



University Of Qom



## A Laboratory Study of the Effect of Wraparound Anchorage, Increasing Reinforcement Thickness and Nailing in Improving the Bearing Capacity of Strip Foundation on Sandy Soil

Ahad Ouria<sup>1</sup> , Eliar Heidarli<sup>2</sup>, Mohammadali Enshaei<sup>3</sup>

1. Corresponding author, Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: [aouria@uma.ac.ir](mailto:aouria@uma.ac.ir)
2. Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: [eliar.h.1993@gmail.com](mailto:eliar.h.1993@gmail.com)
3. Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: [enshaei\\_m@yahoo.com](mailto:enshaei_m@yahoo.com)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received 16 Jul 2022  
Revised 10 Oct 2022  
Accepted 22 Nov 2022

**Keywords:**  
Wraparound anchorage,  
Bearing capacity,  
Nailing techniques,  
Optimum reinforcement,  
Geotextile.

### ABSTRACT

*In this study, several methods have been experimentally evaluated to increase the efficiency of reinforcements in the bearing capacity of a strip footing on sand. The capacity of the foundation in five different configurations including single and multilayer reinforcements was evaluated with free and wraparound anchored end, different thickness, and nailed with different numbers of nails and patterns. According to the results of these tests, dividing the length of the reinforcement and using it in more layers increases the efficiency of the reinforcement, but this division of the length of the reinforcement has a certain limit that reducing this limit reduces the efficiency. The use of wraparound anchorage caused more interaction between the soil grains and the reinforcement surface and as a result increased the bearing capacity of the foundation. Increasing the thickness of the reinforcements was another parameter studied in this study. Increasing the thickness of the reinforcement caused the bearing capacity to increase. The results of the experiments show that the pattern of nails has a significant effect on the performance of the reinforced soil.*

**Cite this article:** Ouria, Ahad., Heidarli, Eliar., & Enshaei, Mohammadali. (2022). A laboratory study of the effect of wraparound anchorage, increasing reinforcement thickness and nailing in improving the bearing capacity of strip foundation on sandy soil. *Civil Infrastructure Researches*, 9(2), 1-16. <https://doi.org/10.22091/cer.2022.8346.1410>





## مطالعه آزمایشگاهی اثر مهار برگشتی، افزایش ضخامت مسلح‌کننده و میخ‌کوبی در افزایش ظرفیت باربری پی نواری روی خاک ماسه‌ای

احد اوریا<sup>۱</sup>، الیار حیدرلی<sup>۲</sup>، محمدعلی انشایی<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: [aouria@uma.ac.ir](mailto:aouria@uma.ac.ir)

۲. دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: [eliar.h.1993@gmail.com](mailto:eliar.h.1993@gmail.com)

۳. دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: [enshaei\\_m@yahoo.com](mailto:enshaei_m@yahoo.com)

### چکیده

استفاده از خاک مسلح از زمان‌های بسیار دور در ایران متداول بوده است. امروزه با ساخت سازه‌های سنگین و حیاتی، لزوم استفاده از خاک مسلح بیشتر از گذشته نمایان می‌شود. تحلیل و طراحی سازه‌های خاک مسلح، نیازمند فهم دقیق از رفتار سیستم خاک مسلح و اندرکنش بین مسلح‌کننده‌ها و توده خاک در برابر بارهای اعمالی می‌باشد. علیرغم اینکه مطالعات بسیاری در زمینه خاک مسلح انجام شده است، ولی تاکنون روش جامعی که بتواند میزان خاک‌برداری و خاک‌ریزی در پروژه‌های خاک مسلح را کاهش دهد، ارائه نشده است. در این پژوهش سعی گردیده تکنیک‌هایی آزمایشگاهی، جهت افزایش بازده مسلح‌کننده در افزایش ظرفیت باربری ارائه شود. در آزمایش‌های انجام‌شده، پی نواری به‌صورت یک ورق فولادی با ابعاد  $2 \times 5/5 \times 25$  سانتیمتر و خاک زیر پی در یک جعبه فولادی با ابعاد  $30 \times 25 \times 90$  سانتیمتر شبیه‌سازی گردیده است. در پژوهش حاضر، تأثیر استفاده از مسلح‌کننده به‌صورت مهار برگشتی و انتهای آزاد به‌صورت تک و چندلایه‌ای، ضخامت مسلح‌کننده و نیز تأثیر روش‌های مختلف میخ‌کوبی بر روی مسلح‌کننده موردبررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد تقسیم طول مسلح‌کننده با شرایطی مشخص و استفاده در چندین لایه ظرفیت باربری پی را افزایش می‌دهد. همچنین ایجاد مهار برگشتی پیوسته می‌تواند ظرفیت باربری پی را نسبت به حالت مسلح‌کننده انتهای آزاد تک‌لایه‌ای حدود  $114\%$  بیشتر بهبود بخشد. افزایش ضخامت مسلح‌کننده در حالتی که طول کلی مسلح‌کننده مورداستفاده با طول مسلح‌کننده در حالت تک‌لایه برابر می‌باشد در حدود  $40\%$  بیشتر ظرفیت باربری پی را افزایش می‌دهد. در تسلیح میخ‌کوبی شده، افزایش ظرفیت باربری تابع موقعیت قرارگیری افقی و قائم میخ‌ها می‌باشند، به‌طوری که تغییر در ابعاد و چیدمان میخ‌کوبی می‌تواند ظرفیت باربری سیستم را به‌صورت قابل‌توجهی تغییر دهد. با استفاده از تکنیک مناسب میخ‌کوبی ظرفیت باربری پی خاک مسلح تا حدود  $270\%$  درصد نسبت به خاک غیرمسلح افزایش می‌یابد.

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۱

### کلیدواژه‌ها:

مهار برگشتی،

ظرفیت باربری،

تکنیک‌های میخ‌کوبی،

تسلیح بهینه،

ژئوتکستایل.

استناد: اوریا، احد؛ حیدرلی، الیار؛ و انشایی، محمدعلی. (۱۴۰۱). مطالعه آزمایشگاهی اثر مهار برگشتی، افزایش ضخامت مسلح‌کننده و میخ‌کوبی در افزایش ظرفیت باربری پی نواری روی خاک ماسه‌ای. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی. ۹(۲)، ۱-۱۶.

<https://doi.org/10.22091/cer.2022.8346.1410>



## ۱- مقدمه

انجام شده است. براساس نتایج این تحقیقات، ظرفیت باربری توده خاکی تحت تأثیر مستقیم پارامترهایی مانند عمق قرارگیری مسلح کننده، مشخصات مکانیکی خاک، عرض پی، سختی مسلح کننده، فواصل و تعداد لایه‌های آنها می‌باشد [۱۷-۱۰]. تعداد لایه‌های مسلح کننده عامل بسیار تعیین کننده‌ای در ظرفیت باربری پی می‌باشد. با افزایش تعداد لایه‌های مسلح کننده ظرفیت باربری پی نیز تا حد مشخصی افزایش یافته و بعد از آن تقریباً ثابت باقی می‌ماند [۱۸ و ۱۹]. طول مسلح کننده نیز بایستی دارای مقداری بهینه باشد. طول بهینه در مسلح کننده در حدود ۲/۵ تا ۷ برابر عرض پی می‌باشد. افزایش طول و تعداد لایه‌های مسلح کننده بیش از مقداری مشخص، روش مناسبی برای افزایش ظرفیت باربری پی نمی‌باشد [۲۰]. مقاومت اصطکاکی فصل مشترک بین خاک و مسلح کننده یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی سیستم‌های خاک مسلح می‌باشد که تابع عوامل مختلفی مانند زبری سطح و جنس مسلح کننده می‌باشد. فصل مشترک ضعیف بین خاک و مسلح کننده سبب افزایش طول لایه تسلیح می‌شود. در خاک مسلح، افزایش طول لایه تسلیح، حجم عملیات خاکی را به صورت قابل توجهی افزایش داده و هزینه‌های استفاده از آن را بیشتر می‌کند [۲۱]. توزیع تنش در توده خاک مسلح و چینش مسلح کننده‌ها تأثیر بسزایی در ظرفیت باربری پی‌های واقع بر خاک مسلح دارد [۲۲ و ۲۳]. استفاده از رزین و اپوکسی در فصل مشترک خاک و مسلح کننده یکی از روش‌های تقویت فصل مشترک می‌باشد که می‌تواند جهت افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده استفاده شود [۲۴ و ۲۵]. تأثیر افزودن سیمان به فصل مشترک خاک و ژئوتکستایل بر روی ظرفیت باربری پی نواری روی خاک مسلح به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تثبیت سیمانی فصل مشترک خاک و مسلح کننده باعث افزایش ظرفیت باربری پی بر روی خاک مسلح خواهد شد. همچنین تثبیت سیمانی سبب کاهش قابل توجهی در طول مهاری

در دهه‌های اخیر رشد روز افزون و سریع جمعیت در مناطق شهری و صنعتی سبب ایجاد مشکلات فراوانی در دسترسی به زمین‌های مطلوب جهت فعالیت‌های عمرانی شده است، به همین علت امروزه استفاده از زمین‌های با خواص مکانیکی نامناسب به امری اجتناب‌ناپذیر بدل شده است. با استفاده از روش‌های مختلف تثبیت و تقویت خاک، می‌توان خاک محل پروژه را تقویت و بهسازی نمود. روش‌های متعددی جهت تقویت مشخصات مقاومتی خاک زیر پی وجود دارد که تسلیح خاک یکی از این روش‌ها می‌باشد. در سازه‌های باستانی و کهن ایران، استفاده از گاه برای تسلیح ملات گل دارای سابقه تاریخی می‌باشد [۱]. در طی چندین سال گذشته، استفاده از انواع مسلح کننده‌ها در سازه‌های خاکی بسیار متداول گردیده است. با تسلیح خاک می‌توان سبب کاهش هزینه‌های عمرانی، افزایش ضریب کارایی و اطمینان، پایداری و بهبود رفتاری در سازه مورد نظر شد [۲-۸]. مقاومت برشی خاک مسلح به دلیل ایجاد محصورشدگی ناشی از درگیری بین مسلح کننده کششی و خاک، افزایش می‌یابد [۹]. افزایش مقاومت برشی خاک زیر پی، باعث افزایش ظرفیت باربری پی واقع شده بر روی آن خواهد شد. استفاده از مصالح مصنوعی جهت تسلیح خاک علاوه بر اینکه دارای مزایای بسیاری می‌باشد، دارای اثرات مخربی برای محیط‌زیست بوده و سبب ایجاد نگرانی‌های بسیاری از استفاده بی‌رویه و نامناسب از این مصالح شده است. بر این اساس در سال‌های اخیر، استفاده بهینه از مصالح مصنوعی در خاک جهت تأمین بیشترین پایداری و مقاومت با کمترین حجم مصرفی از مسلح کننده‌ها، مورد توجه پژوهشگران و محققین قرار گرفته است.

## ۲- مروری بر ادبیات تحقیق

جهت تعیین ظرفیت باربری پی بر روی خاک مسلح، پژوهش‌های بسیاری با انواع مختلف مسلح کننده‌ها

مقاومت برشی توده خاک تابع شرایط تنش در محل درگیری ذرات جامد می‌باشد. با افزایش محصورکنندگی و تأثیرگذاری المان‌های مسلح‌کننده بر شرایط تنش بین ذرات جامد، عملکرد سیستم خاک مسلح تأمین می‌گردد. با توجه به این نکات، هر پارامتری که سبب ایجاد تغییر در شرایط تنش در حجم خاکی گردد، در مقاومت خاک و ظرفیت باربری پی واقع بر آن نیز مؤثر خواهد بود. شرایط قرارگیری و محل مسلح‌کننده‌ها و موقعیت نسبی آنها، تأثیر زیادی در نحوه توزیع تنش در توده خاک دارد.

تأثیر چیدمان نوارهای مسلح‌کننده در زیر پی نواری قبلاً مورد بررسی قرار گرفته است [۲۲ و ۲۳]. نتایج تحقیقات نشان داده است که تغییر نحوه قرارگیری مسلح‌کننده می‌تواند سبب افزایش راندمان تسلیح گردد. با توجه به نتایج تحقیقات قبلی و اینکه تغییر چیدمان مسلح‌کننده باعث تغییر توزیع تنش در توده خاک می‌شود، بنابراین هر تغییری در شکل و روش جایگذاری مسلح‌کننده که تأثیری بر توزیع تنش در توده خاک داشته باشد، ممکن است بر راندمان تسلیح تأثیرگذار باشد. از این رو، در پژوهش حاضر تأثیر نوع مهار برگشتی، افزایش ضخامت نوارهای مسلح‌کننده و نیز تأثیر مهار بوسیله میخ‌های فلزی با آرایش‌ها و حالت‌های مختلف در ظرفیت باربری پی نواری به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف و نوآوری در این پژوهش بررسی شرایطی بود که بتوان با استفاده از کم‌ترین مسلح‌کننده یا کمترین میزان خاک‌برداری و خاک‌ریزی، بیشترین افزایش ظرفیت باربری پی را روی خاک مسلح به‌دست آورد. برای دستیابی به این منظور، نوارهای مسلح‌کننده به‌صورت تک تا سه لایه به‌صورت انتها آزاد و مهار برگشتی با آرایش‌های قرارگیری متفاوت در خاک جانمایی شده‌اند. جهت بررسی تأثیر نحوه مهار میخ‌کوبی، مهار نوارهای ژئوتکستایل با دو نوع میخ و دو نوع چیدمان در دو نوع حالت میخ‌کوبی مورد بررسی قرار گرفته است. ضخامت نوارهای ژئوتکستایل، نوع و تعداد مهار برگشتی

مورد نیاز در طراحی پی‌های متکی بر خاک مسلح خواهد شد [۲۶ و ۲۷]. ضخامت ناحیه فصل مشترک خاک و مسلح‌کننده در مشخصات مکانیکی تماس بین آنها تأثیر به‌سزایی دارد. با افزایش ضخامت محل تماس مسلح‌کننده، اندرکنش بین ذرات خاک و مسلح‌کننده افزایش یافته و مقاومت بیرون کشیدگی مسلح‌کننده بیشتر می‌شود [۲۷]. ایجاد مهار برگشتی، یکی دیگر از روش‌های مؤثر و مناسب جهت افزایش بازده لایه‌های مسلح‌کننده می‌باشد. پارامترهای متفاوتی از جمله زاویه و طول مهار برگشتی، عرض پی و فواصل بین مسلح‌کننده در حالت برگشتی می‌تواند در این روش مؤثر باشد [۲۸-۳۲]. جهت مؤثر بودن مهار برگشتی در سیستم خاکی، بایستی خاک مورد نظر بیشتر از حد مشخصی متراکم باشد که در غیر این‌صورت استفاده از مهار برگشتی مناسب نخواهد بود [۳۳]. با افزایش طول مهاری، سطح بیشتری از مسلح‌کننده با ذرات خاک در ارتباط بوده و سبب ایجاد ظرفیت باربری بیشتر در پی خواهد شد [۳۴]. میخ‌کوبی یکی دیگر از روش‌های مسلح‌سازی مؤثر در توده خاکی می‌باشد که تحقیقات عددی و آزمایشگاهی ارزشمندی بر روی آن انجام شده است. میخ‌کوبی بسته به نوع و نحوه استفاده می‌تواند سبب کاهش نشست و جابه‌جایی توده خاک شود [۳۵-۳۷]. بسته به نوع و نحوه تراکم و روش طراحی، شکل‌های متعددی برای سطح گسیختگی در روش میخ‌کوبی پیشنهاد شده است [۳۸]. قرارگیری المان‌های مسلح‌کننده در قسمت‌های میانی می‌تواند بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت سیستم خاک مسلح داشته باشد [۳۹].

اگرچه مطالعات پیشین نتایج بسیار مفید و ارزشمندی در زمینه مسأله تسلیح در افزایش ظرفیت باربری خاک‌ها را ارائه داده‌اند، اما برخی از پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت پی بر روی خاک مسلح مورد توجه کافی نبوده‌اند. یکی از پارامترهای تعیین‌کننده در ظرفیت باربری پی‌ها، شرایط تنش حاکم در توده خاک می‌باشد.

کششی آن براساس استاندارد ASTM D4595-11 در آزمایشگاه تعیین گردیده است [۴۵]. ویژگی‌های ژئوتکستایل مورد استفاده در این آزمایش‌ها، در جدول ۲، نشان داده شده است [۴۵].

جدول ۲- خصوصیات ژئوتکستایل مصرفی

پارامتر	مقدار	استاندارد
Axial load capacity (kN/m)	۹/۳۶	ASTM D4595
Extension at failure (%)	۴/۲	ASTM D4595
Elastic modulus (kN/m <sup>2</sup> )	۱۸۵	ASTM D4595
Unit mass (kN/m <sup>2</sup> )	۰/۳	ASTM D5261

### ۳-۳- مدل آزمایشگاهی

جعبه فولادی مورد استفاده جهت شبیه‌سازی خاک زیر پی، دارای طول ۹۰، عرض ۲۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر می‌باشد. پی نواری نیز با ابعاد ۲۵×۷/۵×۲ سانتیمتر به صورت یک صفحه فلزی شبیه‌سازی شده است. ابعاد مدل آزمایشگاهی براساس نتایج تحقیقات قبلی انتخاب شده است [۲۲ و ۲۶]. جهت ساخت جعبه، از ورق فولادی به ضخامت ۵ میلیمتر استفاده شده که یکی از دیواره‌های آن از ورق شفاف تهیه شده است تا بتوان رفتار خاک و مسلح‌کننده را در برابر بارهای وارده مشاهده کرد. جهت بارگذاری و ثبت نشست‌های مدل پی، از جک دستگاه آزمایش CBR استفاده شده است. همچنین سعی گردیده است جهت به حداقل رساندن اثر اصطکاک دیواره‌ها، دیواره‌های داخلی جعبه کاملاً صاف و روغن کاری شده باشند. سیستم مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۲، نشان داده شده است.

### ۳-۴- برنامه آزمایش و آماده‌سازی مدل‌ها

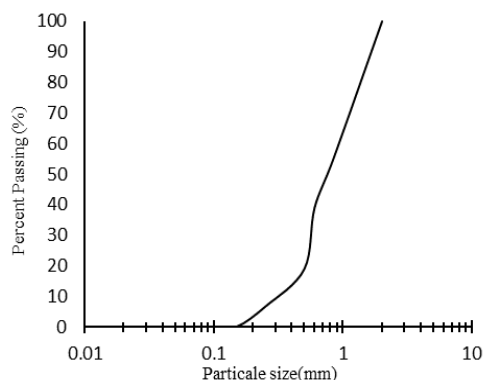
آزمایش‌ها در پنج شرایط مختلف شامل مدل‌های غیرمسلح، مسلح شده با مسلح‌کننده با انتهای آزاد و با مهار برگشتی تک لایه و چندلایه، مسلح شده با ضخامت‌های مختلف مسلح‌کننده و در نهایت مسلح شده با مسلح‌کننده‌های مهار شده با میخ انجام شد.

مورد استفاده، تغییر هندسه، حالت و آرایش میخ‌های مورد استفاده در داخل توده خاک، سبب تغییر در توزیع تنش بین خاک و مسلح‌کننده شده و در نهایت، بر ظرفیت باربری نهایی پی واقع بر آن تأثیر می‌گذارد.

### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- ماسه

ماسه مورد استفاده در این پژوهش، براساس سیستم متحد، ماسه بد دانه‌بندی شده می‌باشد. در شکل ۱ و جدول ۱، ویژگی‌های ماسه مورد استفاده در این تحقیق که براساس آزمایشات استاندارد تعیین شده، نشان داده شده است [۴۰-۴۳].



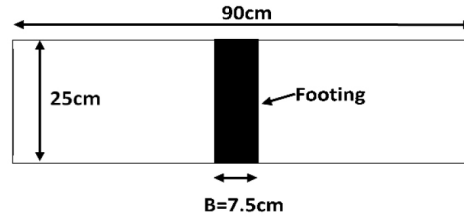
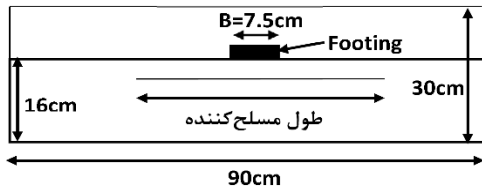
شکل ۱- نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده

جدول ۱- خصوصیات خاک مصرفی

پارامتر	مقدار	استاندارد
D <sub>10</sub> (mm)	۰/۳	ASTM D 2487
D <sub>30</sub> (mm)	۰/۵۳	ASTM D 2487
D <sub>60</sub> (mm)	۰/۹۲	ASTM D 2487
C <sub>u</sub>	۳/۰۶۷	ASTM D 2487
C <sub>c</sub>	۱/۰۱۷	ASTM D 2487
ω	۲ درصد	ASTM D 2216
φ	۳۵°	ASTM D 3080
γ	۱۶/۱ (kN/m <sup>3</sup> )	ASTM C 127
e	۰/۶۱	ASTM C 127
e <sub>min</sub>	۰/۵۵	ASTM C 127

#### ۳-۲- ژئوتکستایل

مسلح‌کننده مورد استفاده در این پژوهش از نوع ژئوتکستایل بافته شده می‌باشد. مدول الاستیک و ظرفیت



(ب) شکل شماتیک سیستم و مسلح کننده به صورت دید از کنار

(الف) شکل شماتیک از جعبه آزمایش و پی فلزی به صورت دید از بالا

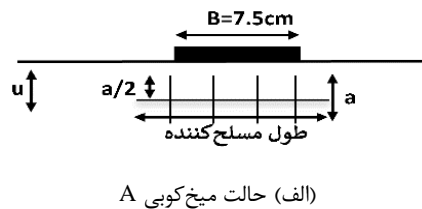
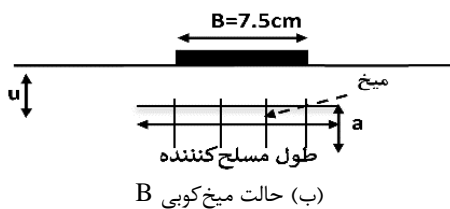


(پ) عکس سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده

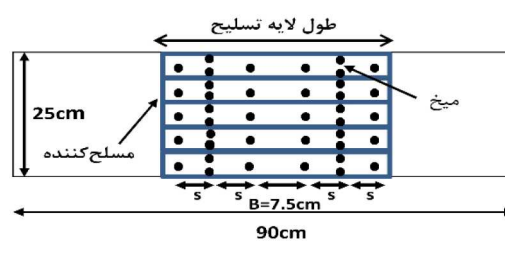
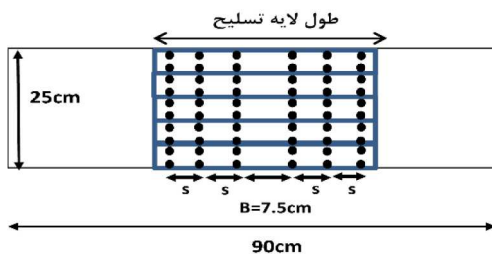
شکل ۲- جعبه آزمایش و سیستم مورد استفاده

میخ کوبی شده با دو نوع چیدمان یا آرایش ۱ و ۲ مطابق شکل ۴ مورد مطالعه قرار گرفتند. ژئوتکستایل مورد مطالعه دارای ضخامت ۱/۱۳ میلیمتر می باشد. جهت بررسی تأثیر ضخامت، با استفاده از چسب انعطاف پذیر، دو و سه لایه از مسلح کننده ژئوتکستایلی به یکدیگر متصل شدند تا ضخامت های مختلفی از مسلح کننده در دسترس باشد.

جهت مقایسه تأثیر مهار برگشتی و میخ کوبی در ظرفیت باربری پی، طول کلی مسلح کننده های مورد استفاده برابر انتخاب شدند. میخ های مورد استفاده برای پایداری و مهار مسلح کننده دارای طول ۳ و ۵ سانتیمتر بودند که در جهت عمود در مسلح کننده با دو حالت میخ کوبی A و B استفاده شدند که هر یک از حالت های A و B در شکل ۳ نشان داده شده است. هر یک از حالت های



شکل ۳- حالت های میخ کوبی



(ب) آرایش ۲

(الف) آرایش ۱

شکل ۴- چیدمان های قرارگیری میخ بر روی ژئوتکستایل

تسلیح، L، طول مسلح کننده، B، عرض پی و a، ارتفاع میخ استفاده شده می باشد) نشان داده شده است.

در شکل ۵، نحوه قرارگیری مسلح کننده ها در داخل خاک (u، فاصله مسلح کننده از زیر پی، h، فاصله لایه های

شده و در چهار مرحله متراکم شده است. وزن‌های ماسه موجود در لایه‌های مختلف به‌گونه‌ای انتخاب شده است که وزن مخصوص و تراکم نسبی کل ماسه یکسان باشد. هر لایه با استفاده از وزنه فولادی مربعی شکل به ابعاد ۱۴×۱۴ سانتیمتر، به وزن ۳/۸ کیلوگرم تراکم داده شده است. برای تراکم هر لایه، وزنه مذکور ۵۰ بار از ارتفاع ۱۵ سانتیمتر رها شده است به‌گونه‌ای که انرژی تراکم تمامی مدل‌ها با هم برابر بوده است. بارگذاری پی با نرخ ۱ میلیمتر بر دقیقه اعمال شد. برای اطمینان یافتن از صحت نتایج آزمایش‌ها، هریک از آزمایش‌ها حداقل ۳ بار تکرار شده است. با توجه به داده‌های پژوهش‌های پیشین، ضخامت لایه‌های اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۵، ۳ و ۳ سانتیمتر انتخاب گردیده است. وزن لایه‌های ماسه موجود در لایه‌های اول و دوم ۲۰/۱ کیلوگرم و برای لایه‌های سوم و چهارم ۱۲/۱ کیلوگرم می‌باشد [۲۶]. اساس انتخاب ضخامت لایه‌های خاک ریزی، محل قرارگیری مسلح‌کننده‌ها بوده است تا در تمامی مدل‌های مسلح و غیرمسلح، روش تراکم یکسان باشد.

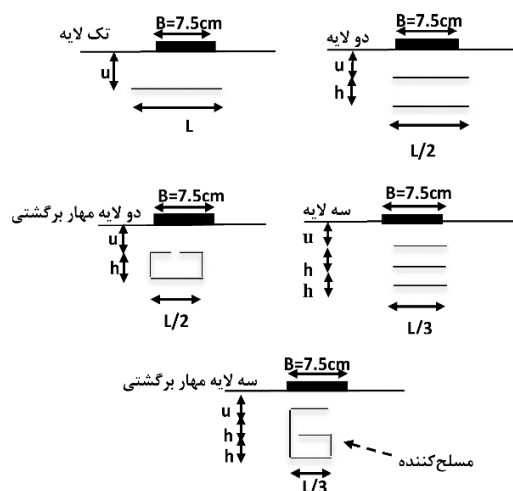
### ۳-۶- آنالیز ابعادی

در مدل‌سازی‌های فیزیکی توجه به تشابه ابعادی مدل با مقیاس واقعی بایستی در نظر گرفته شود. با توجه به قضیه پی-بوکینگهام، اگر در یک مدل فیزیکی تعداد  $m$  متغیر تأثیر داشته باشند که از نظر ابعادی دارای  $n$  بعد باشند. کلیه متغیرهای حاکم بر آن مدل را می‌توان با  $(m-n)$  متغیر بدون بعد بیان کرد. متغیرهای تأثیرگذار در ظرفیت باربری پی نواری روی ماسه مسلح‌شده در رابطه (۱) نشان داده شده است [۴۶]:

$$q_u = f(\phi, B, D, \gamma, t, a, u, \delta, L) \quad (1)$$

که در آن،  $\phi$ ، زاویه اصطکاک داخلی خاک،  $B$ ، عرض پی،  $D$ ، عمق مدفون پی،  $\gamma$ ، وزن مخصوص خاک،  $t$ ، مقاومت کششی مسلح‌کننده،  $a$ ، عرض مقطع مسلح‌کننده،  $u$

همچنین در شکل ۶، نمونه آزمایشگاهی میخ‌های مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۵- چینش مهار برگشتی و بدون مهار مسلح‌کننده در خاک

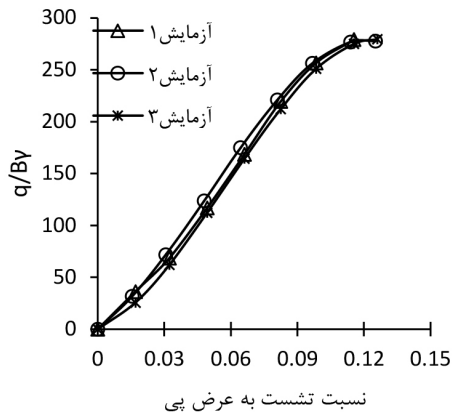
### ۳-۵- آماده‌سازی مدل‌ها

یکی از مهم‌ترین نکات مدل‌سازی فیزیکی، قابلیت تهیه مدل‌های مشابه می‌باشد تا تکرارپذیری آزمایش‌ها تضمین شود. در تمامی مراحل پژوهش سعی گردیده، نمونه‌های ساخته‌شده دارای شرایط یکسانی باشند. وزن واحد ماسه مورد استفاده در جعبه ۱۶/۱ کیلونیوتن بر مترمکعب بوده است. جهت یکسان بودن وزن مخصوص تمامی آزمایش‌ها، در حدود ۶۴/۴ کیلوگرم ماسه برای هر آزمایش استفاده شده است.



شکل ۶- الف) عکس میخ‌های مورد استفاده و ب) آرایش قرارگیری میخ و ژئوتکستایل در داخل نمونه آزمایشگاهی

ماسه در چند لایه بسته به تعداد لایه‌های مسلح‌کننده به‌صورت بارشی در جعبه آزمایش قرار داده



شکل ۷- تغییرات تنش باربری- نشست برای نمونه غیرمسلح

#### ۴-۱- تأثیر تعداد لایه‌های تقویت‌کننده بر ظرفیت باربری پی

نتایج آزمایش‌های انجام شده روی مدل‌های مسلح شده با مسلح‌کننده با انتهای آزاد (بدون مهار برگشتی)، به صورت تک لایه، دو لایه و سه لایه با طول‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتیمتری از ژئوتکستایل مصرفی با نسبت‌های طول مسلح‌کننده به عرض پی (L/B)، برابر ۲، ۴، ۶ و ۸ در شکل ۸ مشاهده می‌شود (طول مسلح‌کننده با L و عرض پی با B نشان داده شده است). مطابق شکل ۸-الف که نمودار بارگذاری- نشست را برای حالت طول مصرفی ۱۵ سانتیمتر از ژئوتکستایل نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده با مساحت ژئوتکستایل مصرفی ثابت، دارای محدودیت می‌باشد و نمی‌توان از ۲ برابر عرض پی طول مسلح‌کننده را تقسیم کرده و در تعداد لایه‌های بیشتر مورد استفاده قرار داد، زیرا با کاهش طول مسلح‌کننده از ۲ برابر عرض پی، مسلح‌کننده نمی‌تواند محدوده اثر تنش را پوشش داده و در نتیجه، کارایی مسلح‌کننده با هر بار تقسیم طول ژئوتکستایل کاهش می‌یابد. با افزایش طول مسلح‌کننده به طول‌های بزرگ‌تر از ۴B، افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده سبب افزایش بازده مسلح‌کننده شده و در نتیجه، ظرفیت باربری پی را تا حدود ۷۶٪ نسبت به خاک مسلح شده با مسلح‌کننده به صورت تک لایه‌ای افزایش می‌دهد. قابل ذکر می‌باشد که تأثیر افزایش تعداد لایه‌های

فاصله مسلح‌کننده از زیر پی،  $\delta$ ، زاویه اصطکاک ظاهری بین خاک و مسلح‌کننده و L، طول مسلح‌کننده است. در صورتی که مد گسیختگی خاک مسلح به صورت گسیختگی کششی مسلح‌کننده‌ها نباشد، می‌توان ظرفیت باربری پی را به صورت تابع بدون بعد زیر بیان کرد [۴۷]:

$$\frac{q_u}{B\gamma} = f\left(\phi, \frac{D}{B}, \frac{t}{B}, \frac{a}{B}, \frac{u}{B}, \delta, \frac{L}{B}\right) \quad (2)$$

همچنین دو پارامتر بدون بعد BPR و UBPR

برای مقایسه نتایج استفاده شده است. پارامتر BPR بیان‌کننده نسبت تنش زیر پی واقع بر روی خاک مسلح به تنش زیر پی واقع بر روی خاک غیرمسلح در یک نشست برابر می‌باشد. این پارامتر برای بررسی تأثیر تسلیح در باربری پی در نشست‌های مختلف استفاده شده است. پارامتر UBPR نیز به صورت نسبت ظرفیت باربری نهایی پی روی خاک مسلح به نسبت ظرفیت باربری نهایی پی روی خاک غیرمسلح تعریف شده است. این پارامتر نیز جهت بررسی تأثیر تسلیح در ظرفیت نهایی پی استفاده شده است.

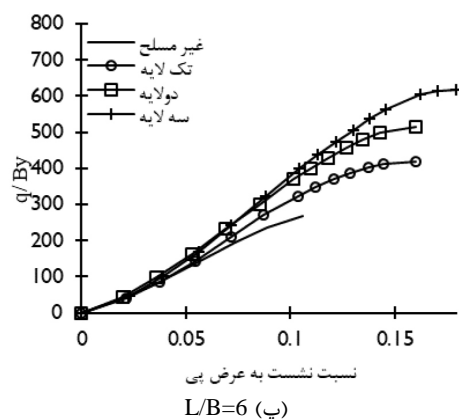
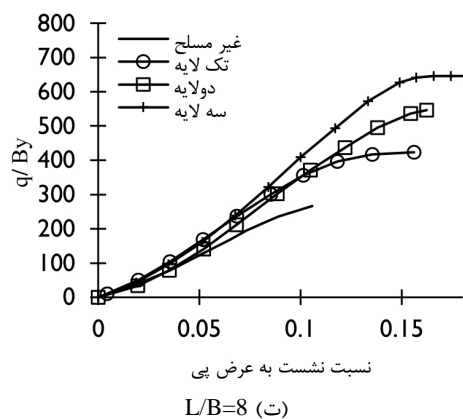
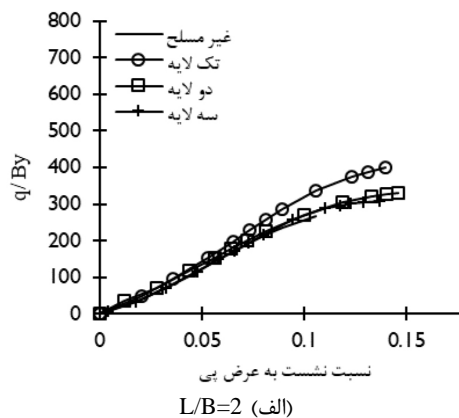
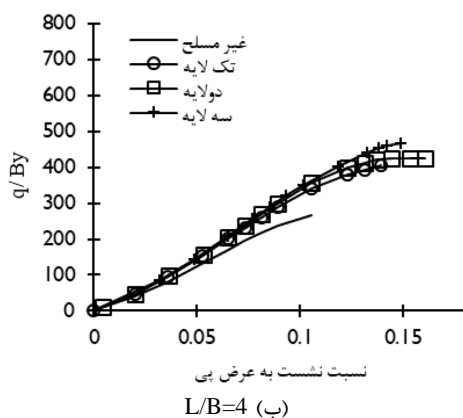
#### ۴- نتایج

در گام نخست، جهت تعیین ظرفیت باربری خاک غیرمسلح، تعدادی آزمایش برای خاک بدون مسلح‌کننده صورت گرفت که نتایج به دست آمده در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت روش تهیه نمونه‌ها تا حدود زیادی مشابه یکدیگر بوده و می‌توان نتایج را با یکدیگر مقایسه کرد. با توجه به حالت صلبیت و نسبت تقارن موجود در پی می‌توان اشاره کرد که نشست پی به صورت یکنواخت می‌باشد. ظرفیت باربری پی در حالت غیرمسلح به صورت بدون بعد ۲۷۸/۶ (معادل ۳۳۶ کیلوپاسکال) می‌باشد. برای مقایسه بهتر، نتایج آزمایش‌ها براساس پارامترهای بدون بعد  $q/B\gamma$ ، ظرفیت باربری پی و  $\gamma$ ، وزن مخصوص خاک) و نسبت نشست به عرض پی بیان شده است.



مقداری مشخص، سبب بهبود نسبت افزایش ظرفیت باربری پی در مقایسه با مقدار مسلح کننده مصرفی نمی شود.

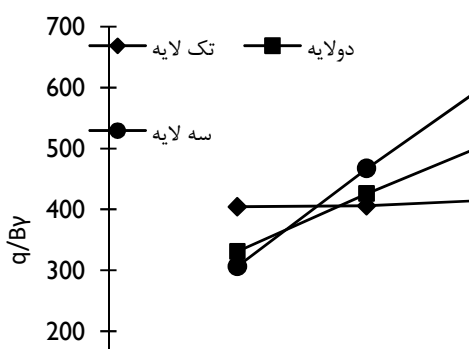
مسلح کننده در نشست های زیاد بیشتر نمایان می شود. افزایش طول مسلح کننده، سبب بهبود خواص مکانیکی و رفتاری خاک می شود ولی افزایش طول مسلح کننده از



شکل ۸- نمودار بارگذاری-نشست چیدمان های مختلف در طول های متفاوت

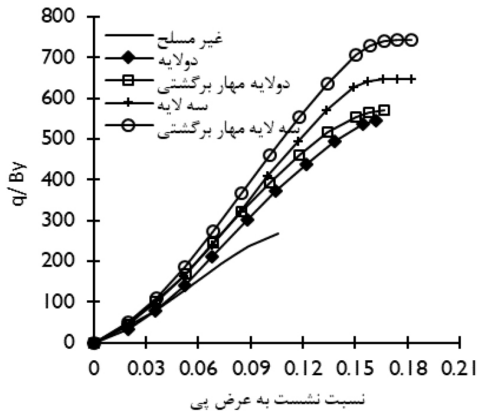
مسلح کننده ۶۰ سانتیمتر ( $L/B=8$ ) در نظر گرفته شده و سایر مدل های مورد مطالعه با این طول ارزیابی شده اند.

در شکل ۹، نمودار ظرفیت باربری خاک مسلح براساس نسبت طول های مختلف مسلح کننده به عرض پی در آرایش های تک، دو و سه لایه نشان داده شده است. با توجه به نتایج این نمودار می توان نتیجه گرفت که افزایش طول مسلح کننده از طول ۴۵ سانتیمتر به بعد، تأثیر قابل ملاحظه ای بر ظرفیت باربری نداشته است. براساس تحقیقات انجام شده توسط محققان، طول بهینه پیشنهادی برابر با  $2/5$  تا  $7$  برابر عرض پی می باشد [۱۷]. در پژوهش حاضر، با توجه به طول ۴۵ سانتیمتری از مسلح کننده که ۶ برابر عرض پی می باشد، می توان گفت نتایج به دست آمده با تحقیقات انجام شده دارای تطابق مناسبی می باشد [۲۰]. با توجه به نزدیک بودن نتایج ظرفیت باربری به دست آمده از نوارهای ۶۰ سانتیمتری و ۴۵ سانتیمتری از ژئوتکستایل با یکدیگر، حداکثر طول



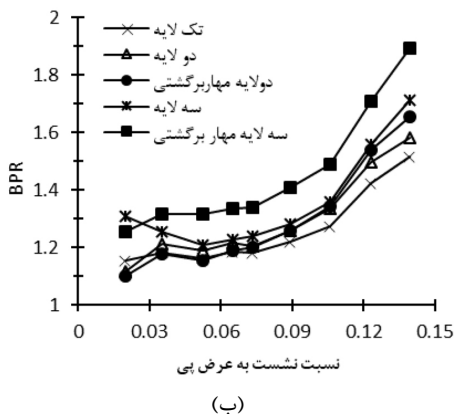
شکل ۹- نمودار ظرفیت باربری چیدمان های مختلف در نسبت های طول مسلح کننده متفاوت

۴-۲- تأثیر استفاده از چیدمان های مختلف مهار برگشتی در افزایش ظرفیت باربری



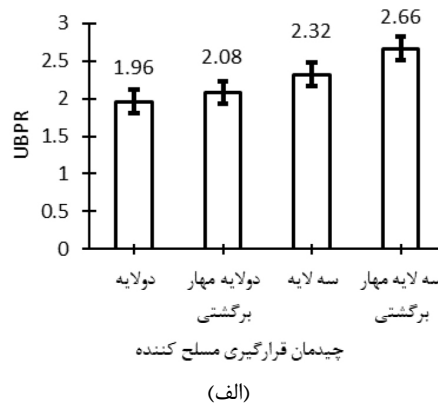
شکل ۱۰- نمودار ظرفیت باربری- نشست برای انواع حالت‌های مهار برگشتی و انتها آزاد

در شکل ۱۱- ب، نسبت ظرفیت باربری پی واقع بر خاک مسلح‌شده با آرایش‌های مختلف به ظرفیت باربری پی روی خاک غیرمسلح در نسبت نشست‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، روند افزایش ظرفیت باربری در نسبت نشست‌های کم نیز مشابه افزایش نسبت ظرفیت باربری نهایی بوده است. با توجه به نمودارهای نشان داده شده در این شکل می‌توان نتیجه گرفت که چیدمان‌های با مهار برگشتی حتی در نشست کم نیز کارایی بهتری را از خود نمایان می‌کنند.



(ب)

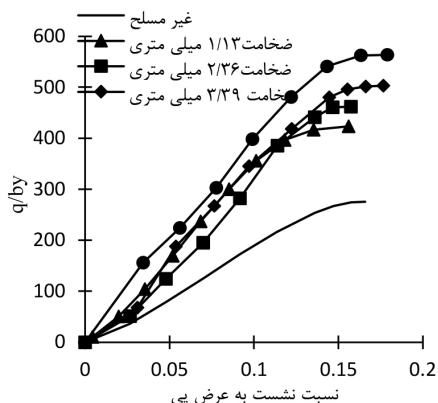
تغییر نحوه جایگذاری مسلح‌کننده در داخل خاک به‌واسطه تغییر توزیع تنش بین خاک و مسلح‌کننده، باعث تغییر در رفتار و ظرفیت باربری پی می‌شود. ظرفیت باربری پی بر روی خاک مسلح تابع تنش بین خاک و مسلح‌کننده می‌باشد. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مدل‌هایی که با مسلح‌کننده‌های استفاده شده به‌صورت مهار برگشتی تقویت شده بودند، در شکل ۱۰ آورده شده است. در شکل ۱۱- الف نیز ظرفیت باربری نسبی نهایی (UBPR) پی برای چیدمان‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱- الف، استفاده از مسلح‌کننده‌ها به‌صورت سه لایه مهار برگشتی، ۳۴ درصد ظرفیت باربری خاک غیرمسلح را نسبت به حالت مشابه سه لایه و بدون مهار برگشتی بیشتر بهبود می‌بخشد. نکته بسیار قابل توجه، مساحت مسلح‌کننده مور استفاده در این چیدمان می‌باشد. با توجه به اینکه نسبت مساحت استفاده شده در این چیدمان با سایر چیدمان‌ها کاملاً یکسان بوده، ولی ظرفیت باربری پی را تا حدود ۱۰۰ کیلوپاسکال بیشتر بهبود بخشیده است. دلیل کارایی بهتر چیدمان‌های با مسلح‌کننده مهار برگشتی، وجود بیشتر تنش محصورکننده به‌واسطه درگیری بیشتر دانه‌های خاک با یکدیگر و سطح مسلح‌کننده می‌باشد.



(الف)

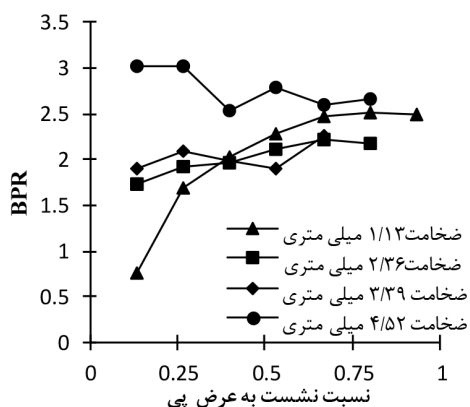
شکل ۱۱- نسبت ظرفیت (الف) باربری نهایی پی و (ب) باربری روی خاک مسلح با آرایش‌های مختلف مهار برگشتی و انتها آزاد به خاک غیرمسلح

قابل مشاهده است، افزایش ضخامت، سبب افزایش سختی نوارهای مسلح کننده می شود.



شکل ۱۲- نمودار ظرفیت باربری- نشست خاک مسلح با ضخامت های متفاوت مسلح کننده

نوارهای با سختی بیشتر در نشست های کمتر دارای کارایی و عملکرد بهتری می باشند و استفاده از آنها باید به ترتیبی باشد که در نشست های کمتر، بیشتر مورد توجه قرار بگیرند. با توجه به اینکه در این آزمایش ها گسیختگی کششی مسلح کننده ها مشاهده نشده است؛ می توان نتیجه گرفت که افزایش ظرفیت باربری صرفا به دلیل افزایش ضخامت مسلح کننده بوده است. نتایج تحقیقات انجام شده قبلی نیز افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده در اثر افزایش ضخامت آن را نشان داده است [۲۱ و ۲۷].



شکل ۱۳- نسبت ظرفیت باربری روی خاک مسلح با ضخامت های مختلف مسلح کننده به خاک غیر مسلح

#### ۴-۴- بررسی تأثیر مهار مسلح کننده توسط میخ کوبی در ظرفیت باربری پی نواری

به صورت کلی از میل مهارها، کابل ها یا میخ ها جهت

#### ۴-۳- تأثیر افزایش ضخامت مسلح کننده در ظرفیت باربری پی

ضخامت ژئوتکستایل های مورد استفاده در این تحقیق، ۱/۱۳ میلی متر بود که مشابه استاندارد ASTM D5199-12، تعیین شد [۴۸]. آزمایش های انجام شده بر روی ژئوتکستایل هایی با ضخامت های مختلف صورت گرفت تا بتوان تأثیر ضخامت را نیز در ظرفیت باربری پی مشاهده نمود. جهت ایجاد ضخامت های متفاوت مسلح کننده، با چسباندن لایه های ژئوتکستایل با استفاده از چسب رزینی انعطاف پذیر، ضخامت های مختلف مسلح کننده ایجاد شد. با این توصیف، این سری آزمایش ها علاوه بر ژئوتکستایل های تک لایه با ضخامت ۱/۱۳ میلی متر، با ژئوتکستایل های دو، سه و چهار لایه با ضخامت های ۲/۳۶، ۳/۳۹ و ۴/۵۲ میلی متر در طول ۶۰ سانتیمتری از ژئوتکستایل ( $L/B=8$ ) انجام شد. برای ایجاد ضخامت دو، سه و چهار لایه مسلح کننده نوارهای ۶۰ سانتیمتری از ژئوتکستایل به دو، سه و چهار قسمت مساوی تقسیم شده و با چسب رزین به یکدیگر متصل شدند. نتایج ظرفیت باربری حاصل از ضخامت های متفاوت ژئوتکستایل در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می شود، افزایش هر لایه از ضخامت مسلح کننده باعث افزایش ۵۰ کیلو پاسکالی ظرفیت باربری پی می شود. روند افزایش ظرفیت باربری با افزایش ضخامت در هر چهار طول مصرفی از ژئوتکستایل نیز مشاهده شده و این روند تقریبا به صورت خطی می باشد. افزایش ضخامت مسلح کننده به دو تا چهار لایه به طور متوسط در حدود ۸۰٪ ظرفیت باربری پی را نسبت به حالتی خاک بدون مسلح کننده بوده، بهبود بخشیده است.

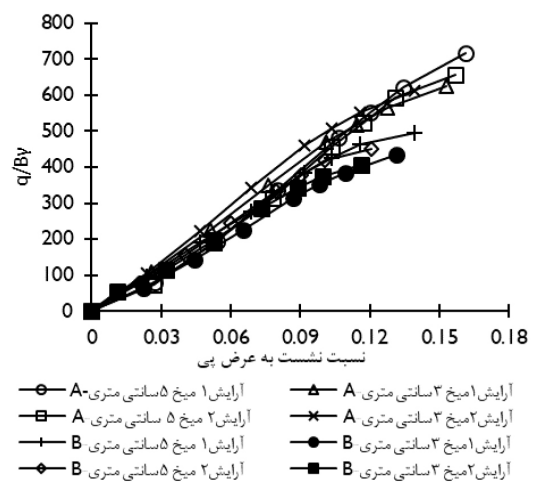
در شکل ۱۳ ظرفیت باربری پی واقع پی بر روی خاک مسلح با مسلح کننده هایی با ضخامت های متفاوت، نسبت به خاک غیر مسلح در نسبت نشست های مختلف نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل

آرایش ۲ به دلیل عدم وجود همپوشانی میخ‌ها مقاومت پی در برابر بارهای وارد بیشتر می‌باشد. در شکل ۱۵- الف، نسبت ظرفیت باربری پی واقع بر خاک مسلح شده با آرایش‌های مختلف به ظرفیت باربری پی روی خاک غیرمسلح در نسبت نشست‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، روند افزایش ظرفیت باربری در نسبت نشست‌های کم نیز مشابه افزایش نسبت ظرفیت باربری نهایی بوده است. با توجه به نمودارهای نشان داده شده در این شکل می‌توان نتیجه گرفت که میخ ۵ سانتیمتری حتی در نشست‌های کم نیز عملکرد بهتری در مقایسه با حالتی که میخ ۳ سانتیمتری استفاده شده داشته‌اند. در شکل ۱۵- ب، ظرفیت باربری نهایی هر یک از حالت‌های میخ‌کوبی و چیدمان نسبت به خاک غیرمسلح نشان داده شده است. با توجه به این نمودار می‌توان اشاره کرد که آرایش قرارگیری ۱ و حالت میخ‌کوبی A، مناسب‌ترین و بهینه‌ترین نوع به کارگیری میخ می‌باشد.

### ۵- بحث

خلاصه نتایج تمامی آزمایشات انجام شده در این پژوهش در جدول ۳ آورده شده است. نکته بسیار مهمی که در این نتایج مشاهده می‌شود، در تمامی طول‌های مصرفی ژئوتکستایل به غیر از یک طول، با تقسیم مساحت مسلح‌کننده مصرفی و استفاده در چندین لایه، چه به صورت چسباندن لایه‌ها به یکدیگر و چه مطابق چیدمان شکل ۵، بهره‌وری مسلح‌کننده‌ها افزایش یافته است. مقایسه حالت سه لایه با سه لایه مهار برگشتی و دو لایه با دو لایه مهار برگشتی نشان می‌دهد گرچه مساحت مسلح‌کننده مورد استفاده در همه آرایش‌ها یکسان است، ولی ظرفیت باربری پی در چیدمان‌های مهار برگشتی بیشتر از انتهای آزاد می‌باشد، به طوری که هرچه تعداد لایه‌های محصور بیشتر باشد، ظرفیت باربری در حدود ۷ درصد نسبت به حالت مشابه و بدون مهار برگشتی افزایش

مهار و پایدارسازی مسلح‌کننده‌ها جهت افزایش کارایی آنها در سیستم خاک مسلح استفاده می‌شود که با توجه به نوع و تعداد المان مهاری استفاده شده، خاک رفتاری متفاوت را از خود بروز می‌دهد. در این تحقیق، تأثیر استفاده از میخ‌کوبی نوارهای ژئوتکستایل در ظرفیت باربری پی بررسی شده است. برای این منظور، تأثیر مهار نوارهای ژئوتکستایل با میخ‌هایی به ابعاد ۳ و ۵ سانتیمتر مطابق با آرایش ۱ و ۲ در دو حالت قرارگیری A و B (شکل ۳ و ۴) در ظرفیت باربری پی بررسی شده است. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۱۴ آورده شده است. حالت قرارگیری A که در آن نصف بعد میخ در قسمت بالا و نصف بعد دیگر آن در قسمت پایین ژئوتکستایل قرار می‌گیرد، بهره‌وری بسیار بیشتری نسبت به حالت قرارگیری B که میخ تا انتها در داخل ژئوتکستایل فرو رفته را نشان داد. در تمامی آرایش‌ها و بعدها مصرفی میخ، نسبت ظرفیت باربری در حالت A نسبت به حالت B، ۴۵ درصد بیشتر بوده که نشان از پایداری و مهار بهتر سیستم در این حالت می‌باشد.

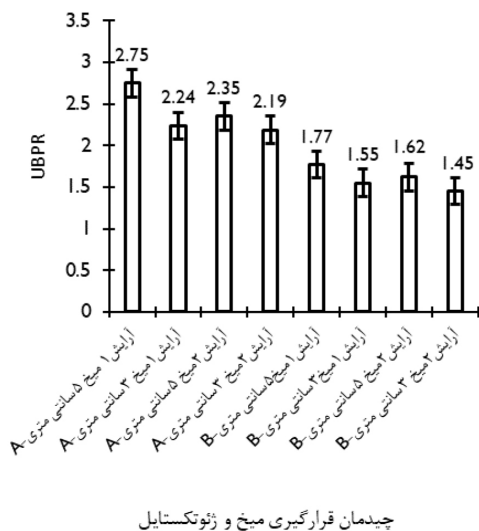


شکل ۱۴- نمودار ظرفیت باربری- نشست برای حالت‌ها و

آرایش‌های مختلف میخ‌کوبی

با افزایش بعد میخ از ۳ به ۵ سانتیمتر به دلیل افزایش مقاومت میخ‌ها در برابر بارهای وارده، ظرفیت باربری تا حدود ۲۷ درصد بیشتر افزایش یافته است. در آرایش ۱، با وجود استفاده از تعداد میخ کمتر نسبت به

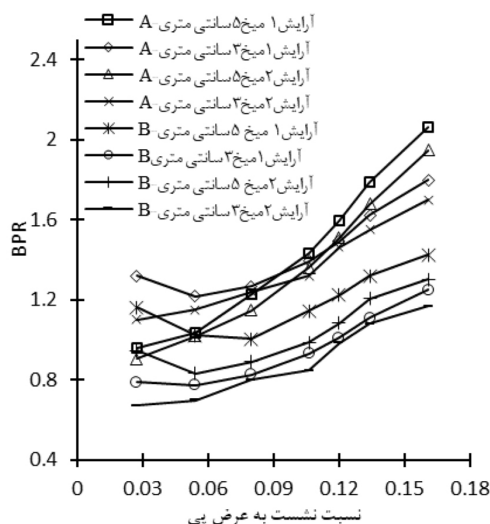
ولی نحوه قرارگیری میخ (آرایش) و حالت میخ کوبی اهمیت فوق العاده‌ای دارد، زیرا می‌توان با استفاده از چیدمان و حالت مناسب میخ کوبی، ظرفیت باربری را تا حدود ۲۸۰٪ بهبود بخشید.



(ب)

می‌یابد. علت این پدیده در اندرکنش بین دانه‌های خاک و سطح مسلح کننده می‌باشد.

بر اساس نتایج جدول ۳، میخ کوبی، ظرفیت باربری پی را به‌طور میانگین ۳۲۷ کیلوپاسکال افزایش داده است،



(الف)

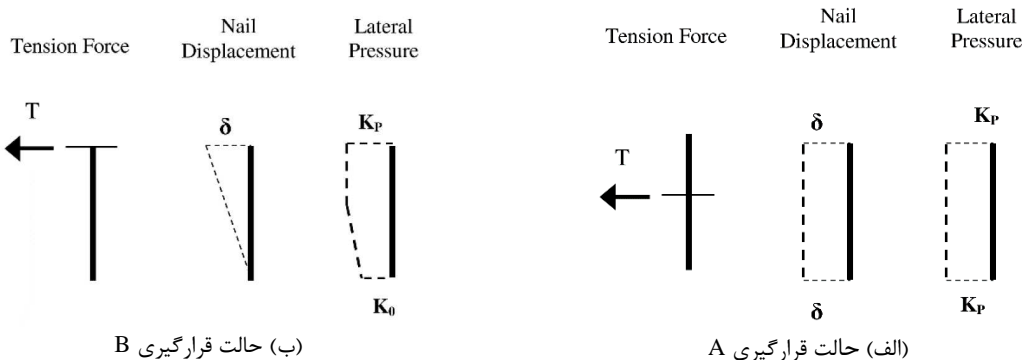
شکل ۱۵- نسبت (الف) ظرفیت باربری و (ب) حداکثر ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح با آرایش‌ها و حالت‌های مختلف میخ کوبی به خاک غیرمسلح

جدول ۳- تأثیر آرایش مسلح کننده در بازده تسلیح

چیدمان	$q_u$ (kPa)	$a/B$	$q_u / B \gamma$	تعداد میخ مورد استفاده	نسبت افزایش ظرفیت باربری به خاک غیرمسلح
غیرمسلح	۳۳۶	صفر	۲۷۹	-	۱
تک لایه	۵۱۰	۳/۳۳	۴۲۲	-	۱/۵۲
دولایه	۶۵۹	۳/۳۳	۵۴۵	-	۱/۹۶
دولایه مهار برگشتی	۷۰۰	۳/۳۳	۵۸۰	-	۲/۰۸
سه لایه	۷۸۰	۳/۳۳	۶۴۶	-	۲/۳۲
سه لایه مهار برگشتی	۸۹۸	۳/۳۳	۷۴۴	-	۲/۶۶
ضخامت ۲/۳۶ میلیمتری	۵۵۷	۳/۳۳	۴۶۱	-	۱/۶۶
ضخامت ۳/۳۹ میلیمتری	۶۱۵	۳/۳۳	۵۰۹	-	۱/۸۳
ضخامت ۴/۵۲ میلیمتری	۶۵۳	۳/۳۳	۵۴۱	-	۱/۹۴
مسلح کننده آرایش ۱ با میخ ۳ سانتیمتری حالت A	۷۵۵	۳/۳۳	۶۲۵	۴۰	۲/۲۴
مسلح کننده آرایش ۱ با میخ ۵ سانتیمتری حالت A	۸۶۵	۳/۳۳	۷۱۶	۴۰	۲/۷۵
مسلح کننده آرایش ۲ با میخ ۵ سانتیمتری حالت A	۷۹۲	۳/۳۳	۶۵۶	۶۰	۲/۳۵
مسلح کننده آرایش ۲ با میخ ۳ سانتیمتری حالت A	۷۳۹	۳/۳۳	۶۱۲	۶۰	۲/۱۹
مسلح کننده آرایش ۱ با میخ ۳ سانتیمتری حالت B	۵۲۴	۳/۳۳	۴۳۴	۴۰	۱/۵۵
مسلح کننده آرایش ۱ با میخ ۵ سانتیمتری حالت B	۵۹۷	۳/۳۳	۴۹۵	۴۰	۱/۷۷
مسلح کننده آرایش ۲ با میخ ۵ سانتیمتری حالت B	۵۴۶	۳/۳۳	۴۵۲	۶۰	۱/۶۲
مسلح کننده آرایش ۲ با میخ ۳ سانتیمتری حالت B	۴۸۹	۳/۳۳	۴۰۵/۶	۶۰	۱/۴۵

در قسمت تحتانی می‌شود که دلیل این پدیده کاهش  $K_p$  به مقدار  $K_0$  در طول میخ می‌باشد. علاوه بر نحوه قرارگیری عمقی میخ‌ها، آرایش یا چیدمان قرارگیری آنها نیز تأثیر بسیاری در نتایج دارد. در شکل ۱۷-الف، سازوکار تنش به‌وجود آمده نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل قابل مشاهده می‌باشد در آرایش ۱، عدم قرارگیری پشت سر هم میخ‌ها، منجر به کاهش همپوشانی میخ‌ها شده و در نتیجه راندمان هر میخ افزایش می‌یابد. همچنین در شکل ۱۷-ب مشاهده می‌شود که در آرایش ۲ به دلیل همپوشانی به‌وجود آمده در ناحیه تأثیر میخ‌ها، محدوده تأثیر میخ‌ها با یکدیگر تداخل داشته و حرکت توده خاک محصور بین میخ‌ها، مشابه اثر گروه در شمع‌ها تحت بارگذاری جانبی، سبب می‌شود که میخ‌ها نتوانند با حداکثر کارایی مقاومت نشان دهند.

علت این پدیده را می‌توان با استفاده از شکل ۱۶ توضیح داد. شکل ۱۶-الف، نمایانگر حالتی از ارتفاع قرارگیری میخ می‌باشد (حالت A) که ۵۰ درصد از ارتفاع میخ در قسمت بالای ژئوتکستایل و ۵۰ درصد دیگر آن در قسمت پایین ژئوتکستایل قرار گرفته است. زمانی که میخ به این صورت در داخل ژئوتکستایل و خاک جایگذاری می‌شود، همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، تنش جانبی در شرایط پسبو ( $K_p$ ) در هر دو قسمت میخ فعال شده و سازوکاری را ایجاد می‌کنند که کل بعد میخ در اثر بارهای وارده مقاومت کرده و در صورت جابه‌جایی کل میخ به‌صورت یکسان جابه‌جا می‌شود. ولی زمانی که میخ به‌صورت کامل در داخل ژئوتکستایل فرو می‌رود (حالت B) و کل طول میخ در زیر ژئوتکستایل قرار می‌گیرد، در قسمت انتهایی میخ به دلیل نیروهای وارد، لنگر پیچشی ایجاد شده و سبب به وجود آمدن ناپایداری



شکل ۱۶- نمودار توزیع تنش در خاک در اثر جابه‌جایی میخ‌های مهاری در حالت‌های مختلف و نحوه عکس‌العمل سیستم



شکل ۱۷- عملکرد میخ‌ها در (الف) آرایش قرارگیری ۱ و (ب) آرایش قرارگیری ۲

نشان می‌دهد تقسیم طول مسلح‌کننده‌ها و استفاده از آنها در تعداد لایه‌های بیشتر سبب توزیع تنش مناسب‌تر در زیر پی شده و ظرفیت باربری پی را می‌تواند تا حدود ۲۳۲ درصد بهبود بخشد. تقسیم طول مسلح‌کننده دارای حدی مشخص ( $4B$ ) می‌باشد. مسلح‌کننده‌هایی با طول کمتر از  $4B$  بازده کمتری داشته‌اند. استفاده از مسلح‌کننده‌ها

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر افزایش ضخامت و روش‌های مختلف مهاری در جهت افزایش بازده نوارهای مسلح‌کننده به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌های انجام‌شده با سه تکرار صورت گرفت تا بتوان از صحت نتایج اطمینان کسب کرد. نتایج این تحقیق

دانه‌های خاک قفل‌وبست بهتری با یکدیگر داشته و سبب بهبود ظرفیت باربری پی تا حدود ۹۴ درصدی شد. علاوه بر این، میخ کوبی نیز به‌عنوان روشی جهت افزایش مقاومت خاک مسلح مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از میخ کوبی روش مناسبی جهت افزایش ظرفیت باربری پی بوده، ولی ابعاد هندسی میخ نباید از مقداری مشخص کمتر باشد، زیرا توانایی مهار یا پایدارسازی مسلح‌کننده را نخواهد داشت. چیدمان قرارگیری میخ و نحوه میخ‌کوبی اهمیت فوق‌العاده‌ای در ظرفیت باربری پی دارد.

به‌صورت مهار برگشتی، سبب ایجاد محصورشدگی بین دانه‌های خاک با یکدیگر و سطح مسلح‌کننده می‌شود که نتیجه آن، افزایش ظرفیت باربری پی و عملکرد مناسب‌تر سیستم در برابر بارهای وارده می‌باشد. هرچه طول و تعداد لایه‌های مهار برگشتی بیشتر می‌شود ظرفیت باربری سیستم نیز افزایش می‌یابد. تقسیم طول مسلح‌کننده و افزایش ضخامت آن موضوع دیگری بود که مورد بررسی قرار گرفت. با چسباندن نوارهای مسلح‌کننده به یکدیگر و افزایش ضخامت آنها تا ۴/۵۲ میلیمتری به دلیل ایجاد امکان نفوذ بیشتر دانه‌های خاک در بین مسلح‌کننده،

## References

- [1] Toufigh, V., Saeid, F., Toufigh, V., Ouria, A., Desai, C. S., & Saadatmanesh, H. (2014). Laboratory study of soil-CFRP interaction using pull-out test. *Geomechanics and Geoengineering*, 9(3), 208-214. doi: 10.1080/17486025.2013.813650
- [2] Sommers, A. N., & Viswanadham, B. V. S. (2009). Centrifuge model tests on the behavior of strip footing on geotextile-reinforced slopes. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(6), 497-505. doi: 10.1016/j.geotexmem.2009.05.002
- [3] Naeini, S. A., & Gholampoor, N. (2014). Cyclic behaviour of dry silty sand reinforced with a geotextile. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(6), 611-619. doi: 10.1016/j.geotexmem.2014.10.003
- [4] Kaveh, A., Hoseini Vaez, S. R., Hosseini, P., & Fallah, N. (2016). Detection of damage in truss structures using Simplified Dolphin Echolocation algorithm based on modal data. *Smart Structures and Systems*, 18(5), 983-1004. doi: 10.12989/sss.2016.18.5.983
- [5] Ouria, A., Toufigh, V., Desai, C., Toufigh, V., & Saadatmanesh, H. (2016). Finite element analysis of a CFRP reinforced retaining wall. *Geomechanics and Engineering*, 10(6), 757-774. doi: 10.12989/gae.2016.10.6.757
- [6] Goodarzi, S., & Shahnazari, H. (2019). Strength enhancement of geotextile-reinforced carbonate sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2), 128-139. doi: 10.1016/j.geotexmem.2018.12.004
- [7] Broda, J., Franitza, P., Herrmann, U., Helbig, R., Große, A., Grzybowska-Pietras, J., & Rom, M. (2020). Reclamation of abandoned open mines with innovative meandricly arranged geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(3), 236-242. doi: 10.1016/j.geotexmem.2019.11.003
- [8] Lee, S. L., Mannan, M. A., & Ibrahim, W. H. W. (2020). Shear strength evaluation of composite pavement with geotextile as reinforcement at the interface. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(3), 230-235. doi: 10.1016/j.geotexmem.2019.11.002
- [9] Toufigh, V., Desai, C. S., Saadatmanesh, H., Toufigh, V., Ahmari, S., & Kabiri, E. (2014). Constitutive modeling and testing of interface between backfill soil and fiber-reinforced polymer. *International Journal of Geomechanics*, 14(3), 04014009. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000298
- [10] Davarifard, S., & Tafreshi, S. M. (2015). Plate load tests of multi-layered geocell reinforced bed considering embedment depth of footing. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 105-110. doi: 10.1016/j.proeps.2015.08.027
- [11] Mehrjardi, G. T., Ghanbari, A., & Mehdizadeh, H. (2016). Experimental study on the behaviour of geogrid-reinforced slopes with respect to aggregate size. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(6), 862-871. doi: 10.1016/j.geotexmem.2016.06.006
- [12] Oliaei, M., & Kouzegaran, S. (2017). Efficiency of cellular geosynthetics for foundation reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(2), 11-22. doi: 10.1016/j.geotexmem.2016.11.001
- [13] Mehrpajouh, A., & Moghaddas Tafreshi, S. N. (2017). Effects of soil density and geotextile reinforcement on California bearing ratio of sandy soil. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33(3.1), 95-103. doi: 10.24200/j30.2017.20069 [In Persian]
- [14] Dastani, S., & Haghbin, M. (2020). Experimental investigation of bearing capacity of circle footing on sand slope reinforced with geogrid. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 6(3), 105-123. doi: 10.22075/jtie.2020.19015.1427 [In Persian]

- [15] Kazemzadeh, M., Zad, A., & Yazdi, M. (2022). Numerical Modeling of Improvement of Soft Soil with Stone Columns under High-Speed Train Crossing. *Civil Infrastructure Researches*, 7(2), 157-168. doi: **10.22091/cer.2021.7397.1304** [In Persian]
- [16] Nikkhah, M., Hosseini, M. M., & Abrishami, S. (2022). Laboratory study effect of the width of the foundation, the relative density of sand and pressure on the settlement of strip footings. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 8(2), 131-148. doi: **10.22075/jtie.2022.24827.1564** [In Persian]
- [17] Bagherzadeh Khalkhali, A., Makarchian, M., Askari, M., & Ganjian, N. (2022). Evaluation of the Thin Layer Effect on the Ultimate Bearing Capacity of Strip Foundation on Sand. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(7), 543-546. doi: **10.22060/ceej.2022.20657.7490**
- [18] Basudhar, P. K., Saha, S., & Deb, K. (2007). Circular footings resting on geotextile-reinforced sand bed. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(6), 377-384. doi: **10.1016/j.geotexmem.2006.09.003**
- [19] Abu-Farsakh, M., Chen, Q., & Sharma, R. (2013). An experimental evaluation of the behavior of footings on geosynthetic-reinforced sand. *Soils and Foundations*, 53(2), 335-348. doi: **10.1016/j.sandf.2013.01.001**
- [20] Cicek, E., Guler, E., & Yetimoglu, T. (2015). Effect of reinforcement length for different geosynthetic reinforcements on strip footing on sand soil. *Soils and Foundations*, 55(4), 661-677. doi: **10.1016/j.sandf.2015.06.001**
- [21] Ouria, A., Karamzadegan, S., & Emami, S. (2021). Interface properties of a cement coated geocomposite. *Construction and Building Materials*, 266, 121014. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2020.121014**
- [22] Ouria, A., Mahmoudi, A., & Sadeghpour, H. (2020). Effect of the geotextile arrangement on the bearing capacity of a strip footing. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6(3), 1-14. doi: **10.1007/s40891-020-00219-w**
- [23] Ouria, A., & Heidarly, E. (2021). Laboratory Investigation of the Effect of the Geotextile Placement Pattern on the Bearing Capacity of Footing on Reinforced Sand. *Modares Civil Engineering journal*, 21(3), 21-34. [In Persian]
- [24] Toufigh, V., Ouria, A., Desai, C. S., Javid, N., Toufigh, V., & Saadatmanesh, H. (2016). Interface behavior between carbon-fiber polymer and sand. *Journal of Testing and Evaluation*, 44(1), 385-390. doi: **10.1520/JTE20140153**
- [25] Ouria, A., Sadeghpour, H., Fahmi, A. (2022). Laboratory Modeling of a Spread Footing on Sand Reinforced by Strips of Carbon Fiber Reinforcement. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. doi: **10.22034/jcee.2022.50268.2116** [In Persian]
- [26] Ouria, A., & Mahmoudi, A. (2018). Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(1), 29-39. doi: **10.1016/j.geotexmem.2017.09.003**
- [27] Ouria, A., Emami, S., & Karamzadegan, S. (2021). Laboratory Investigation of the Effect of the Cement Treatment of the Interface and the Thicknesses of Reinforcement on its Pull-out Capacity. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(11), 2831-2846. doi: **10.22060/ceej.2019.16191.6149**
- [28] Xu, Y., Williams, D. J., & Serati, M. (2018). Influence of anchorage angles on pull-out resistance of geotextile wrap around anchorage. *Geosynthetics International*, 25(4), 378-391. doi: **10.1680/jgein.18.00022**
- [29] Jaiswal, S., & Chauhan, V. B. (2021). Response of strip footing resting on earth bed reinforced with geotextile with wraparound ends using finite element analysis. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2), 1-9. doi: **10.1007/s41062-021-00486-0**
- [30] Raja, M. N. A., & Shukla, S. K. (2021). Experimental study on repeatedly loaded foundation soil strengthened by wraparound geosynthetic reinforcement technique. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(4), 899-911. doi: **10.1016/j.jrmge.2021.02.001**
- [31] Ouria, A., & Sadeghpour, H. (2022). Laboratory and numerical simulation of the effect of wraparound anchorage of reinforcements on the bearing capacity of spread footing. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 37.2(4.1), 93-104. doi: **10.24200/j30.2021.57629.2922** [In Persian]
- [32] Jaiswal, S., Srivastava, A., & Chauhan, V. B. (2022). Performance of strip footing on sand bed reinforced with multilayer geotextile with wraparound ends. In *Ground improvement and reinforced soil structures*, 15, 721-732. Springer, Singapore. doi: **10.1007/978-981-16-1831-4\_64**
- [33] Kazi, M., Shukla, S. K., & Habibi, D. (2016). Behaviour of an embedded footing on geotextile-reinforced sand. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 169(2), 120-133. doi: **10.1680/grim.14.00022**
- [34] Aria, S., Kumar Shukla, S., & Mohyeddin, A. (2019). Numerical investigation of wraparound geotextile reinforcement technique for strengthening foundation soil. *International Journal of Geomechanics*, 19(4), 04019003. doi: **10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001361**
- [35] Chang, G. M. (2007). Study on the Application of Composite soil-nailing in Loess Excavations. *Xi'An: Chang'An University*.



- [36] Khazaie, J., & Mirnaghizadeh, M. (2017). The effect on the stabilization excavation stairs by nailing With regard to various behavioral models. *Civil Infrastructure Researches*, 3(1), 31-37. **doi: 10.22091/cer.2017.554.1027** [In Persian]
- [37] Ghanbari, A., & Mousavi Moallem, S. A. (2022). Design Charts for Estimating Response of RC Frame Building Adjacent to Deep Excavation Supported by Soil-Nailing Method. *Civil Infrastructure Researches*, 7(2), 93-105. **doi: 10.22091/cer.2021.7217.1278** [In Persian]
- [38] Prashant, A., & Mukherjee, M. (2010). *Soil nailing for stabilization of steep slopes near railway tracks*. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur.
- [39] Wang, J., Cao, J., Hu, J., & Liu, H. (2008, October). Application of flac in foundation pit with compound soil nailing support. In *2008 Fourth International Conference on Natural Computation*, 4, 331-336. **doi: 10.1109/ICNC.2008.515**
- [40] ASTM, D3080-04. (2004). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- [41] ASTM, D2216-05. (2005). *Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*. American Society for Testing and Materials
- [42] ASTM, C127-07. (2007). *Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate*. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
- [43] ASTM, D2487. (2011). *Standard classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. Annual Book of ASTM Standards, 4, 206-215.
- [44] ASTM D4595-11. (2011). *Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method*. American society for testing materials.
- [45] ASTM D5261-10. (2018). *Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [46] Wood, D. M. (2017). *Geotechnical modelling*. CRC press.
- [47] Dixit, R. K., & Mandal, J. N. (1993). Dimensional analysis and modelling laws for bearing capacity of reinforced and unreinforced soil. *Construction and Building Materials*, 7(4), 203-205. **doi: 10.1016/0950-0618(93)90003-U**
- [48] ASTM D5199. (2012). *Standard test method for measuring the nominal thickness of geosynthetics*. ASTM International, West Conshohocken, PA