با چیدمان: (الف) مربعی؛ (ب) شطرنجی

Fig. 5. Pressure-settlement relationships for HSNWs with: (a) a square pattern; (b) a staggered pattern



شکل ۶. تغییرات: (الف) ظرفیت باربری نهایی پی؛ (ب) ضریب بهبود ظرفیت باربری در مقابل زاویه نصب میخ

Fig. 6. Variation of (a) ultimate bearing capacity and (b) bearing capacity improvement factor (IF) versus nail inclination

بسیاری در عملکرد پی قرار گرفته بر روی آن دارند. وابستگی IF به زاویه نصب میخ نکته دیگری است که از شکل ۶-ب می‌توان دریافت. تغییرات IF در مقابل α نشان می‌دهد که بهبود ظرفیت باربری پی به دلیل افزایش طول میخ با افزایش زاویه میخ‌های ماریپیچی کاهش می‌یابد. این کاهش که در هر دو آرایش میخ مشاهده شد، در الگوی مربعی مشهودتر است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش زاویه میخ به تدریج اثر الگوی میخ را بر بهبود ظرفیت باربری کاهش می‌دهد تا جایی که این اثر در دیوارهای مسلح شده با میخ‌های ماریپیچی با زاویه ۳۰ درجه تقریباً ناپدید می‌شود.

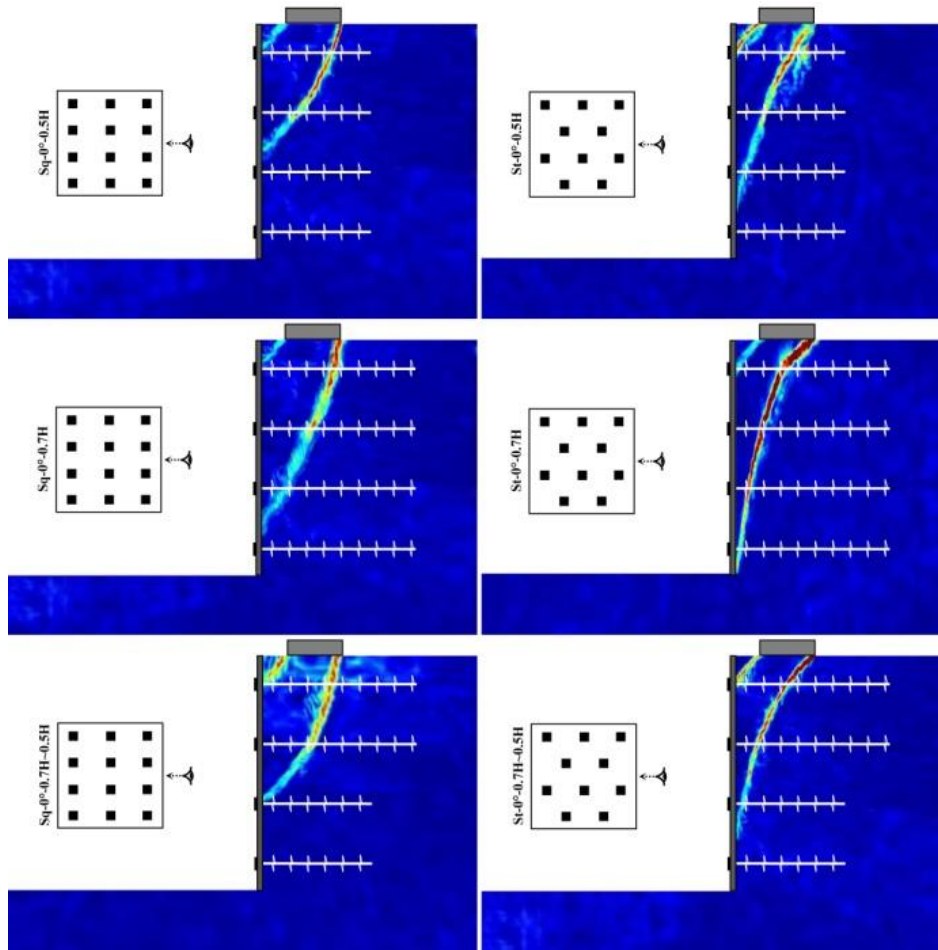
از سوی دیگر، مقایسه منحنی‌های بار-نشست برای دیوارها با چیدمان‌های هندسی مختلف میخ نشان می‌دهد که استفاده از یک الگوی چیدمان برای نصب میخ‌های ماریپیچ نه تنها ظرفیت باربری نهایی پی را افزایش می‌دهد، بلکه نشست مورد نیاز برای رسیدن به شکست $(s/B)_r$ را نیز کاهش داد.

می‌باشد. این پدیده را می‌توان به عدم امکان مقیاس رو به پایین اندرکنش بین خاک و پی در مدل‌های کوچک مقیاس دانست [۱۸ و ۱۹]. همانطور که مشاهده می‌شود، در تمامی مدل‌ها یک رفتار نرم شونده پس از تجربه فشار بیشینه (q_u) شکل می‌گیرد. این نرم شونده‌گی که توسط یو^۱ و همکاران نیز برای دیوارهای مسلح شده با میخ‌های تزریقی گزارش شده بود [۱۸]، با افزایش طول میخ‌ها پررنگتر شده و با نصب میخ‌ها تحت زاویه ۱۵° به بیشترین مقدار می‌رسد. بنابراین، با نصب میخ‌های بلندتر و استفاده از زاویه ۱۵ درجه برای نصب آنها، می‌توان رفتار شکننده‌تری را از دیوارهای مسلح شده با میخ‌های ماریپیچی تحت بارگذاری پی انتظار داشت.

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که در تمامی زوایا و چیدمان هندسی میخ، افزایش طول میخ‌های ماریپیچی می‌تواند نقش برجسته‌ای در افزایش ظرفیت باربری پی بازی کند بطوریکه این نقش با افزایش زاویه میخ‌ها کمرنگ می‌شود. علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، به تعویق انداختن شروع گسیختگی می‌تواند یکی دیگر از مزایای استفاده از میخ‌های بلندتر محسوب شود. به منظور بررسی بهتر تاثیر طول میخ بر ظرفیت باربری پی، میزان بهبود ظرفیت باربری پی‌ها ناشی از ازدیاد طول میخ‌ها در دو چیدمان مختلف از طریق یک پارامتر بی بعد تعیین شد. این پارامتر که ضریب بهبود ظرفیت باربری (IF) نامیده می‌شود به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$IF = \frac{q_u}{q_{u(Nail\ with\ L/H=0.5)}} \quad (1)$$

تغییرات IF در مقابل شیب میخ در شکل ۶-الف برای هر دو چیدمان مربعی و شطرنجی ارائه شده است. شکل ۶-الف نشان می‌دهد که تاثیر افزایش یکنواخت طول میخ‌ها در امتداد ارتفاع دیوار بر بهبود ظرفیت باربری پی به مراتب بیشتر از افزایش موضعی طول میخ‌ها است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش طول میخ‌ها در نیمه بالایی دیوار ظرفیت باربری نهایی را بین ۱۸٪ تا ۳۸٪ بهبود می‌بخشد در حالی که افزایش یکنواخت طول میخ در امتداد ارتفاع دیوار منجر به افزایش ۵۱ تا ۷۷ درصدی ظرفیت باربری نهایی می‌شود. این نشان می‌دهد که اثر افزایش همزمان طول تمامی میخ‌ها بر بهبود ظرفیت باربری پی حدود ۲/۰ تا ۲/۸ برابر افزایش موضعی طول میخ‌ها است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که علیرغم اعتقاد اکثر مهندسين، میخ‌های واقع در ردیف‌های پایینی دیوار میخکوبی شده نقش



شکل ۷. نتایج PIV برای دیوارهای مسلح شده با میخ‌هایی با راستای ۰ درجه

Fig. 7. PIV results for wall models with horizontal nails

زاویه ۱۵ درجه با یک اُفت چشمگیر مواجه می‌شود. شکل‌گیری مقدار بیشینه ظرفیت باربری پی ضمن اجرای میخ‌هایی با زاویه ۱۵ درجه نشان دهندهٔ برقراری حالت تعامد بین راستای میخ و سطح گسیختگی دیوار در این زاویه می‌باشد. این پدیده توسط ژانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۳ در مورد میخ‌های تزریقی نیز گزارش شده است [۱۹].

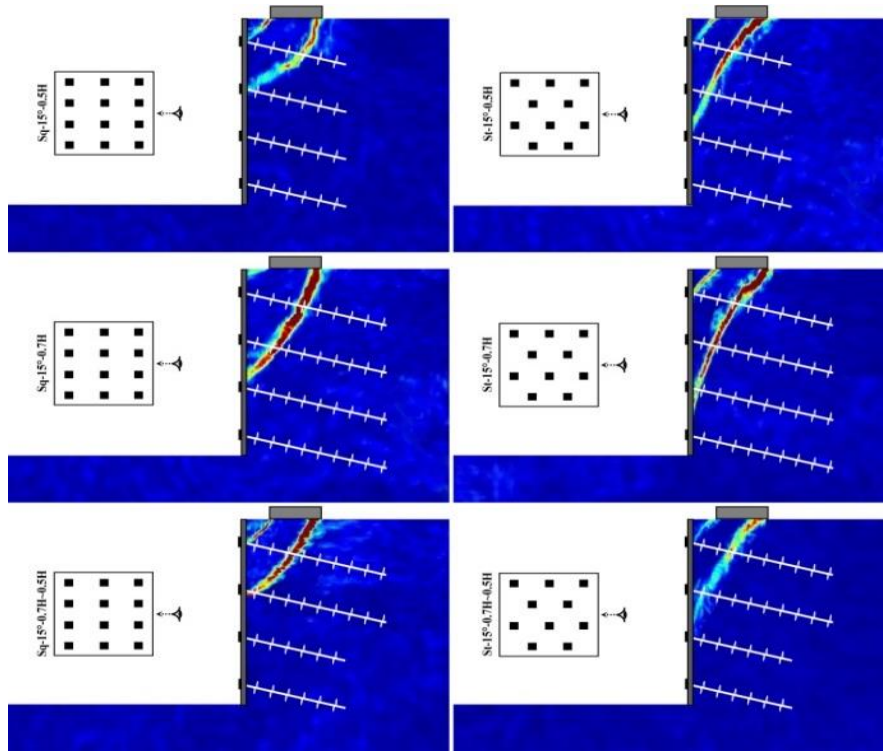
۴-۲- مکانیزم گسیختگی

بمنظور بررسی مکانیزم گسیختگی در دیوارهای مسلح شده با میخ‌های مارپیچی، انتشار باندهای برشی در بدنه مدلها حین بارگذاری با استفاده از تکنیک سرعت سنجی تصویر ذرات (PIV)^۲ ردیابی شد. اشکال ۹-۷ باندهای برشی به دست آمده توسط این تکنیک را در پایان بارگذاری نشان

این بدان معنا است که پی‌های نواری واقع بر دیوارهای مسلح شده با میخ‌های مارپیچی با چیدمان مربعی به دلیل افزایش تراکم میخ در واحد سطح، قبل از رسیدن به ظرفیت باربری نهایی، رفتار بار-نشست صلب‌تری را تجربه می‌کنند. بدلیل آنکه ظرفیت باربری نهایی زمانی می‌تواند در طراحی پی‌ها استفاده شود که در محدودهٔ نشست‌های مجاز رخ دهد، کاهش $(s/B)_r$ می‌تواند یک مزیت برای چیدمان مربعی در نظر گرفته شود. همانطور که در شکل ۵ مشاهده شد، بهبود ظرفیت باربری ناشی از چیدمان مربعی در میخ‌های بلند بیشتر مشهود است و با افزایش شیب میخ به تدریج محو می‌شود، به طوری که می‌توان تاثیر چیدمان میخ را در محاسبه ظرفیت باربری در دیوارهای مسلح شده با میخ‌های ۳۰ درجه نادیده گرفت. بمنظور روشن‌تر شدن تأثیر زاویه میخ بر عملکرد پی واقع بر دیوار، تغییرات ظرفیت باربری در مقابل زاویه اجرای میخ در شکل ۶-الف ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه اجرای میخ، ظرفیت باربری ابتدا افزایش و بعد از عبور از مرز

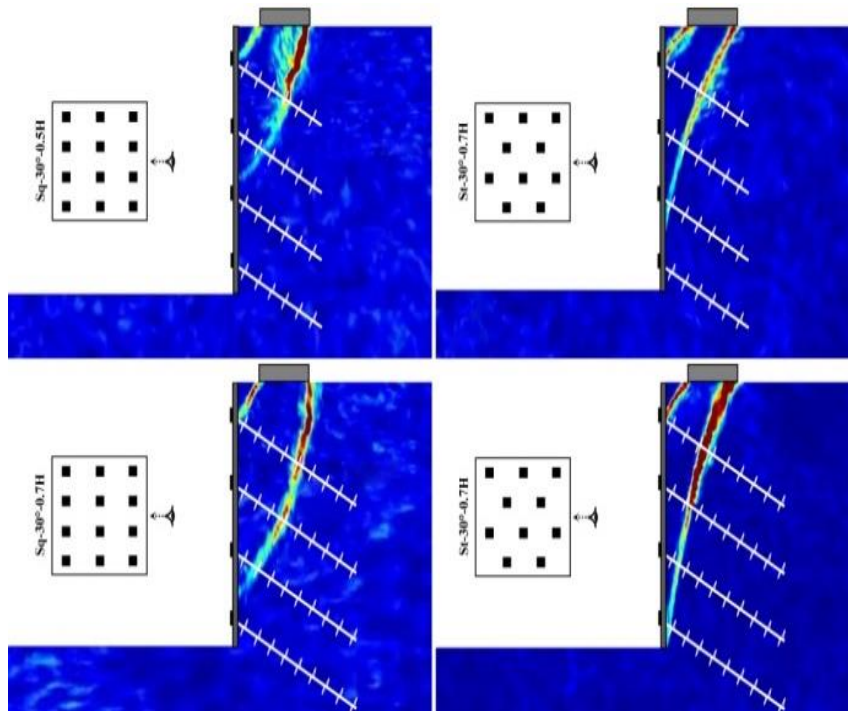
1 Zhang

2 particle image velocimetry



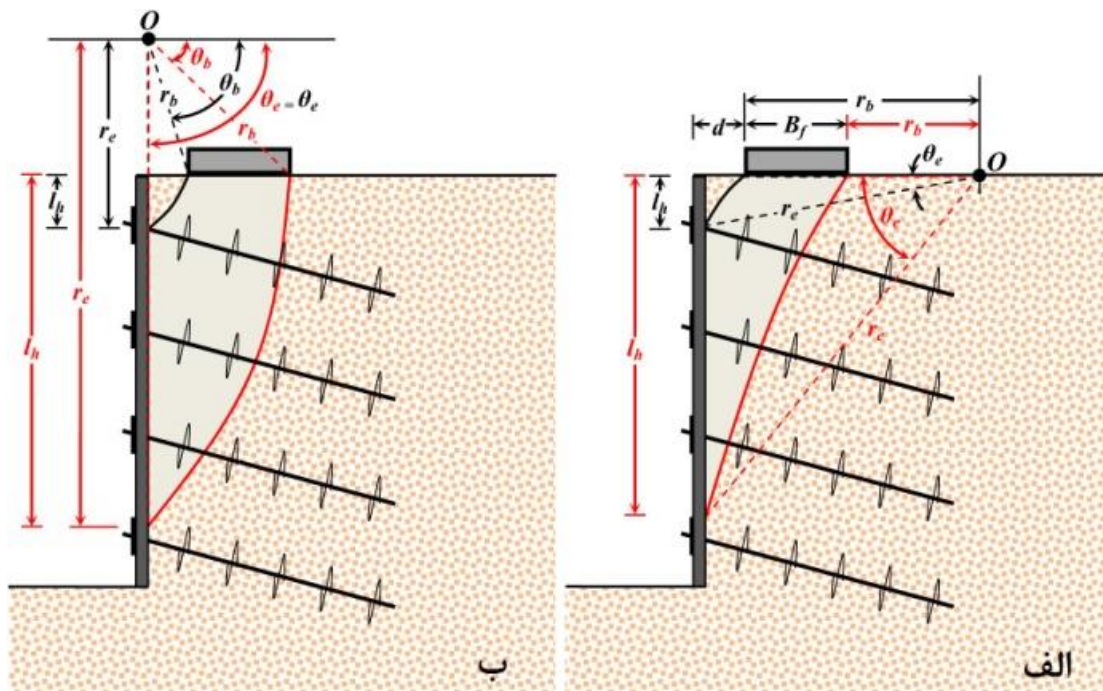
شکل ۸. نتایج PIV برای دیوارهای مسلح شده با میخ‌هایی با راستای ۱۵ درجه

Fig. 8. PIV results for wall models with 15° nails



شکل ۹. نتایج PIV برای دیوارهای مسلح شده با میخ‌هایی با راستای ۳۰ درجه

Fig. 9. PIV results for wall models with 30° nails



شکل ۱۰. هندسه ناحیه پلاستیک برای دیوارهای میخکوبی شده با چیدمان (الف) مربعی؛ (ب) شطرنجی

Fig. 10. Geometry of plastic zone for nails in: (a) square arrangement; (b) staggered arrangement

گسترش یافت. همچنین، سطح لغزشی دوم که این ناحیه را از زیر محصور می کرد، از لبه داخلی پی آغاز و از میان ردیف های میخ به سمت دیوار توسعه یافت و بسته به چیدمان، الگوی و شیب میخها در ارتفاعات مختلف به دیوار برخورد کرد. هندسه این دو سطح را می توان با استفاده از معادلات زیر توصیف نمود:

$$r = r_0 e^{(\theta - \theta_b)\xi} \quad (2)$$

که در آن θ_b و r_0 متغیرهای وابسته به هندسه دیوار هستند که در شکل ۱۰ معرفی شده اند. همچنین، مقادیر X نیز به عنوان متغیر سوم این معادله، برای چیدمان مربعی و شطرنجی بترتیب با استفاده از روابط ۳ و ۴ تعیین می شوند. سایر پارامترهای مندرج در این روابط نیز در شکل ۱۰ و جدول ۲ ارائه شده است.

می دهد.

عدم وجود سطوح گسیختگی سطحی و تنها تشکیل یک سطح لغزش عمیق یکی از نکات برجسته در نتایج PIV بود. استفاده از خاک با تراکم نسبی متوسط در مدل ها می تواند دلیل اصلی عدم ایجاد شکست برشی کلی باشد. این امر سبب شد که گسیختگی سطحی تنها به گسیختگی برشی پانچینگ محدود شود. نتایج PIV نشان داد که مکانیسم شکست در دیوارهای مسلح شده با میخهای مارپیچی تحت بارگذاری پی نواری متشکل از یک ناحیه پلاستیک است که توسط دو منحنی لگاریتمی با مرکز یکسان احاطه می شود. این مشاهده مطابق با گزارش ارائه شده توسط پلومی^۱ و همکاران برای دیوارهای حائل انعطاف پذیر است [۲۰]. این ناحیه که به صورت شماتیک در شکل ۱۰ برای دیوارها با چیدمان میخ مربعی و شطرنجی ارائه شده است، بگونه ای تحت تنشهای برشی قرار گرفته است که حرکت آن با حرکت دیوار سازگار باشد. سطح لغزشی که این ناحیه را از بالا محصور می کرد از لبه بیرونی پی شروع و تا محل تلاقی ردیف اول میخ ها با دیوار

حرکت گوه گسیختگی به سمت خارج محتمل تر و در نتیجه تمایل آن به جلو بیشتر از رو به پایین خواهد بود. این منجر به تشکیل یک سطح لغزش مقعر در دیوارها با چیدمان شطرنجی خواهد شد، همانطور که در اشکال ۷-۹ مشاهده می شود. این پدیده در مدلها با چیدمان مربعی به دلیل افزایش تعداد میخ در واحد سطح و کاهش تمایل گوه برای حرکت به سمت جلو کاملاً بلعکس بود. کاهش تمایل به حرکت رو به جلو به دلیل استفاده از چیدمان مربعی در نمودارهای شکل ۱۱ کاملاً مشهود است. کاهش عمق نفوذ صفحه گسیختگی به دلیل استفاده از چیدمان مربعی، دومین یافته ای بود که از مقایسه مکانیسم شکست در دیوارها با چیدمانهای مختلف میخ به دست می آید. این پدیده که منجر به کاهش ابعاد گوه گسیختگی شد، به طور مستقیم تحت تأثیر تمایل دیوار به حرکت سمت بیرون است. این پدیده توسط ژانگ و همکاران نیز برای شبیه‌های مسلح شده با میخ‌های تزریقی نیز گزارش شد [۲۱]. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که استفاده از یک چیدمان مربعی برای نصب میخ‌های ماریپیچی می تواند یک راهکار مناسب جهت کاهش عمق نفوذ سطح لغزش و محدود کردن حرکت دیوار باشد.

زاویه و طول میخ‌ها دو پارامتر دیگر تأثیرگذار بر ابعاد گوه گسیختگی در دیوارهای مسلح شده با میخ‌های ماریپیچی بودند. افزایش یکنواخت طول میخ در ارتفاع دیوار و همچنین استفاده از زاویه ۱۵ درجه برای نصب میخ، عمق نفوذ سطح لغزش را در تمامی مدل های دیوار کاهش داد. کاهش ابعاد گوه گسیختگی که در اثر افزایش موضعی طول میخ‌ها مشاهده نشد را می توان به عنوان یک مزیت در طراحی دیوارها در نظر گرفت. عدم تغییر ابعاد گوه گسیختگی به دلیل افزایش طول میخ‌های واقع در نیمه بالایی دیوارها نشان می دهد که نقش ردیف های پایینی میخ ها در پایداری دیوارها بیشتر از ردیف های بالایی است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که برای بهبود عملکرد دیوارهای میخکوبی شده با یک آرایش غیر یکنواخت طولی میخ، توجه به ردیف های پایینی میخ ها باید در اولویت قرار گیرد. لازم به ذکر است که این نتیجه گیری فقط مربوط به شرایط بارگذاری ناشی از پی است و ممکن است تحت سایر شرایط بارگذاری صادق نباشد.

۴-۳- جابجایی‌های افقی رویه

جابجایی جانبی مدلها در طول بارگذاری توسط چهار LVDT نصب شده در ارتفاعات مختلف دیوار اندازه گیری شد. برای حذف اثر ارتفاع دیوار و تعمیم نتایج برای دیوارهایی با ارتفاع های مختلف، جابجایی های افقی اندازه گیری شده ابتدا به ارتفاع دیوار نرمالیزه ($\Delta x/H$) و سپس مورد استفاده

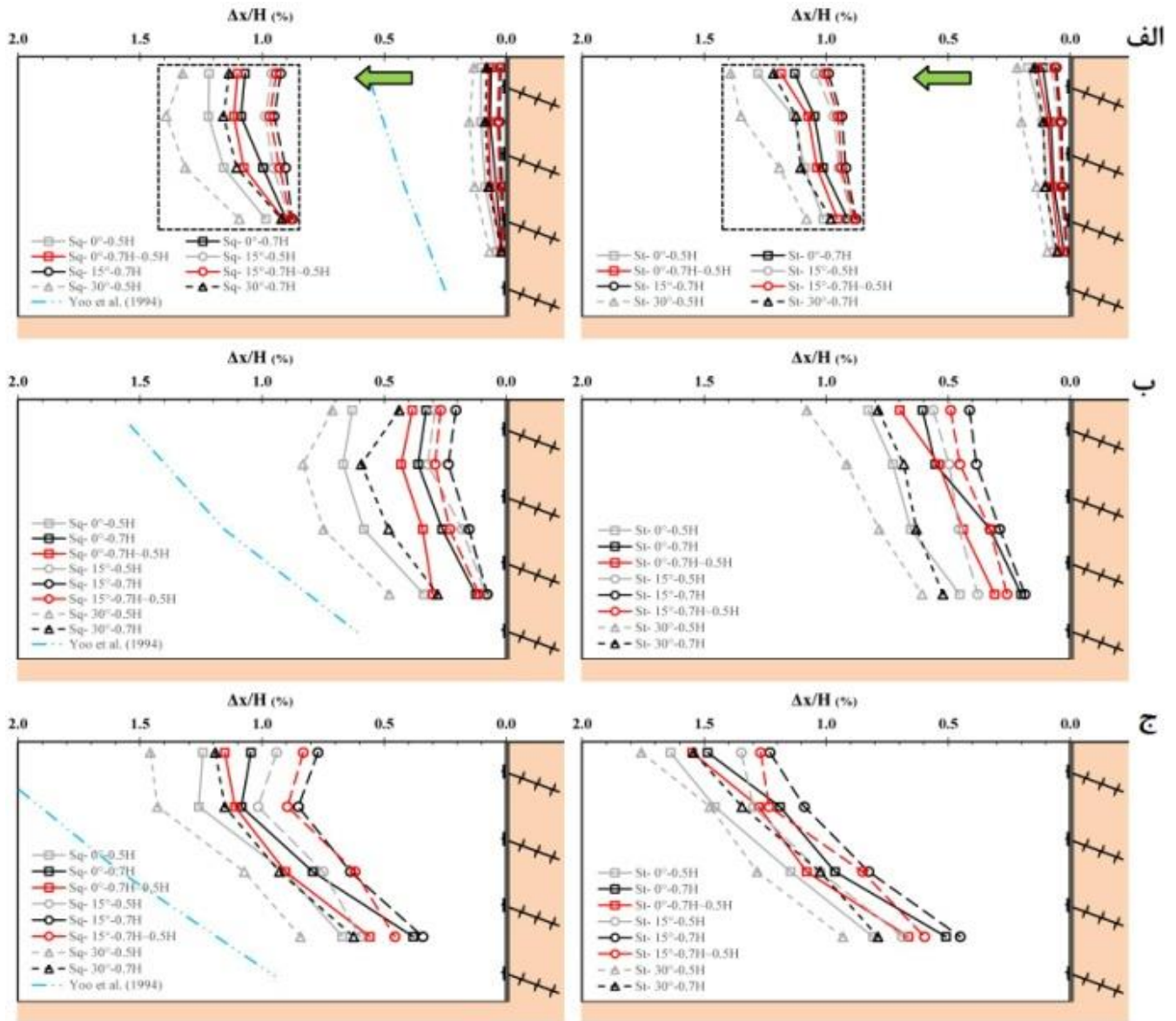
$$\xi = \frac{\ln[\cos(\theta_e - \theta_b) + \frac{l_h}{r_0}]}{(\theta_e - \theta_b)}; \begin{cases} \text{Upper-bound: } r_0 = \frac{d}{\sin(\theta_e - \theta_b)} \\ \text{Lower-bound: } r_0 = \frac{B_f + d}{\sin(\theta_e - \theta_b)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{\ln[\frac{l_h}{r_0 \sin \theta_e}]}{\theta_e}; \begin{cases} \text{Upper-bound: } r_0 = \frac{l_h}{\tan \theta_e} - d \\ \text{Lower-bound: } r_0 = \frac{l_h}{\tan \theta_e} - (B_f + d) \end{cases} \quad (4)$$

که در آن θ ، d و B_f متغیرهای وابسته به هندسه دیوار و موقعیت بارگذاری هستند که در شکل ۱۰ معرفی شده‌اند. مقادیر I_{II} نیز به عنوان متغیر سوم این معادله در جدول ۲ ارائه شده‌اند. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، از این دو سطح لغزش می توان به عنوان یک مرز بالا برای تخمین ظرفیت باربری نهایی پی واقع در دیوارهای مسلح شده با میخ‌های ماریپیچی استفاده نمود، همانطور که توسط پلومی و همکاران برای دیوارهای حائل انعطاف پذیر پیشنهاد شده است [۲۰].

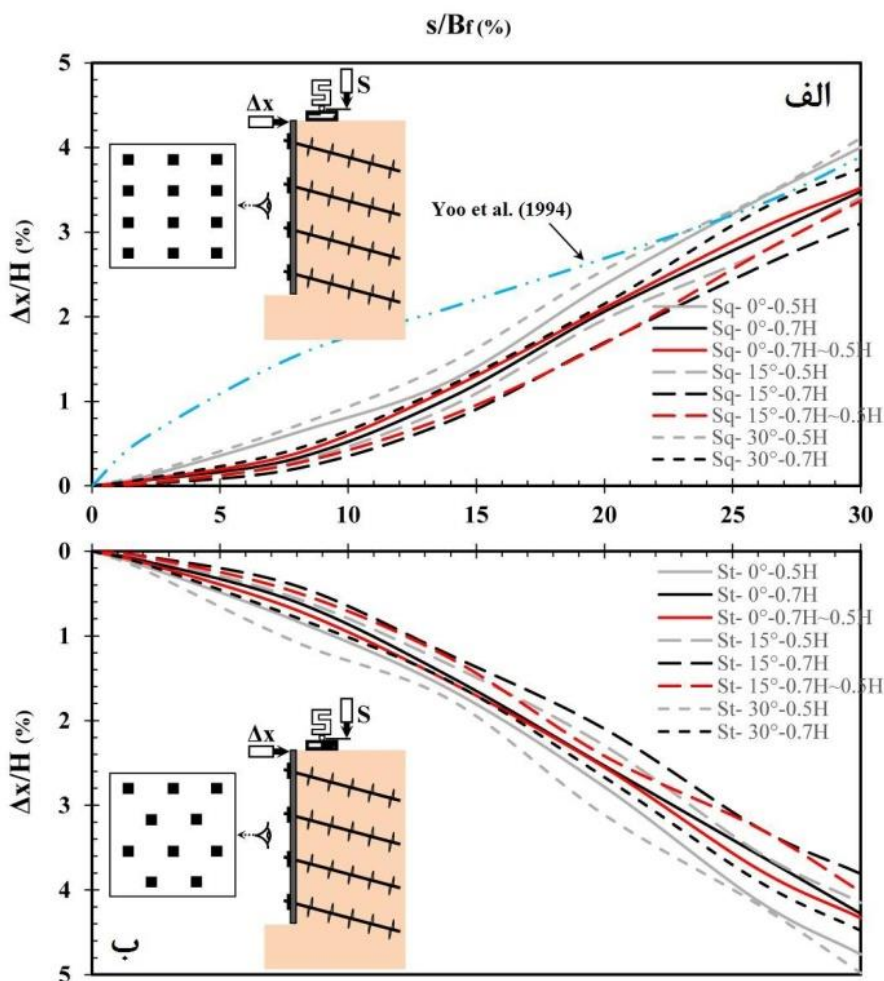
جهت بررسی تأثیر چیدمان، آرایش، طول و شیب میخ‌های ماریپیچ بر مکانیسم شکست دیوارهای مسلح شده با آن، مقایسه‌ای بین نتایج PIV مدلها انجام شد. تغییر در هندسه سطوح لغزش به دلیل تغییر در الگوی نصب میخ اولین یافته‌ای بود که از مقایسه مکانیسم گسیختگی در دیوارها با الگوهای مربعی و شطرنجی به دست آمد. همانطور که مشاهده می شود، سطوح لغزش در دیوارها با الگوی مربعی میخ از لبه‌های پی شروع شده و به شکل یک منحنی محدب به سمت دیوار توسعه یافته و در نهایت منجر به تغییر شکل دیوار شده است. این نوع گسیختگی برای دیوارهای مسلح شده با میخ تزریقی [۱۷]. و شیب های میخ کوبی شده نیز گزارش شده است [۱۹ و ۲۱]. در حالی که سطح لغزش به فرم یک منحنی مقعر در دیوارها با چیدمان شطرنجی میخ شکل گرفت. تغییر در هندسه سطح لغزش را می توان به میزان تمایل دیوار به سمت بیرون نسبت داد. همانطور که توسط هانسن^۱ و توفنکجیان و ویستیک^۲ شده است، تحدب یا تقعر سطح لغزش به میزان تمایل حرکت گوه گسیختگی به سمت جلو یا پایین بستگی دارد [۲۳ و ۲۲]. به عبارت دیگر، زمانی که تمایل گوه به حرکت به سمت جلو بیشتر از رو به پایین باشد، سطح لغزش مقعر شکل می گیرد و بالعکس. بنابراین در چیدمان شطرنجی که تعداد میخ در واحد سطح کمتر از چیدمان مربعی است،

1 Hansen
2 Tufenkjian and Vucetic



شکل ۱۱. پروفیل جابجایی جانبی دیوارها در نشست بی معادل (الف) $s/B_f=2\%$ ؛ (ب) $s/B_f=8\%$ ؛ (ج) $s/B_f=14\%$

Fig. 11. Lateral wall deformations profiles at different settlements: (a) $s/B_f=2\%$; (b) $s/B_f=8\%$; and (c) $s/B_f=14\%$



شکل ۱۲. پاسخ‌های نشست پی - جابجایی تاج دیوار برای دیوارهای میخکوبی شده با چیدمان (الف) مربعی؛ (ب) شطرنجی

Fig. 12. The lateral displacement response of the wall crest versus footing settlement in: (a) square arrangement; (b) staggered arrangement

دیوارها به مراتب کمتر از نیمه بالایی بود. به منظور روشن شدن رابطه بین نشست پی و جابجایی جانبی دیوار، پاسخ‌های نشست - جابجایی دیوار برای تاج دیوارها در شکل ۱۲ ارائه شده است. منحنی‌های $s/B_f = \Delta x/H$ نشان می‌دهند که یک رابطه دو خطی بین نشست پی و جابجایی جانبی دیواره در تمام مدل‌های دیوار وجود دارد. شیب ناحیه خطی اول کمتر از ناحیه دوم بود و تغییر شیب در محدوده نشست‌های $0.04B_f$ تا $0.08B_f$ رخ داد. این محدوده ای بود که در آن ظرفیت باربری نهایی شکل گرفت. این روند برای دیوارهای مسلح شده با میخ‌های تزریقی نیز توسط یو و همکاران گزارش شده است با این تفاوت که شیب ناحیه خطی اول بیشتر از ناحیه دوم گزارش

قرار گرفتند. برای مقایسه بر اساس معیار نشست پی، حرکات جانبی دیوار مربوط به نشست‌های مختلف پی (۲، ۸ و ۱۴ درصد) برای هر مدل تعیین شد. این سه نشست برای بازتاب رفتار دیوارها قبل و بعد از فشار نهایی پی انتخاب شدند. پروفیل‌های جابجایی نرمالیزه شده دیوارها در شکل ۱۱ به طور جداگانه برای نشست‌های ۲، ۸ و ۱۴ درصد ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان تغییر شکل جانبی دیوارها تحت‌تأثیر آرایش، شیب و چیدمان میخ‌های مارپیچی و همچنین میزان نشست پی قرار گرفته است. همانطور که مشاهده شد، حرکات جانبی دیوار با افزایش نشست پی افزایش یافت، با این تفاوت که سرعت رشد تغییر شکل‌های جانبی در نیمه پایینی

شده بود [۱۸].

در مقابل زاویه میخ در شکل ۱۳ در نشست های مختلف پی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، بیشترین تأثیر استفاده از چیدمان مربعی در کاهش جابجایی دیوارها مربوط به دیوارهایی با میخ های بلند است. این اثر در زاویه های مختلف میخ متغیر بود و به ترتیب در ۱۵ درجه و ۳۰ درجه به حداکثر و حداقل مقدار خود رسید. با ادامه کاهش طول میخ، اثربخشی استفاده از چیدمان مربعی در کاهش جابجایی دیوار از ۳۰٪ به ۴۳٪ در دیوارهای با طول میخ $0.7H$ به ۲۳٪ تا ۲۷٪ در دیوارهایی با طول میخ $0.5H$ کاهش یافت. از این رو، می توان نتیجه گرفت که نصب میخ ها با زاویه ۱۵ درجه مطابق با یک چیدمان مربعی می تواند به عنوان یک راه حل موثر برای کاهش جابجایی های جانبی در دیوارهای مسلح شده با میخ های مارپیچی در نظر گرفته شود. عملکرد بهتر مدل های مسلح شده با میخ های ۱۵ درجه می تواند ناشی از قرار گیری این میخ ها در راستایی نزدیک به بردار نرمال سطوح گسیختگی احتمالی باشد.

کاهش جابجایی دیوارها و انتقال محل ΔX_{max} به نقطه پایینی دیوار در اثر استفاده از میخ های مارپیچی به جای میخ های تزریقی به عنوان دو مزیت دیگر این میخ های نوآورانه شناسایی شد. این دو مزیت، که با مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج ارائه شده توسط یو و همکاران برای میخ های تزریقی به دست آمد [۱۸]، تأثیر مستقیمی بر عملکرد پی های واقع بر دیوارهای میخکوبی شده خواهد داشت. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، کاهش جابجایی های دیوار به دلیل استفاده از میخ های مارپیچی به جای میخ های تزریقی در نشست های کوچک برجسته تر بود و به تدریج با افزایش نشست پی کاهش یافت. این کاهش جابجایی در حدود ۹۱٪ در $s/B_f = 2\%$ بود و در $s/B_f = 14\%$ به حدود ۴۵٪ رسید.

۵- نتیجه گیری

براساس نتایج بدست آمده از مدل های فیزیکی دیوارهای مسلح شده با میخ های مارپیچی تحت پی نواری، می توان به موارد زیر به عنوان دستاوردهای مهم این تحقیق اشاره نمود:

- ۱- افزایش طول میخ در تمامی ردیف ها، نصب آنها در زاویه ۱۵ درجه و استفاده از چیدمان مربعی به عنوان سه راهکار موثر جهت کاهش جابجایی های جانبی دیوارهای مسلح شده با میخ های مارپیچی و افزایش ظرفیت باربری پی واقع بر روی آنها معرفی شد.
- ۲- کاهش ۱۲ درصدی اثربخشی استفاده از چیدمان مربعی در کاهش

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود، اگرچه استفاده از میخ های بلندتر و همچنین نصب آنها در زاویه بهینه (۱۵ درجه)، شیب ناحیه اول این رابطه دو خطی را کاهش داد اما تغییر در طول و زاویه میخ ها هیچ تأثیری بر شیب ناحیه دوم این رابطه نداشت. به عبارت دیگر می توان شیب ثابت 0.15 و 0.17 را به ترتیب برای ناحیه خطی دوم در دیوارها با چیدمان مربعی و شطرنجی در نظر گرفت. کاهش شیب ناحیه اول این رابطه دو خطی به این معنی است که سهم کمتری از نشست پی با استفاده از میخ های بلندتر و نصب میخ ها در چیدمان مربعی و زاویه بهینه به جابجایی جانبی دیوار تبدیل می شود.

مقایسه پروفیل های جابجایی جانبی دیوارها در شکل ۱۱ نشان می دهد که افزایش طول میخ نقش مهمی در کاهش جابجایی های جانبی دیوارها تحت بارگذاری پی ایفا می کند. این کاهش جابجایی که با نصب میخ ها در زاویه ۱۵ درجه به حداکثر می رسد، زمانی بیشتر است که طول میخ ها به طور یکنواخت در امتداد ارتفاع دیوار افزایش می یابد. با ادامه افزایش زاویه میخ ها، جابجایی دیوار مجدداً افزایش یافته و از میزان جابجایی های تجربه شده در دیوارهای مسلح شده با میخ های افقی نیز فراتر می رود. این روند را می توان به وضوح در شکل ۱۳ مشاهده نمود. از این رو، ۱۵ و ۳۰ درجه را می توان به ترتیب به عنوان کارآمدترین و ناکارآمدترین زاویه برای نصب میخ های مارپیچی برای کنترل تغییر شکل دیوارها معرفی نمود.

چیدمان نصب میخ به عنوان یکی دیگر از عوامل موثر بر جابجایی دیوارها شناسایی شد. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، استفاده از یک چیدمان مربعی در نصب میخ های مارپیچی به دلیل افزایش تراکم میخ در واحد سطح، نه تنها جابجایی دیوار را کاهش می دهد، بلکه مد شکم دادگی را به مد تغییر شکل دیوار اضافه می کند. تغییر در مد تغییر شکل دیوار سبب شد که مکان وقوع جابجایی جانبی حداکثر (ΔX_{max}) از تاج دیوار به یک سوم میانی دیوار منتقل شود. از آنجا که محدود کردن جابجایی جانبی تاج دیوار نقش موثری در تامین فشار محصور کننده اطراف پی دارد [۲۴ و ۲۵]، انتقال محل ΔX_{max} به نقطه پایین تری از دیوار می تواند نقش موثری در بهبود عملکرد دیوارهای حامل پی داشته باشد.

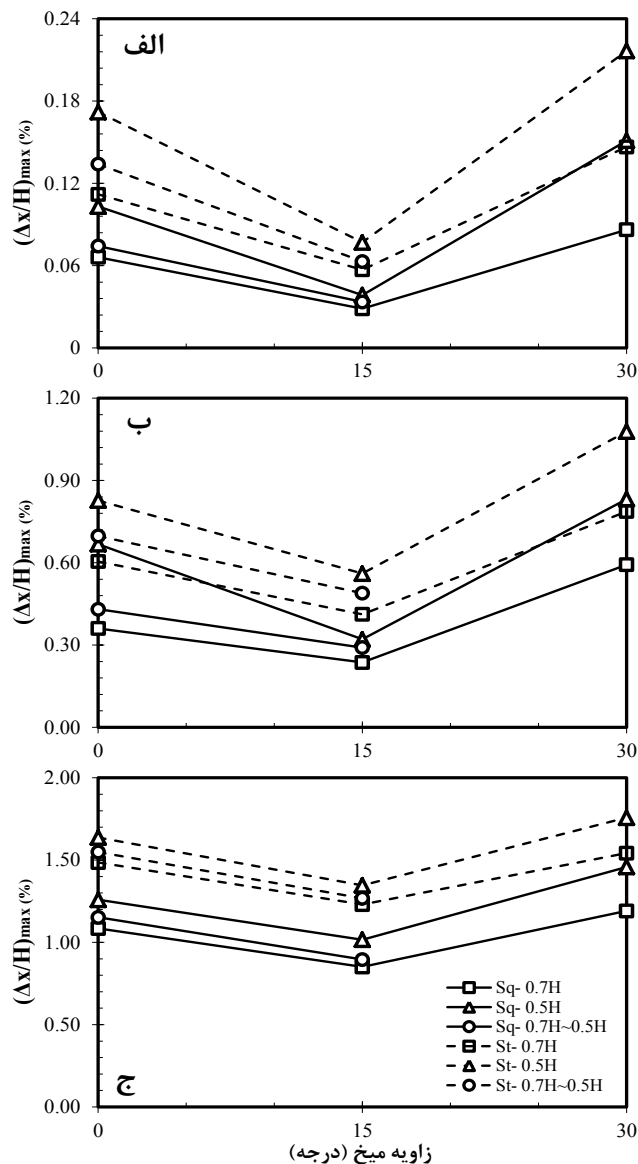
همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، کاهش جابجایی به دلیل استفاده از چیدمان مربعی به زاویه و آرایش میخ های مارپیچی وابسته است. به منظور درک بهتر این وابستگی، تغییر جابجایی جانبی حداکثر ($(\Delta x/H)_{max}$)

۴- اضافه شدن مُد شکم‌دادگی به مُد غالب تغییر شکل دیوار (واژگونی) و همچنین تغییر هندسه سطح لغزش از یک منحنی مقعر به یک منحنی محدب به عنوان دو پیامد مهم ناشی از تغییر چیدمان نصب میخ از حالت شطرنجی به مربعی بود.

۵- افزایش همزمان طول میخ در تمامی ردیف‌ها و همچنین استفاده از زاویه ۱۵ درجه برای نصب میخ‌های مارپیچی باعث کاهش عمق نفوذ سطح گسیختگی و ابعاد گوه گسیختگی شد.

منابع

- [1] A. Ghaly, A. Hanna, and M. Hanna. "Uplift behavior of screw anchors in sand. I: Dry sand." *Journal of Geotechnical Engineering* 117(5) (1991) 773-793.
- [2] C.D.H.C Tsuha, N. Aoki, G. Rault, L. Thorel, and J. Garnier. "Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests." *Canadian Geotechnical Journal* 49(9) (2012): 1102-1114.
- [3] D. Wang, R.S. Merifield, and C. Gaudin. "Uplift behaviour of helical anchors in clay." *Canadian Geotechnical Journal* 50(6) (2013) 575-584.
- [4] S. Mittal, and 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.
- [5] H. Tokhi, G. Ren, and J. Li. "Laboratory study of a new screw nail and its interaction in sand." *Computers and Geotechnics* 78 (2016) 144-154.
- [6] S. Rawat, and A.K. Gupta. "Numerical modelling of pullout of helical soil nail." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9(4) (2017) 648-658.
- [7] S. Rawat, A. K. Gupta, and A. Kumar. "Pullout of soil nail with circular discs: A three-dimensional finite element analysis." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9(5) (2017) 967-980.
- [8] M. E. Mahmoudi-Mehrizi, A. Ghanbari, M. Sabermahani. "Investigating the Effect of Grout on Improving the Performance of Helical Anchors Used in Wall Stabilization." *Transportation Infrastructure Geotechnology* 7 (2020) 332-353.



شکل ۱۳. تغییرات جابجایی بیشینه دیوار در مقابل زاویه نصب میخ در نشست پی معادل (الف) $s/B_f = 2\%$; (ب) $s/B_f = 8\%$; (ج) $s/B_f = 14\%$.

Fig. 13. Variation of maximum lateral displacement versus nail inclination at different footing settlements: (a) $s/B_f = 2\%$; (b) $s/B_f = 8\%$; (c) $s/B_f = 14\%$

جابجایی‌های جانبی دیوار در اثر کاهش طول میخ‌ها از 0.7H به 0.5H نکته مهم دیگری بود که لزوم توجه همزمان به چیدمان و طول میخ را هنگام طراحی مسجل می‌سازد.

۳- افزایش ظرفیت باربری پی نواری، به تعویق انداختن گسیختگی پی و همچنین کاهش ۴۵ تا ۹۱ درصدی جابجایی‌های جانبی دیوار از مزایای استفاده از میخ‌های مارپیچی به جای میخ‌های تزریقی شناسایی شد.

- using shaking table test.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 97 (2017) 216-232.
- [18] N-J. Yoo, K-S. Yoo, J. .Kim. “Model Tests of Soil Nailing System under Surcharges.” *Journal of Industrial Technology* 14 (1994) 77-87.
- [19] G. Zhang, J. Cao, and L. Wang. “Centrifuge model tests of deformation and failure of nailing-reinforced slope under vertical surface loading conditions.” *Soils and foundations* 53(1) (2013) 117-129.
- [20] S. Plumey, A. Muttoni, L. Vulliet, V. Labiouse. “Analytical and numerical analyses of the load-bearing capacity of retaining walls laterally supported at both ends.” *Int J Numer Anal Methods Geomech* 35(9) (2011) 1019–1033.
- [21] G. Zhang, J. Cao, and L. Wang. “Failure behavior and mechanism of slopes reinforced using soil nail wall under various loading conditions.” *Soils and Foundations* 54(6) (2014) 1175–1187.
- [22] J.B. Hansen. “Earth pressure calculation.” Copenhagen: Danish Technical Press (1953).
- [23] M.R. Tufenkjian, and M.Vucetic. “Dynamic failure mechanism of soil-nailed excavation models in centrifuge.” *J Geotech Geoenviron Eng.* 126(3) (2000) 227–35.
- [24] J. Salençon. “The influence of confinement on the bearing capacity of strip footings.” *Comptes Rendus Mécanique* 330(5) (2002) 319–26.
- [25] L. Zhao, F. Yang, and H.Dan. “The influence of horizontal confinement on the bearing capacity factor N_y of smooth strip footing.” *Computers and Geotechnics* 61 (2014) 127–131.
- [9] D. Deardorff, M., Moeller, and E. Walt. “Results of an instrumented helical soil nail wall.” In *Earth Retention Conference 3* (2010) 262-269.
- [10] M. Sharma, D. Choudhury, M. Samanta, S. Sarkar, V.R. Annappareddy. “Analysis of helical soil-nailed walls under static and seismic conditions.” *Canadian Geotechnical Journal* 57(6) (2020) 815-827.
- [11] R. Mollaei, M. Yazdandoust, F. Askari. “Seismic evaluation of helical soil-nailed walls using shaking table testing.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 163 (2022) 107331.
- [12] P. Zahedi, A. Rezaei-Farei, H. Soltani-Jigheh. “Performance Evaluation of the Screw Nailed Walls in Tabriz Marl.” *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 7(1) (2021) 1-15.
- [13] M.-E. Mahmoudi-Mehrizi, A. Ghanbari, M. Sabermahani. “The study of configuration effect of helical anchor group on retaining wall displacement.” *Geomechanics and Geoengineering* 17(2) (2022) 598-612.
- [14], H.A. Perko. “Helical piles: a practical guide to design and installation.” John Wiley & Sons (2009).
- [15] FSI. “Technical manual: helical piles and anchors, hydraulically driven push piers, polyurethane injection & supplemental support systems.” second ed. Omaha: Foundation Support Works (2014).
- [16] D.M. Wood. “Geotechnical Modeling.” Version (2.2) (2014).
- [17] M. Yazdandoust. “Investigation on the seismic performance of steel-strip reinforced-soil retaining walls

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Yazdandoust, S. Yadegari, *Investigation on the performance of walls reinforced by helical nails under strip footing loading using physical model test, Amirkabir J. Civil Eng., 55(12) (2024) 2541-2560.*

DOI: 10.22060/ceej.2024.21978.7869

