



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

## Experimental and numerical investigation on the effect of overburden and soil compaction on nail pullout strength in earth reinforced with nailing

Saeed Hashemi<sup>1</sup>, Jafar Bolouri Bazaz<sup>2,\*</sup>

1. Ph.D., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

### Article info

#### Article history

Received: 14 November 2022

Accepted: 17 February 2023

#### Keywords:

Soil Nailing, Overburden, Soil Density, Nail Pullout.



### Abstract

One of the most important issues in urban areas is the stabilization of vertical and sloping earth walls. Nailing technique used for slope stabilization, has become popular day by day in urban environments, around the world. Normal drilling wells, even at shallow depths, have collapsed many times when subjected to applied loads, resulting in reduced work progress, loss of life and unpredictable economic costs. On the other hand, the collapse of drilling holes causes to loosen the soil structure and reduce its density, which in turn causes more horizontal and vertical deformations to occur in the earth's surface. This research, introduces the deep excavation stabilization with the aid of laboratory and numerical modeling and presents the effect of overburden and soil density on the nails behavior. It was observed that under the conditions of the same soil density, the pullout capacity of all types of nails increases with the increase of the overburden pressure applied on the soil. For example, by increasing the overburden from 0.2 to 0.5 kg/cm<sup>2</sup>, in a soil sample with a specific weight of 1.4 gram/cm<sup>3</sup>, it causes a 100% increase, and in a soil sample with a specific weight of 1.6 gram/cm<sup>3</sup> causes a 150% increase in the nail pullout capacity. Also, under the same conditions of the applied overburden pressure, the pullout capacity of the nails will increase due to the increase in the specific dry weight of the soil, which is an increase in the density of the soil. In other words, by increasing the specific dry weight of the soil from 1.4 to 1.6 gram/cm<sup>3</sup>, by applying overburden of 0.2, 0.5 and 0.8 kg/cm<sup>2</sup>, the pullout capacity of the nail increases by 16, 35 and 40 percent compared to the initial state.

### Introduction

With the increasing population growth and the lack of suitable urban space for construction, the desire to build high-rise buildings has increased, which in turn has increased the need for excavation, suggesting different methods for their stabilization. One of them is the stabilization method by nailing system. In this technique, unstable soil walls

caused by excavation are stabilized, using a grid of steel rebar that are sunk into the soil to a certain depth, covered with cement mortar (Kazemi and Bolouri, 2018). Nowadays, the soil nailing method has replaced the conventional structures as one of the retaining walls. Stabilization in the nailing method is that first nails (reinforcement) are placed inside the pit wall followed by cement

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.106251>

\*Corresponding author: Jafar Bolouri Bazaz; E-mail: bolouri@um.ac.ir

How to cite this article: Hashemi, S., Bolouri Bazaz, J., 2023. Experimental and numerical investigation on the effect of overburden and soil compaction on nail pullout strength in earth reinforced with nailing. Kharazmi Journal of Earth Sciences 8(2), 117- 142. <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.106251>



injection operation around the nails. The priorities of this method, such as speed and ease of work and low economic cost, have made it one of the best methods for protecting the walls of excavations. In the current research, the results of a series of tests conducted under different parameters, including two different densities, various soil densities and finally overburden pressure were examined. To simulate the test results numerically, the Plaxis 3D Foundation finite element software was employed for modeling.

### Materials and methods

The Mohr-Coulomb failure criterion is employed to study the efficiency of the full length of the nail in a slope. Therefore, if full-length nails with non-uniform conditions are used for the pullout test, the effects of the aforementioned parameters cannot be accurately studied. For a short length of the nail, the stress conditions are almost uniform along the length of the nail. Therefore, the effects of different factors on the pullout

strength can be investigated by means of a short length of nails. This can be done by using an extraction box in which the nail is placed in a block of soil. The results of the test and the following relationship can be used to determine the tensile strength

$$q_s = P / (\pi DL)$$

P: Final pullout force

D: Drilled hole diameter

L: Nail length

### Arrangement of experiments

In order to perform nailing tests in the soil, it was necessary to build a device in which a nail can be embedded in the soil and have the possibility of inserting the necessary forces as overburden and also pulling out the nail. Therefore, the laboratory arrangement shown in the figure below was made to perform nail pullout tests (Soil Nailing, 2002). The various components and parts of this device include: rigid reaction frame, soil holding tank, hydraulic jack, force gauge, displacement gauge and reading device.



Fig. 2. Laboratory setup



Fig. 1. The soil tank

### Plaxis 3D Foundation software

In two-dimensional analysis, it is possible to choose two types of 6-node and 15-node

triangular elements in the analysis, and the default element in this software is the 6-node element. 15-node elements are used to achieve

more accuracy in the calculations of stress and load and rupture (especially in geometry). In the Plaxis 3D Foundation software, the method of obtaining the reliability coefficient can be used to calculate the stability coefficient.

## Results and Discussion

### Effect of applied overburden pressure

The state of stresses created in the test box is as shown in Figure 3. As can be seen, the stress distribution at the top of the test box is almost equal to the applied stress and decreases with distance from the soil surface. With the presence of a rigid wall on both sides of the test box, it can be seen that the amount of stress on the sides is almost equal to zero and due to the friction of the soil in this area with the rigid wall, the soil has not settled and there is no stress from the tension.

### Effect of soil density

As it can be seen from the results, the increase in soil density under different loads results in the nail pullout capacity. The effect of soil density on the pressure of higher applied overburden is far greater than the effect of this parameter on the pressure of lower applied overburden.

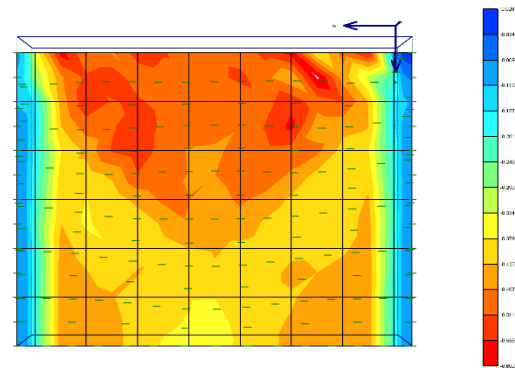


Fig. 3. Stress variations in the depth of the model



## Conclusions

In the current research, based on the experimental and numerical modeling results, the interface coefficient of soil and mortar ( $R_{int}$ ) was found to be about 0.65. Also the pullout capacity of nails increases with the increase of the overburden pressure and increases due to the increase in the soil density. With the increase in pressure caused by the increase in the applied overburden, the soil density follows an increasing trend leading to an increase in the internal friction angle and soil cohesion magnitudes.

## References

- Kazemi M., Bolouri B. J., 2018. A curtain traveling pluviator to reconstitute large scale sand specimens, *Geomechanics and Engineering*, 14 (2), 131-139.
- Soil Nailing, 2002. ISSMFE-TC-17, 1-13.

### CRediT authorship contribution statement

 <b>Saeed Hashemi</b>	Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing
 <b>Jafar Bolouri Bazaz</b>	Conceptualization, Methodology, Writing - Review & Editing, Supervision, Project administration



## بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر سربار و تراکم خاک بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ در زمین - های مسلح شده با میخ کوبی

سعید هاشمی<sup>۱</sup>، جعفر بلوری بزاز\*<sup>۲</sup>

۱. دکتری، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران  
۲. دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>تاریخچه مقاله</b> دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸</p> <p><b>واژه های کلیدی</b> میخ کوبی، سربار، تراکم خاک، مقاومت بیرون کشیدگی میخ، مدل سازی آزمایشگاهی و عددی.</p>	<p>یکی از مسائل مهم مهندسی عمران در مناطق شهری، پایدارسازی جداره های قائم و شیب دار خاکی است. از تکنیک هایی که روز به روز در محیط های شهری داخل و خارج کشور به منظور پایدارسازی گودها، رواج پیدا نموده است، تکنیک میخ کوبی می باشد. چال های حفاری معمولی تحت اثر بارهای وارده، حتی در اعماق کم، بارها ریزش نموده و از سرعت کار کاسته شده و تلفات جانی و هزینه های اقتصادی غیر قابل پیش بینی را موجب شده است. از سوی دیگر ریزش چال های حفاری موجبات سستی خاک و از دست رفتن تراکم آن می شود که به طبع آن باعث تحمیل تغییر شکل بیشتر افقی و عمودی در سطح زمین می شود. این تحقیق ضمن معرفی این مشکل در گودبرداری های عمیق، با مدل سازی آزمایشگاهی و نیز عددی بوسیله نرم افزار اجزاء محدود Plaxis 3D Foundation، به بررسی چگونگی تاثیر میزان سربار و تراکم خاک بر رفتار میخ ها می پردازد. نتایج نشان می دهد که با شرایط یکسان تراکم خاک، ظرفیت بیرون کشیدگی انواع میخ ها با افزایش فشار سربار اعمالی بر روی خاک، افزایش پیدا می کند. به عنوان مثال با افزایش سربار از ۰/۲ به ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، در نمونه خاک با وزن مخصوص ۱/۴ گرم بر سانتی متر مکعب، باعث افزایش ۱۰۰ درصدی و در نمونه خاک با وزن مخصوص ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب، باعث افزایش ۱۵۰ درصدی در ظرفیت بیرون کشیدگی میخ می شود. همچنین در شرایط اعمال فشار سربار یکسان، ظرفیت بیرون کشیدگی میخ ها با افزایش تراکم خاک، افزایش می یابد. به عبارتی با افزایش وزن مخصوص خشک خاک از ۱/۴ به ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب، با اعمال سربار ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، ظرفیت بیرون کشیدگی میخ به ترتیب ۱۶، ۳۵ و ۴۰ درصد نسبت به حالت اولیه افزایش می یابد.</p>



### مقدمه

پایدارسازی آن ها روش های متفاوتی پیشنهاد شده است. یکی از این روش ها که امروزه به کار می رود، روش پایدارسازی توسط سیستم میخ کوبی می باشد. در این تکنیک جداره های خاکی ناپایدار ناشی از

با رشد روز افزون جمعیت و کمبود فضای شهری مناسب جهت ساخت و سازها، تمایل به ساخت ساختمان های بلند مرتبه افزایش یافته است. این امر به نوبه خود نیاز به گودبرداری را افزایش داده و برای

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.106251>

\*نویسنده مسئول: جعفر بلوری بزاز bolouri@um.ac.ir

استناد به این مقاله: هاشمی، س.، بلوری بزاز، ج. (۱۴۰۱) بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر سربار و تراکم خاک بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ در زمین های مسلح شده با میخ کوبی. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۸، شماره ۲، صفحه ۱۱۷ تا ۱۴۲.

<http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.106251>



تکنیک میخ‌کوبی خاک برگرفته از روش تونل-سازي جديد اتریشي NATM است که ترکیبی از شاتکریت مسلح و پیچ مهار برای ایجاد یک محافظ انعطاف‌پذیر در ساخت حفاری‌های زیرزمینی است (Fang, 1992). این روش در آمریکای شمالی برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ در ونکوور کانادا برای حفاظت گودبرداری‌های موقتی ساختمان‌های صنعتی و مسکونی بکار رفت (Elias and Juran, 1991)

نخستین پروژه تحقیقاتی بر روی میخ‌کوبی خاک در آلمان، با همکاری دانشگاه کارلسروهه و شرکت پیمانکاری بائر طی سال‌های ۱۹۷۵-۱۹۸۱ انجام گرفت. این پروژه شامل یک سری آزمایش بر روی سازه‌های میخ‌کوبی شده تمام مقیاس با میخ‌های تزریق شده بود که با افزایش سربار در بالای دیوار تا حد گسیختگی بارگذاری می‌شد (French National Research, 1991; Juran et al., 1999).

همچنین روش میخ‌کوبی در کشور هنگ کنگ اولین بار در دهه ۱۹۸۰ میلادی مطرح شد (Geotechnical Engineering Office, 2008) و اکنون این روش در پایدارسازی گودها در این منطقه کاربرد فراوانی دارد. تی (Tei, 1993) یک سری از آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی روی میخ را برای سه نوع ماسه انجام داد که از جعبه‌ای به طول ۲۵۴ میلی‌متر، عرض ۱۵۳ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۲ میلی‌متر استفاده کرد. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، در این آزمایش مشخص شد که بیشترین نیروی بیرون‌کشیدگی با مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد. بر

گودبرداری با استفاده از شبکه‌ای از میلگردهای فولادی که تا عمق مشخصی در خاک فرو رفته و در پوششی از دوغاب سیمان قرار دارد، پایدار می‌شود. امروزه روش میخ‌کوبی خاک (Soil Nailing) به عنوان یکی از سازه‌های حائل دیواره گود، جایگزین سازه‌های متداول شده است. پایدارسازی در روش میخ‌کوبی به این صورت است که ابتدا میخ‌هایی (آرما تور) درون دیواره گود قرار گرفته و سپس عملیات تزریق در اطراف میخ‌ها انجام می‌شود. اولویت‌های این روش نظیر سرعت و سهولت انجام کار و هزینه اقتصادی کم، آن را به عنوان یکی از روش‌های برتر در حفاظت دیواره گودبرداری‌ها مطرح نموده است. صرف‌نظر از مشکلاتی که این روش در پایداری بعضی از خاک‌ها نظیر رس اشباع عادی تحکیم یافته دارد، ملاحظات اجرایی آن در برابر خاک‌های با چسبندگی و تراکم کم باید مدنظر قرار گیرد. در تحقیق حاضر نتایج یک سری آزمایش‌های صورت گرفته تحت پارامترهای مختلف ارائه شده و برای مدل کردن میخ‌ها از نرم‌افزار اجزاء محدود Plaxis 3D Foundation استفاده گردیده است. سربارهای مختلف بر خاک با دو تراکم متفاوت اعمال گردیده و در نهایت اثر تغییرات سربار و وزن مخصوص خاک با توجه به اندرکنش خاک و میخ به صورت نمودار ارائه شده و سرانجام به تحلیل نمودارها و ارائه نتایج پرداخته شده است.

**تاریخچه میخ‌کوبی و مطالعات صورت گرفته بر مدل‌سازی بیرون‌کشیدگی میخ**

که انتظار می‌رود برای میخ‌های سخت با سطح صاف، بیشترین نیروی بیرون کشیدگی کمتر از نیروی بیرون کشیدگی ماکزیمم در میخ سخت با سطح زیر است. در میخ‌های انعطاف‌پذیر، بیشترین نیروی بیرون کشیدگی کمتر از حالت میخ‌های سخت است و به نظر می‌رسد متناسب با طول میخ‌ها نمی‌باشد.

اساس اطلاعات بدست آمده از کرنش‌سنج، مشاهده شد که تنش محوری در میخ سخت تقریباً به‌طور خطی در طول میخ توزیع شده است. همچنین آنالیز تحلیلی نشان داد که هر چقدر سختی نسبی بین خاک و میخ افزایش یابد، توزیع تنش محوری خطی‌تر و توزیع تنش برشی یکنواخت‌تر خواهد شد. همان‌طور

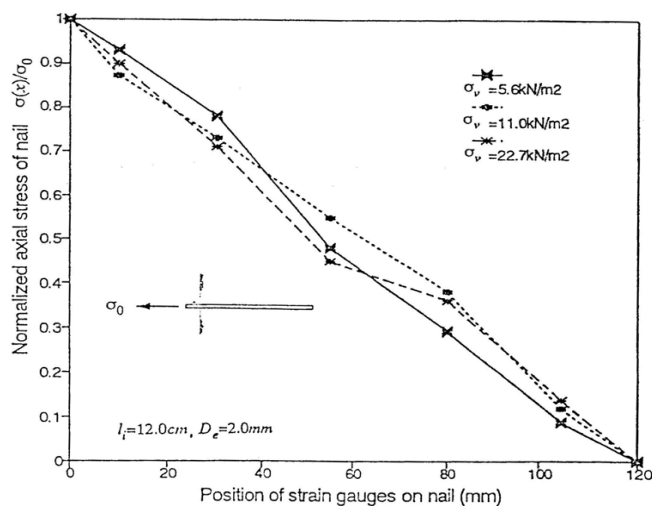


Fig. 1. Axial stress distribution along the length of the nail (Tei, 1993).

شکل ۱- توزیع تنش محوری در طول میخ (Tei, 1993)

و مشخص گردید، حداکثر نیروی بیرون کشیدگی نرمال شده یک میخ در خاک همزمان با افزایش همزمان دو پارامتر قطر میخ و مدول الاستیسیته یا کاهش طول میخ افزایش می‌یابد (Hong et al., 2012). تن و همکاران (Tan et al., 2008) آزمایش‌هایی بر روی میخ‌های قرار گرفته در ماسه خشک متراکم انجام داده‌اند. سو و همکاران (Su et al., 2010) به تاثیر فشار سربار و نیز فاصله میخ از سطح خاک پرداخت. یین و ژو (Yin and Zhou, 2009) به بررسی اثر فشار سربار و فشار تزریق ملات میخ‌ها بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ پرداختند و نشان دادند که هر دو فشار سربار و فشار ملات در مقاومت بیرون

در دانشگاه چالمرز، فرزن (Franzen, 1998) جعبه بیرون کشیدگی با ابعاد ۲ متر × ۴ متر × ۱/۵ متر را ساخت و میخ‌های فرو رونده یا کوبشی با ۴ نوع آرماتور مختلف تحت چهار تنش ۲۵، ۳۷/۵، ۷۵ و ۱۲۵ کیلوپاسکال بیرون کشیده شدند. میخ‌های فرو رونده به‌وسیله دو جک هیدرولیکی وارد خاک شدند و میخ‌های کوبشی با استفاده از چکش ضربه‌ای نصب شده‌اند. یه و همکاران (Ye et al., 2017) به بررسی آزمایشگاهی و عددی پارامتر زاویه شکل (β) بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ پرداخته‌اند. در سال ۲۰۱۲ مدل‌سازی عددی رفتار پیش‌رونده بیرون کشیدگی میخ در خاک در ناحیه مقاوم آن انجام شد

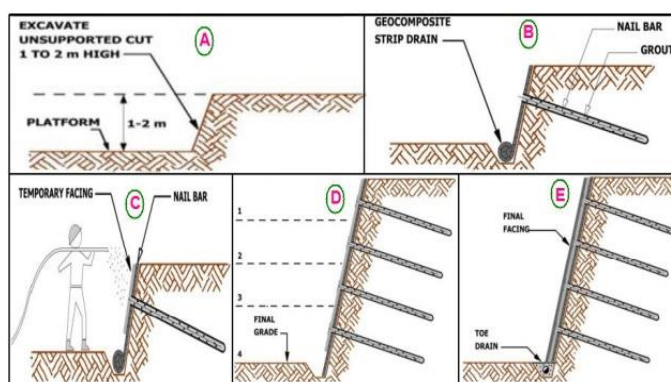
متراکم کرده و به داخل حفره‌های خاک نفوذ می‌کند. لذا به طور قابل ملاحظه‌ای منجر به جابجایی متناظر سطح شکست به توده خاک اطراف می‌شود. حسین و بین (Hossain and Yin, 2014) رفتار اندرکنش خاک و میخ تزریق شده تحت آزمایش‌های برش مستقیم را بررسی کرده و یک رفتار انقباضی تحت تنش‌های عمودی مختلف را مشاهده کردند. بعلاوه، نشان دادند که مقدار تغییر شکل با افزایش تنش نرمال افزایش می‌یابد. هونگ و همکاران (Hong et al., 2016) به بررسی تاثیر زبری گمانه بر روی مقاومت بیرون کشیدگی میخ‌ها پرداختند. علاوه بر اینها، مطالعات آزمایشگاهی دیگری نیز در زمینه مقاومت بیرون کشیدگی در میخ‌ها صورت گرفته است. هدف این تست‌های آزمایشگاهی مطالعه تاثیر فشار سربار، دانسیته نسبی، زبری سطح و روش نصب روی مقاومت بیرون کشیدگی میخ در خاک بود. نتایج نشان داد که ظرفیت بیرون کشیدگی در خاک‌های غیر چسبنده عمدتاً به زبری سطح میخ، دانسیته نسبی خاک، مساحت جانبی میخ و فشار قائم روی سطح میخ بستگی دارد. مقاومت بیرون کشیدگی حداکثر برای میخ‌های کوبشی ۵۰٪ بالاتر از حالت میخ‌های فرورونده است و بیشتر رفتار نرم‌شوندگی نشان می‌دهد. مقاومت بیرون کشیدگی باقی‌مانده به نظر مستقل از روش نصب می‌باشد.

### اجرای میخ کوبی

این روش شامل یک شیب میخ کوبی شده متشکل از سه بخش توده خاک، تسلیح کننده‌ها و رخیوش شیب می‌باشد. تسلیح کننده‌ها باعث افزایش مقاومت

کشیدگی میخ تأثیر متقابل دارند. توخی و همکاران (Tokhi et al., 2016) با یک سری مدل‌سازی آزمایشگاهی با مته‌ای جدید جهت بررسی اندرکنش آن با ماسه نشان دادند که ظرفیت بیرون کشیدگی میخ به فشار سربار وابسته است و همچنین صفحات شکست بصورت شعاعی در یک فاصله معین از رویه میخ شکل می‌گیرند. ژو و همکاران (Zhou et al., 2009) به مدل‌سازی عددی شیروانی خاکی متشکل از خاکریز سست تحت بارگذاری سربارهای مختلف پرداختند و تجزیه و تحلیل عددی و نتایج آزمون میدانی آنها نشان داد که وجود میخ باعث افزایش پایداری کلی یک شیب سست تحت بارگذاری می‌شود. ژو و بین (Zhou and Yin, 2008) یک مدل‌سازی عددی ساده برای تحلیل اندرکنش بین خاک و میخ انجام دادند و نتیجه‌گیری کردند که برای شیب یا دیوار تقویت شده، سهم خمشی میخ‌های خاک در مقاومت بیرون کشیدگی میخ در درجه دوم اهمیت قرار دارد و کشش در شکست سازه‌های میخ‌کوبی شده در خاک غالب است. هونگ و همکاران (Hong et al., 2013) مقایسه‌ای بین رفتار بیرون کشیدگی میخ‌های تزریق شده در حالت‌های کارگاهی و آزمایشگاهی صورت دادند و مشخص کردند که مقادیر آب موجود در خاک در سطح مشترک خاک و میخ در مقایسه با نمونه‌های خاک استخراج شده از گمانه‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. علاوه بر این، تمام میخ‌ها پس از بیرون کشیدن از خاک، به طور قابل توجهی در جهت قطری گسترش می‌یابند، که نشان می‌دهد دوغاب سیمان تحت فشار خاک را

(and Tham, 2009). میخ کوبی خاک در طیف وسیعی از خاک شامل رس‌ها، خاک‌های ماسه‌ای، سنگ‌های هوازده، نیم‌رخ شیب‌های هوازده، خاک‌های لایه‌ای و ناهمگن امکان‌پذیر می‌باشد. ولی انجام این روش در رس‌های نرم و پلاستیک، خاک‌های با دانسیته پائین و یا اشباع توصیه نمی‌شود (Soil Nailing, 2002). در شکل ۲ گودبرداری مرحله به مرحله و روش اجرای میخ کوبی مشاهده می‌شود.



شکل ۲- مراحل اجرای میخ کوبی (French National Research, 1991)

Fig. 2. The stages of nailing (French National Research, 1991)

(Research, 1991). مراحل توضیح داده شده برای گودبرداری ۱ تا ۲ متر دیگر تکرار می‌شود. مقاومت چسبندگی بین خاک و ملات در دیوارهای میخ کوبی شده

ظرفیت بیرون کشیدگی میخ یک عامل مهم در تحلیل و طراحی دیوارهای میخ کوبی شده می‌باشد که به دو عامل اصلی اندازه مجموعه میخ و مقاومت چسبندگی بین خاک و ملات بستگی دارد. از بین این دو عامل اندازه مجموعه میخ با توجه به فرضیات طراحی مشخص بوده ولی به دلیل عدم شناخت کافی در مورد رفتار اندرکنشی بین خاک و ملات در طول

و سختی توده خاک شده و در برابر تنش‌های جانبی ناشی از سربار و یا وزن توده خاک مقاومت می‌نمایند و به این وسیله، موجب پایداری شیب می‌گردند (Bayoumi et al., 2008).

تحلیل‌های عددی انجام گرفته نشان می‌دهد که رفتار شیب میخ کوبی شده بیش از اینکه وابسته به شرایط انتهایی تسلیح‌کننده‌ها باشد به مشخصات سطح تماس تسلیح‌کننده و خاک اطراف دارد (Zhou

تسلیح فولادی شامل سیستم مش‌بندی شده از سیم‌های به هم جوش خورده است. طول پانل‌های شبکه فولادی جوش خورده باید به اندازه‌ای باشد که هر پانل با پانل کناری تا اندازه‌ای هم‌پوشانی داشته باشد. در این مرحله لایه‌ی نازک بتن شاتکریت بر روی سطح گود پاشیده می‌شود. بعد از آن یک صفحه (پلیت فولادی) بر روی نوک میخ کار گذاشته می‌شود. از واشر و مهره‌های شش گوش برای اتصال میخ به صفحه استفاده می‌شود. توجه شود که مدت ۷۲ ساعت لازم است تا بتن شاتکریت به مقاومت ۳ روزه با مقدار تقریبی ۱۰/۵ مگاپاسگال برسد و بعد گودبرداری مرحله بعد انجام شود (French National

شرایط تنش که روی مقاومت بیرون کشیدگی تاثیر می‌گذارد، قاعداً به تنش قائم وارد به سطح میخ برمی‌گردد. برخی از محققین بر این باورند که تنش قائم، به فشار سربار خاک در عمق مربوط است (Jewell, 1990). از طرفی، بعضی دیگر از محققین بر این عقیده‌اند که تنش قائم مستقل از عمق خاک است (Cartier and Gigan, 1983).

برای میخ‌های حفاری و تزریق شده در خاک غیرچسبنده، میزان فشار سربار و طبیعت خاک دانه‌ای بر روی زاویه اصطکاک خاک اثر می‌گذارد و متعاقب آن مقاومت چسبندگی نیز تأثیر می‌پذیرد. همچنین اگر میخ‌ها در خاک‌های دانه‌ای کوبیده شوند، مقاومت چسبندگی به‌طور عمده اصطکاکی بوده و با توجه به مقاومت اصطکاکی خاک به عواملی نظیر فشار سربار در امتداد طول چسبندگی، تراکم نسبی خاک و روش نصب میخ بستگی دارد. زاویه اصطکاک ظاهری در سطح مشترک خاک و میخ تقریباً بین  $\tan\phi' 0.75$  تا  $\tan\phi'$  است که  $\phi'$  زاویه اصطکاک مؤثر خاک‌های دانه‌ای می‌باشد (Elias and Juran, 1991).

برای میخ‌های حفاری و تزریق شده در خاک ریزدانه، مقاومت چسبندگی  $0.25$  تا  $0.75$  برابر مقاومت برشی زهکشی‌نشده این خاک‌ها می‌باشد (Shaw-Shong, 2005). عموماً مقاومت چسبندگی با مقاومت برشی زهکشی‌نشده افزایش می‌یابد (اما نه لزوماً به‌طور خطی). برای خاک‌های نرم‌تر، نسبت مقاومت چسبندگی به مقاومت برشی زهکشی‌نشده  $(q_s/S_{II})$ ، بیشتر از خاک‌های سفت‌تر می‌باشد.

میخ نمی‌توان مقدار دقیقی برای این پارامتر مشخص کرد. از طرفی یک فرآیند استاندارد آزمایشگاهی خاص نیز برای آن وجود ندارد. بنابراین در مرحله طراحی، این پارامتر اغلب توسط مهندس طراح فرض می‌گردد (با توجه به شرایط میدانی و شرایط خاک) و سپس به‌وسیله آزمایش بیرون کشیدگی در طی ساخت اصلاح می‌شود (Franzen, 1998).

**تاثیر شرایط خاک مقاومت بیرون کشیدگی میخ**  
ویژگی‌هایی از خاک که روی مقاومت بیرون کشیدگی اثر می‌گذارند شامل مقاومت، اندازه ذرات، اتساع و درجه اشباع خاک می‌باشند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت بیرون کشیدگی میخ، خاک اطراف میخ می‌باشد. برای مثال، اگر یک میخ با روش یکسان در رس سیلتی، ماسه و شن ماسه‌دار نصب شود، ممکن است مقادیر مقاومت بیرون کشیدگی حدود  $40 - 80$  کیلوپاسکال،  $100 - 200$  کیلوپاسکال حاصل شود (Bruce and Jewell, 1987). اندازه و شکل ذرات که بستگی به اتساع خاک دارند، به‌طور عمده روی رفتار بیرون کشیدگی و مقاومت بیرون کشیدگی موثرند. یک درجه اشباع متوسط خاک می‌تواند برای مقاومت بیرون کشیدگی مفید باشد. خاک خیلی خشک یا خیلی خیس مناسب نمی‌باشد. محققان مختلف راجع به تاثیر درجه اشباع خاک روی مقاومت بیرون کشیدگی تحقیق کرده‌اند که مشاهده شد در خاک‌های اشباع، مقاومت بیرون کشیدگی پائین می‌باشد (Chu and Yin, 2005; Pradhan, 2003).

## شبیه سازی یک روش آزمایشگاهی با توجه به شرایط واقعی (جعبه آزمایش بیرون کشیدگی)

تغییر شکل یک شیب میخ کوبی شده (یا میخ‌ها) با توجه به عدم در نظر گرفتن اثرات وابسته به زمان (مانند خزش یا تحکیم) یک مسئله مقدار مرزی است. برای حل این نوع مسئله، برای مثال تغییر شکل و تحلیل پایداری سه بعدی یک شیب میخ کوبی شده، نیاز به سه دسته معادلات، شامل سه معادله تعادل تنش، شش معادله سازگاری تغییر مکان کرنشی و شش معادله مشخصه می‌باشد.

بنابراین جمعاً ۱۵ معادله برای حل ۱۵ مجهول (۶ تنش، ۶ کرنش، ۳ تغییر مکان) با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب وجود دارد. ۶ معادله مشخصه در حقیقت رفتار بنیادی مقاومت - کرنش - تنش (رفتار درونی) خاک را بیان می‌کنند. ساده‌ترین رابطه مشخصه یک رابطه الاستیک خطی همسان‌گرد با دو ثابت مدول یانگ و نسبت پواسون می‌باشد. معیار گسیختگی موهر-کولمب مثال دیگری از معادلات مشخصه برای بیان رفتار گسیختگی در خاک می‌باشد.

برای مطالعه کارایی طول کامل میخ در یک شیب، نیاز به یک مدل فیزیکی تمام مقیاس (یا یک مدل کوچک مقیاس گریز از مرکز) است. از طرف دیگر اگر هدف، مطالعه اثراتی مانند فرآیند نصب (حفاری همراه با آزاد شدن تنش‌ها، تزریق ملات) و فشارهای سربار بر روی مقاومت بیرون کشیدگی میخ‌ها باشد، به مقیاس طولی کوچکی از میخ که بتواند بیانگر میخ نصب شده در شیب باشد، پرداخته می‌شود. زیرا یک

میخ با طول کامل در شیب در لحظه گسیختگی (حالت نهایی برای آنالیز پایداری) تحت نیروی کششی قرار می‌گیرد. همچنین تنش برشی سطحی که بر روی میخ اثر می‌کند، در جهت مخالف سطح لغزش است. از طرفی خاک و شرایط تنش نیز در طول کامل میخ یکنواخت نیستند. بنابراین اگر میخ با طول کامل و با شرایط غیریکنواخت برای آزمایش بیرون کشیدگی استفاده شود، اثرات پارامترهای فوق الذکر را نمی‌توان به دقت مورد مطالعه و بررسی قرار داد.

در هر حال اگر یک بخش کوتاهی از طول میخ در نظر گرفته شود، می‌توان گفت خاک و شرایط تنش تقریباً در جهت طولی میخ یکنواخت می‌باشد. پس می‌توان اثرات فاکتورهای مختلف را بر روی مقاومت بیرون کشیدگی به وسیله طول کوتاهی از میخ بررسی کرد. این کار را می‌توان با استفاده از یک جعبه بیرون کشیدگی که در آن میخ در یک بلوک خاک قرار می‌گیرد، انجام داد. البته باید توجه داشت، تنش، تغییر شکل و همچنین شرایط بارگذاری در یک مقطع عرضی از میخ یکنواخت نیستند و با توجه به چگونگی مرز و نوع بارگذاری متفاوت می‌باشند.

در نهایت نتایج بدست آمده از جعبه بیرون کشیدگی را می‌توان برای میخ با طول کامل در شیب و در شرایط مشابه به کار برد. نتایج بدست آمده از آزمایش و با استفاده از رابطه ۱ می‌توان مقاومت بیرون کشیدگی را بدست آورد:

$$q_s = P / \pi DL \quad (1)$$

به‌عنوان سربار و همچنین بیرون کشیدن میخ را داشته باشد. از این‌رو چیدمان آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۴ برای انجام آزمایش‌های بیرون-کشیدگی میخ ساخته شد. اجزا و بخش‌های مختلف این دستگاه شامل قاب عکس‌العملی صلب، مخزن نگهدارنده خاک، جک هیدرولیکی، نیرو سنج، تغییرمکان سنج و دستگاه قرائت می‌باشد.



شکل ۴- چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی  
Fig. 4. Laboratory equipment setup

در این رابطه  $P$  نیروی بیرون‌کشیدگی نهایی،  $D$  قطر میخ (سوراخ حفر شده که با آرماتور و ملات پر شده) و  $L$  طول میخ می‌باشد.

### چیدمان آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌های میخ‌کوبی در خاک نیاز به ساخت دستگاهی است که در مخزن آن میخی در خاک تعبیه شده و امکان وارد کردن نیروی‌های لازم



شکل ۳- مخزن ساخته شده برای نگهداری خاک  
Fig. 3. A tank built to store soil

فراهم آورد. این قاب عکس‌العملی صلب امکان اعمال فشارهای مختلف (مدل‌سازی سربار موجود روی خاک) و انجام آزمایش را فراهم می‌کند. مقطع این ستون فولادی از یک ورق به عرض ۳۸ سانتی‌متر به عنوان جان و دو ورق به عرض ۶۰ سانتی‌متر به عنوان بال ستون تشکیل شده است. این قاب شامل دو تیر فولادی I شکل به ارتفاع و عرض بال ۴۰ سانتی‌متر می‌باشد که بر روی جان و بال این تیر آهن‌ها دو ردیف سوراخ به قطر ۲/۵ سانتی‌متر و فواصل ۱۶

قاب عکس‌العملی صلب که در مجموعه تحقیقاتی آزمایشگاه سازه ساخته شده است و در بسیاری از تحقیقات من جمله مطالعات کاظمی و بلوری (Kazemi and Bolouri, 2018) مورد استفاده واقع شده، از دو ستون I شکل به ارتفاع ۵ متر و یک تیر افقی به طول ۴ متر تشکیل شده است. درون جان و بال این ستون‌ها سوراخ‌هایی به قطر ۲۵ میلی‌متر و به فواصل ۱۰ سانتی‌متری از یکدیگر تعبیه شده تا امکان افزایش یا کاهش ارتفاع تیر افقی را از سطح زمین

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است اسکلت اصلی این مخزن از پروفیل‌های فولادی تشکیل شده است به گونه‌ای که بتواند به راحتی نیروهای وارده از سوی جک هیدرولیکی و همچنین وزن حاصل از خاک را تحمل کند.

با توجه به روش طراحی شده برای انجام آزمایش‌های این تحقیق، از جک هیدرولیکی دستی به ظرفیت ۱۰ تن برای اعمال نیرو به منظور بیرون کشیدن میخ استفاده شده است. این جک استوانه‌ای شکل به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵/۵ سانتی‌متر دارای پیستونی توخالی به قطر خارجی ۵ سانتی‌متر و قطر داخلی ۵ سانتی‌متر بوده که حداکثر دامنه حرکت این پیستون ۳/۵ سانتی‌متر می‌باشد. این جک هیدرولیکی به یک پمپ روغن دستی متصل می‌شود که برای اعمال نیرو و حرکت پیستون به سمت بیرون می‌بایست روغن به صورت دستی به درون جک پمپ شود.

در روند انجام آزمایش‌های این تحقیق از نیروسنج‌های الکتریکی برای تعیین نیروهای اعمالی به خاک به عنوان سربار و نیز نیروی بیرون کشیدگی میخ استفاده شده است و ظرفیت آن متناسب با حداکثر نیروی اعمالی انتخاب شده است. نیروسنج‌های به کاررفته در این آزمایش‌ها به صورت S شکل به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و عرض ۱۶ سانتی‌متر و ظرفیت ۲۰ تن برای اعمال سربار و استوانه‌ای تو خالی به قطر ۱۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۴/۷ سانتی‌متر و با ظرفیت ۵ تن می‌باشد که برای اندازه‌گیری نیروی بیرون کشیدگی میخ مورد استفاده قرار گرفته است. این

سانتی‌متر تعبیه شده است. اتصالات این قاب صلب فولادی به صورت پیچ و مهره‌ای بوده و تیرهای موجود بر اساس ارتفاع مورد نیاز در آزمایش‌های گوناگون در ترازهای مختلف با استفاده از پیچ‌هایی به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۸ سانتی‌متر به ستون‌های فولادی متصل می‌شود.

مخزن نگهدارنده خاک دارای ابعادی به ترتیب طول ۱۱۰ سانتی‌متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر می‌باشد که بر روی یک وجه آن سوراخی به قطر ۷۵ میلی‌متر تعبیه شده است که ارتفاع آن از کف ۴۵ سانتی‌متر و فاصله تا یال‌های کناری ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. قابل ذکر است ابعاد مخزن نگهدارنده به گونه‌ای انتخاب شده است که اثر اصطکاک جداره با خاک به حداقل برسد. یکی از ویژگی‌های مهم این مخزن خاک قابلیت جابجایی آن است. از آنجایی که معمولاً مدت زمان زیادی برای آماده‌سازی نمونه‌ها به نسبت زمان اعمال بارگذاری صرف می‌شود لذا جهت سهولت و راحتی انجام فرایند آماده‌سازی بهتر است این مخزن به صورت متحرک طراحی شود. از این رو مخزن فولادی ساخته شده بر روی چهار چرخ از جنس پلاستیک فشرده قرار گرفته است تا بتوان به راحتی آن را جابجا کرد. همچنین برای تثبیت و ثابت نگهداشتن مخزن در طول زمان بارگذاری از چهار عدد پیچ استفاده شد، به گونه‌ای که وقتی مخزن در جای مناسب قرار می‌گیرد این پیچ‌ها در جای خود باز می‌شود و باعث می‌شود چرخ‌ها آزاد شده و مخزن روی زمین قرار گیرد. در نتیجه مخزن در جای خود ثابت و بدون حرکت باقی خواهد ماند.

و ساعت انجام می‌شود. در این روش قرائت ابزارها در یک ساعت معین از یک روز خاص شروع شده و بر اساس فواصل زمانی مختلف قرائت‌ها ادامه می‌یابد. همچنین در زمان مشخصی، ثبت اطلاعات خاتمه می‌یابد به گونه‌ای که دستگاه در هر ثانیه یک قرائت از تمامی ابزارها را درون حافظه خود ذخیره می‌کند.

### مشخصات خاک

برای انجام آزمایش‌های طراحی شده در این پژوهش و بررسی ظرفیت بیرون کشیدگی میخ، خاک مورد استفاده در این آزمایش‌ها ماسه رس‌دار (SC) می‌باشد. این خاک یکی از مناسب‌ترین خاک‌ها جهت انجام روش میخ‌کوبی می‌باشد. برای تعیین ویژگی‌ها و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی این نوع خاک آزمایش‌هایی شامل تعیین رطوبت، دانسیته،  $G_s$ ، دانه‌بندی و برش مستقیم انجام شد که نتایج آن در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه گردیده است.

نیروسنج الکتریکی بوده و خروجی آن در دستگاه قرائت بر حسب کیلوگرم قرائت می‌شود.

برای انجام آزمایش‌های طراحی شده در این تحقیق و اندازه‌گیری تغییر مکان میخ از تغییرمکان سنج الکتریکی استفاده شده است تا بتوان با حداکثر دقت و در زمان‌های معین، بدون هیچگونه خطایی در میزان و زمان اندازه‌گیری، مقدار تغییر شکل‌ها را تعیین کرد.

به دلیل استفاده از نیروسنج و تغییرمکان‌سنج‌های الکتریکی در روند انجام آزمایش‌ها و همچنین جهت افزایش دقت و سهولت ثبت داده‌ها از یک دستگاه قرائت استفاده شد. دستگاه قرائت استفاده شده در انجام آزمایش‌ها، دارای ۸ کانال ورودی اطلاعات می‌باشد. به عبارت دیگر قابلیت ثبت هم‌زمان داده‌های ۸ ابزار را داراست. این دستگاه قابلیت نمایش، چاپ و ذخیره‌سازی داده‌ها را نیز دارد. قرائت و ثبت اطلاعات در این دستگاه به روش قرائت ابزارها بر اساس تاریخ

Table 1. Specifications of samples A1-A3

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های A1 تا A3

ردیف	پارامتر	مقدار
1	درصد رطوبت	11%
2	$G_s$	2.65
3	وزن مخصوص خشک ( $g/cm^3$ )	1.4

Table 2. Specifications of samples A4-A6

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های A4 تا A6

ردیف	پارامتر	مقدار
1	درصد رطوبت	11%
2	$G_s$	2.65
3	وزن مخصوص خشک ( $gr/cm^3$ )	1.6

## روش انجام آزمایش‌ها

همان‌گونه که در قسمت مشخصات خاک ملاحظه شد، آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به لحاظ تراکم نمونه خاک با دو وزن مخصوص خشک انجام شده‌اند. از آنجایی که باید در تمام آزمایش‌های مربوط به هر یک از نمونه‌ها، میزان تراکم خاک با یکدیگر برابر باشد لذا می‌بایست روندی مشخص و ثابت برای ساخت نمونه‌ها استفاده شود که روش آن در ادامه توضیح داده شده است.

برای انجام این آزمایش‌ها، ابتدا لازم است تا مخزن حاوی خاک در جای مناسب مستقر شود. به‌گونه‌ای که کمترین میزان فاصله با محل نهایی انجام آزمایش داشته و در هنگامی که مخزن از خاک پر شود کمترین فاصله برای رسیدن به محل مورد نظر طی کند. سپس برای پر کردن مخزن از خاک، ابتدا می‌بایست حجم مخزن را اندازه گرفته و به تعداد لایه‌های مساوی (۴ لایه) تقسیم شود و با توجه به وزن مخصوص مورد نظر، وزن خاک مورد نیاز در هر لایه محاسبه شود. برای توزین خاک می‌بایست پیمانهای متناسب با ابعاد مخزن انتخاب شود به نحوی که به راحتی بتوان پیمانها را از خاک پر کرده، از روی زمین برداشته و درون مخزن تخلیه کرد. پس از تعیین پیمانها، آن را به‌صورت خالی بر روی ترازو قرار داده تا وزن خالی آن محاسبه شود. از آنجایی که لازم است نمونه ساخته شده دارای تراکم یکنواخت در عمق‌های متفاوت باشد لذا یک پیمانها ثابت با وزن مشخص برای توزین خاک استفاده شد. سپس پیمانها را که حاوی ۱۵ kg خاک است، به تعداد لازم برای هر لایه درون مخزن آزمایش

تخلیه می‌شود. در ادامه، برای رسیدن به تراکم لازم در خاک می‌بایست لایه خاک ریخته شده کوبیده شود. برای این منظور از یک وزنه با عملکردی مشابه وزنه آزمایش پروکتور استاندارد استفاده شد. این وزنه همان‌گونه که در شکل ۵ قابل مشاهده است از یک ورق فولادی مربع شکل به ابعاد ۲۰ سانتی‌متر و ضخامت ۲ سانتی‌متر و یک میله فولادی به قطر ۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر تشکیل شده است. برای اینکه میزان انرژی وارد شده به لایه‌های ماسه در هر ضربه یکسان باشد و در نتیجه میزان تراکم لایه‌های مختلف با یکدیگر برابر باشد از یک مخزن چوبی به ابعاد ۲۰×۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شده است. نحوه متراکم کردن خاک مانند آزمایش پروکتور استاندارد بوده و وزنه به ارتفاع مخزن چوبی بالا آمده و سپس رها می‌شود.



شکل ۵- وزنه مورد استفاده برای متراکم نمودن نمونه

Fig. 5. The weight used to compact the sample

پس از متراکم کردن خاک و تا رسیدن به ارتفاع مشخص، لایه بعدی خاک ریخته می‌شود. این روند تکرار می‌شود تا نیمه ابتدایی مخزن پر شود. پس از این مرحله بایستی فضای لازم برای ایجاد میخ در خاک ایجاد شود که بدین منظور از لوله‌ای با جنس پلی‌اتیلن و قطر خارجی ۶۵ میلی‌متر استفاده شد.

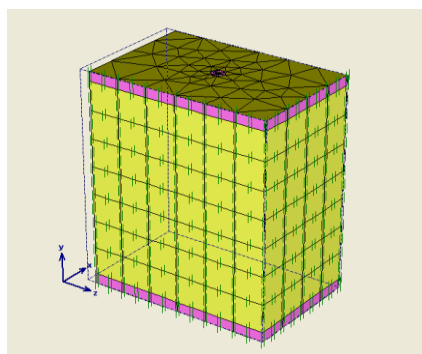
مقدار سربار مورد نظر به خاک اعمال شود. لازم به ذکر است بار اعمالی توسط جک به صورت تدریجی وارد می‌شود و پس از رسیدن به مقدار بار دلخواه مقدار سربار اعمالی را ثابت نگه داشته تا آزمایش بیرون کشیدگی انجام شود. در آزمایش‌های طراحی شده مقدار تنش‌های اعمالی برابر  $0/2$ ،  $0/5$ ،  $0/8$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شده است.

### نرم افزار Plaxis 3D Foundation

در آنالیزهای دو بعدی امکان انتخاب دو نوع عنصر ۶ گره‌ای و ۱۵ گره‌ای مثلثی در تحلیل‌ها وجود دارد که عنصر پیش فرض در این نرم افزار عنصر ۶ گره‌ای است. برای دستیابی به دقت بیشتر در محاسبات تنش‌ها و بار و گسیختگی (به خصوص در هندسه) از عنصرهای ۱۵ گره‌ای استفاده می‌شود. در پیش فرض تابع تقریب جابجایی عنصرها از مرتبه دوم در نظر گرفته شده است. ماتریس سختی این نوع عنصرها با استفاده از سه نقطه تنش حاصل می‌شود. در عناصر ۱۵ گره‌ای مثلثی، تابع تقریب جابجایی از مرتبه چهارم و نقاط تنش آن به منظور تعیین ماتریس سختی ۱۲ نقطه در نظر گرفته شده است. این نوع عنصر در تحلیل‌های دقیق مهندسی بکار می‌رود و برای انجام تحلیل‌ها توسط آن نیاز به حافظه بیشتری از کامپیوتر بوده و وقت بیشتری برای تحلیل نیاز دارد. در نرم افزار Plaxis 3D Foundation می‌توان برای محاسبه ضریب پایداری، روش بدست آوردن ضریب اطمینان را به کار گرفت. در این روش تغییر شکل‌های کلی مفهوم فیزیکی ندارد، اما تغییر شکل‌های جزئی آخرین مرحله تحلیل (هنگام خرابی) در

لازم به ذکر است برای جلوگیری از صدمه ندیدن لوله در هنگام بیرون کشیدن در اثر چسبندگی و اصطکاک با خاک، بدنه خارجی لوله با روغن چرب شده و روی آن با پلاستیک پوشیده می‌شود. در نهایت لوله محصور شده به وسیله پلاستیک از سوراخ‌های ایجاد شده بر روی بدنه مخزن عبور داده و تثبیت می‌شود. پس از قرار دادن لوله، دو لایه بعدی خاک به روش قبلی ریخته و متراکم می‌شود تا کل حجم مخزن با خاک پر شود. در انتهای کار و پس از پر شدن مخزن، سطح خاک به صورت یکنواخت و کاملاً صاف و هموار می‌شود تا سربار به صورت یکنواخت و کامل بر روی سطح خاک قرار گیرد. پس از پر شدن مخزن، لوله قرار داده شده در خاک، از روزه‌ی جلوی مخزن بیرون کشیده می‌شود. بنابراین حفره‌ای با قطر ۶۵ mm در خاک ایجاد شده که میلگردی با قطر ۱۶ میلی‌متر را در وسط آن قرار داده می‌شود. با توجه به هدف تحقیق که بررسی مقاومت بیرون کشیدگی میخ در خاک است، علت انتخاب این قطر میلگرد، عدم گسیختگی خود میلگرد و نیز عدم لغزش بین میلگرد و دوغاب در حین بیرون کشیدگی می‌باشد. سپس حفره با دوغاب سیمان با نسبت آب به سیمان  $0/45$  پر می‌شود (French National Research, 1991). پس از گذشتن سه روز آزمایش بیرون کشیدگی انجام می‌شود. مقاومت فشاری سه روزه نمونه مکعبی با ابعاد ۵ cm، ۲۰ MPa بدست آمد و مقاومت ۲۸ روزه آن ۳۰ MPa حاصل شد. در این مرحله می‌بایست نیروسنج S شکل با ظرفیت ۲۰ ton را بالای مخزن نصب کرده و به وسیله جک متصل به قاب بارگذاری

داده‌های مورد نیاز برای ایجاد مش در هندسه مدل شامل نقاط، خطوط توده‌ها (توده نواحی بسته با خطوط می‌باشند که به‌طور اتوماتیک در مدت ایجاد مدل هندسی بوجود می‌آیند) می‌باشند. خطوط هندسی و نقاط ممکن است تحت تاثیر قراردادن موقعیت و توزیع عنصر بکار روند. ایجاد مش‌بندی نیاز به پارامتر مش‌بندی عمومی که اندازه عنصر میانگین  $L_e$  را نشان دهد، دارد. در نرم افزار Plaxis این پارامتر به وسیله ابعاد هندسی خارجی و تنظیمات درستی عمومی که در زیر منوی Mesh تعریف شده است محاسبه می‌شود (شکل‌های ۶ و ۷).



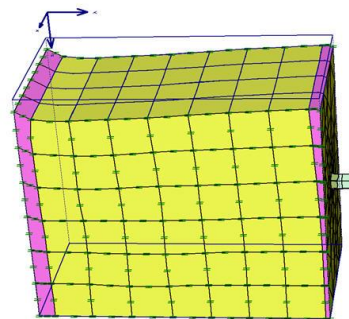
شکل ۷- شرایط مرزی مدل ساخته شده

Fig. 7. Boundary conditions of the constructed model

تعیین مکانیزم خرابی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ضمناً این تحلیل‌ها براساس معیار موهرکلمب انجام می‌گیرد (Plaxis Version 8.2).

### عنصربندی و تشریح مدل‌های طراحی

هندسه مدل باید به عناصر محدود، به منظور انجام محاسبات عناصر محدود، تقسیم شود. ترکیب عناصر محدود را مش می‌گویند. این مش‌بندی بر اساس روش مثلث‌بندی قوی می‌باشد که نتیجه آن مش‌بندی بی‌سازمان است. این مش‌بندی نامرتب به نظر می‌رسد اما عملکرد عددی آن از عملکرد مش‌بندی منظم بهتر است.



شکل ۶- میخ بیرون کشیده در مدل عددی

Fig. 6. Pulled out nail in numerical model

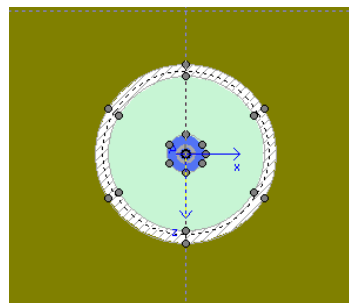
جدول ۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های مدل شده

Table 3. Physical and mechanical characteristics of the modeled soils

رديف	پارامتر	نام	خاک A1-A3	خاک A4-A6
1	مدل رفتاری ماده	Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
2	نوع رفتار ماده	Type	Drained	Drained
3	مدول الاستیسیته	$E_{ref}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	80	100
4	نسبت پواسن	$\nu$	0.3	0.3
5	چسبندگی	$C$ (kg/cm <sup>2</sup> )	0.005	0.01
6	زاویه اصطکاک	$\phi$ (°)	20	25
7	زاویه اتساع	$\psi$ (°)	0	0

### اختصاص مشخصات خاک و میخ

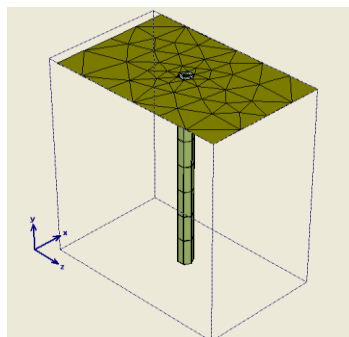
مشخصات خاک مطابق با جدول ۳ بر اساس مدل سازی آزمایش مربوطه، در نرم افزار تعریف می شود. لازم به ذکر است که با توجه به ابعاد مخزن، تنش های بر جای خاک که در اولین فاز محاسبات تولید می شوند، قابل چشم پوشی است. بنابراین مقادیر وزن مخصوص طبیعی و اشباع خاک صفر در نظر گرفته شده است. لازم به یادآوری است مقادیر فیزیکی و مکانیکی خاک ارائه شده در جدول زیر با استفاده از آزمایش برش مستقیم به دست آمده است.



شکل ۸- مدل سازی شمع های تو در تو

Fig. 8. Modeling of the nested piles

برای تعریف میخ که شامل میلگرد و دوغاب دور آن است از ابزار شمع استفاده می شود به صورتی که دو شمع تو در تو در نظر گرفته می شود (شکل ۸). برای شمع خارجی سطح مشترک تعریف می شود در حالی که بین شمع های داخلی و خارجی سطح مشترک تعریف نمی شود و این دو به دلیل آن که سختی بالایی دارند، مجموعاً یک جسم صلب در نظر گرفته می شوند. در نهایت مش بندی شمع ها مطابق شکل ۹ صورت می گیرد.



شکل ۹- مش بندی شمع ها

Fig. 9. Meshing piles

پارامترهایی است که کالیبراسیون بین مدل سازی عددی و آزمایشگاهی بوسیله آن انجام شده و مقدار آن بین ۰/۶ تا ۰/۷ بدست آمد.

برای تخصیص مشخصات دوغاب و میلگرد به شمع ها از جداول ۴ و ۵ استفاده شد. لازم به ذکر است پارامتر ضریب سطح مشترک ( $R_{int}$ ) یکی از

Table 4. Mortar specifications

ردیف	پارامتر	نام	مقدار
1	مدل رفتاری ماده	Model	Elastic
2	نوع رفتار ماده	Type	Non-porous
3	مدول الاستیسیته	$E_{ref}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$2 \times 10^6$
4	نسبت پواسن	$\nu$	0.2
5	ضریب سطح مشترک	$R_{int}$	0.6 – 0.7

جدول ۴- مشخصات دوغاب

ردیف	پارامتر	نام	مقدار
1	مدل رفتاری ماده	Model	Elastic
2	نوع رفتار ماده	Type	Non-porous
3	مدول الاستیسیته	$E_{ref}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$2 \times 10^6$
4	نسبت پواسن	$\nu$	0.2

گودبرداری‌های درون‌شهری می‌باشد. این پارامترها شامل تراکم خاک و نیز اثر سربار اعمالی به خاک می‌باشد. با توجه به نتایج مطالعات آزمایشگاهی و پارامتریک و منطقی بودن نتایج مدل‌سازی، برخی از نمودارهای مقاومت بیرون‌کشیدگی در برابر تغییر مکان میخ در این تحقیق ارائه می‌شود.

در دیوارهای میخ‌کوبی شده، ظرفیت بیرون‌کشیدگی میخ یک عامل مهم در تحلیل و طراحی دیوارهای میخ‌کوبی شده است و به عامل اصلی مقاومت چسبندگی بین خاک و دوغاب بستگی دارد. هدف از این تحقیق، بررسی اثر تغییرات در پارامترهای موثر بر ظرفیت بیرون‌کشیدگی میخ‌ها در

مدل	A1	A2	A3	A4	A5	A6
وزن مخصوص خشک (gr/cm <sup>3</sup> )	1.4	1.4	1.4	1.6	1.6	1.6
فشار سربار اعمالی (kg/cm <sup>2</sup> )	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8

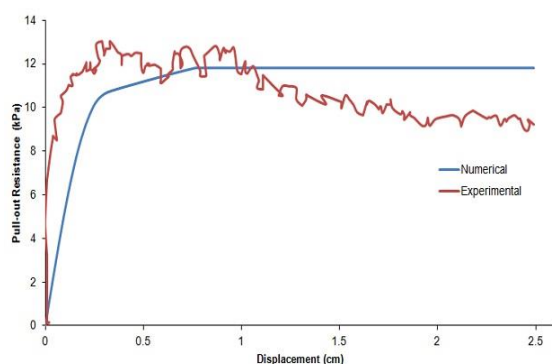
مدل	B1	B2	B3	B4	B5	B6
وزن مخصوص خشک (gr/cm <sup>3</sup> )	1.4	1.4	1.4	1.6	1.6	1.6
فشار سربار اعمالی (kg/cm <sup>2</sup> )	1	1.2	1.5	1	1.2	1.5

برابر تغییر مکان ارائه گردید. لازم به ذکر است پارامترهای مقاومتی خاک مورد استفاده در حالت‌های مختلف آزمایش با استفاده از آزمایش برش مستقیم تعیین شد که نتایج آن در جدول ۳ قابل مشاهده است. لذا مدل‌سازی عددی با استفاده از همین پارامترهای بدست آمده از آزمایش برش مستقیم و نیز سایر پارامترهای مدل آزمایشی برای شش آزمایش صورت گرفت. با مقایسه نتایج آزمایش‌ها و

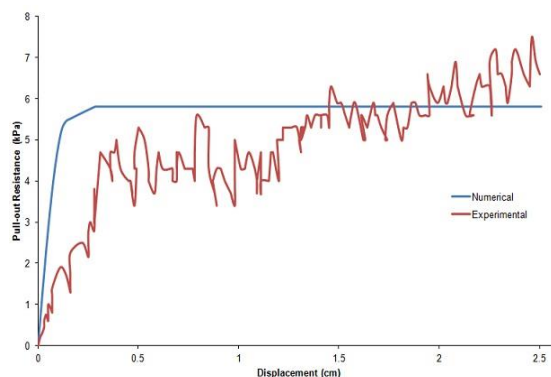
در مدل‌های A، پس از انجام آزمایش‌ها مطابق با جدول ۶ و ثبت نتایج و رسم نمودارهای تغییرات مقاومت بیرون‌کشیدگی در برابر تغییر مکان میخ، مدل‌سازی عددی آزمایش‌ها با همان پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 3D Foundation مطابق با جدول ۷ انجام شد و نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی نیز به‌صورت نمودار تغییرات مقاومت بیرون‌کشیدگی در

مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بیشترین مقاومت بیرون کشیدگی در نظر گرفته شده است. لذا همان-طور که در نمودارهای تغییرات مقاومت بیرون کشیدگی در برابر تغییر مکان میخ ارائه شده در قسمت نتایج مدل های A مشاهده می شود، روند نتایج آزمایش ها و مدل سازی عددی تقریباً مشابه بوده و در مقاومت بیرون کشیدگی این دو اختلاف کمی دیده می شود که این نشان دهندهی عملکرد صحیح مدل عددی می باشد.

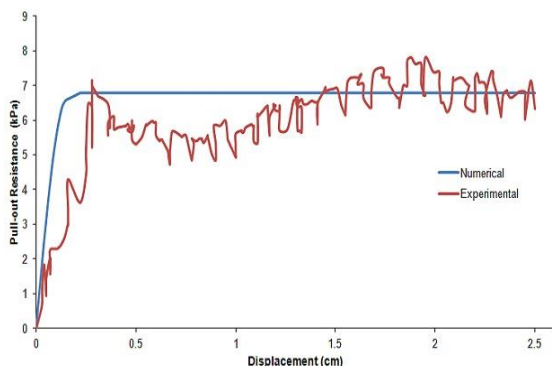
مدل سازی عددی، کالیبراسیون مدل عددی انجام شد. لذا با تغییر دادن پارامتر ضریب سطح مشترک ( $R_{int}$ ) و نیز مدول الاستیسیته خاک ( $E$ ) برای مدل سازی عددی شش آزمایش انجام شده نتایج مدل های آزمایشی و عددی تقریباً یکسان سازی شد. پس از کالیبراسیون مدل عددی و اطمینان از صحت و درستی جواب های بدست آمده، می توان مدل سازی عددی را تعمیم داده و با تغییر پارامترهای مختلف رفتار بیرون کشیدگی میخ در خاک را بررسی نموده و نتایج آن را مشاهده نمود. ملاک کار برای کالیبراسیون



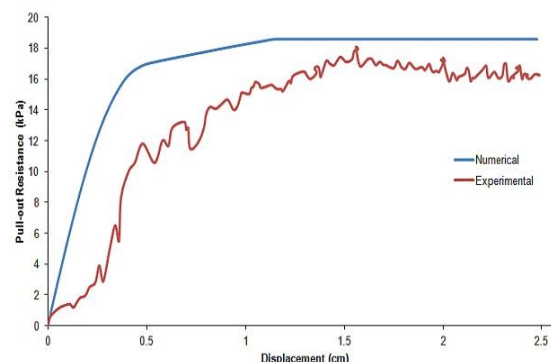
شکل ۱۱- تغییرات مقاومت در برابر تغییر مکان میخ A2  
Fig. 11. Changes in strength to nail displacement A2



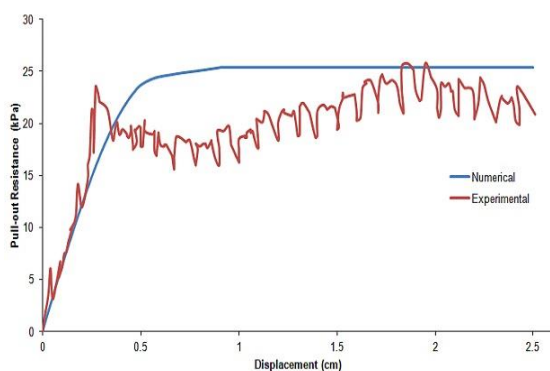
شکل ۱۰- تغییرات مقاومت در برابر تغییر مکان میخ A1  
Fig. 10. Changes in strength to nail displacement A1



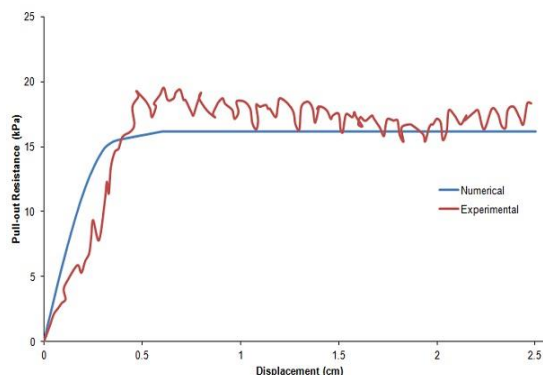
شکل ۱۳- تغییرات مقاومت در برابر تغییر مکان میخ A4  
Fig. 13. Changes in strength to nail displacement A4



شکل ۱۲- تغییرات مقاومت در برابر تغییر مکان میخ A3  
Fig. 12. Changes in strength to nail displacement A3



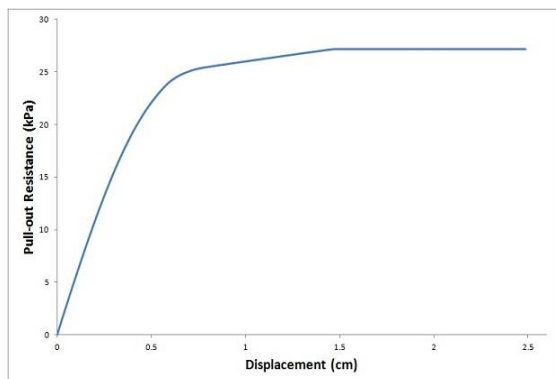
شکل ۱۵- تغییرات مقاومت در برابر تغییرمکان میخ A6  
Fig. 15. Changes in strength to nail displacement A6



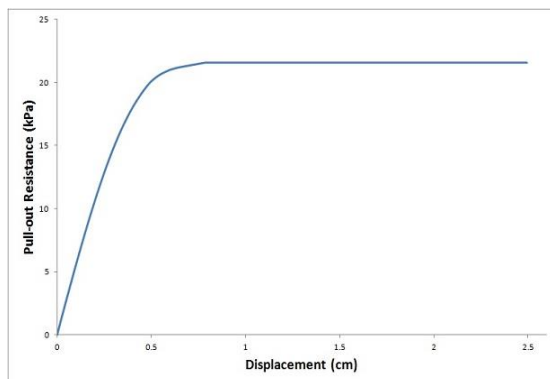
شکل ۱۴- تغییرات مقاومت در برابر تغییرمکان میخ A5  
Fig. 14. Changes in strength to nail displacement A5

سربارهای اعمالی در این تحقیق، مدل سازی فشار سربارهای مختلفی است که به میخها در ترازهای ارتفاعی متفاوت در اجرا اعمال می شود. در ادامه نتایج بدست آمده از اعمال این تغییرات و نیز نمودارهای تغییرات مقاومت بیرون کشیدگی در برابر تغییر مکان میخ در قالب نتایج مدل های B ارائه شده است.

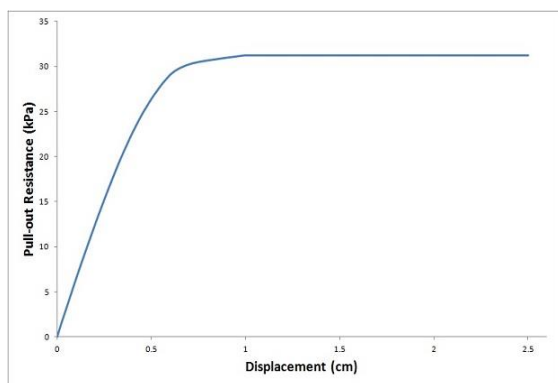
در تحقیق حاضر، مدل را با تغییر فشار سربارهای اعمالی به خاک تعمیم داده و مقاومت بیرون کشیدگی میخ در خاک تحت سربارهای متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. این تغییرات فشار سربار اعمالی شامل فشار سربارهای اعمالی ۱، ۱/۲ و ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می باشد. علت انتخاب فشار



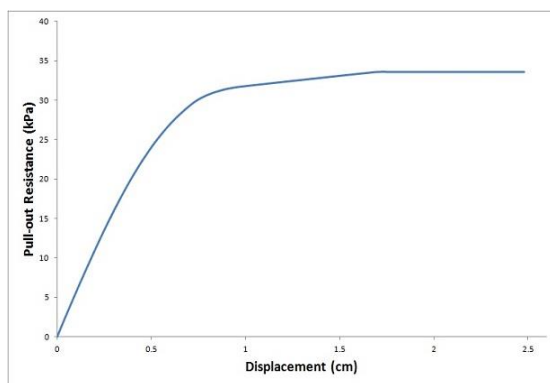
شکل ۱۷- تغییرات مقاومت در برابر تغییرمکان میخ B2  
Fig. 17. Changes in strength to nail displacement B2



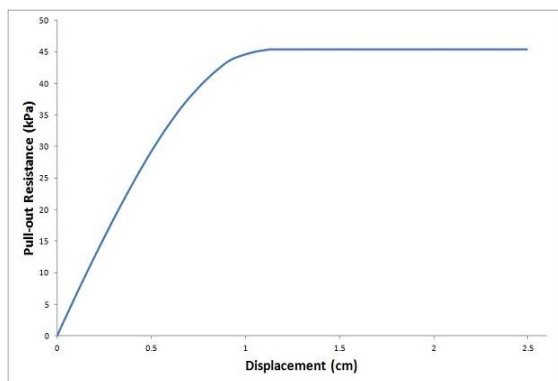
شکل ۱۶- تغییرات مقاومت در برابر تغییرمکان میخ B1  
Fig. 16. Changes in strength to nail displacement B1



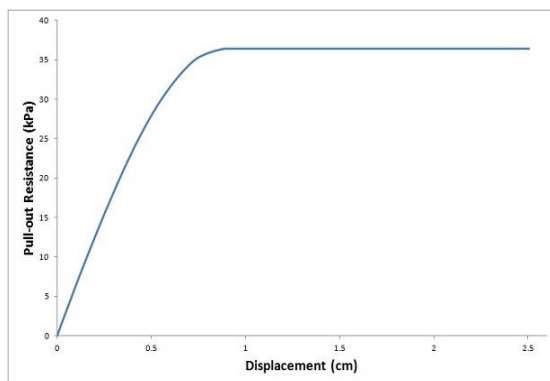
شکل ۱۹- تغییرات مقاومت در برابر تغییرمکان میخ B4  
Fig. 19. Changes in strength to nail displacement B4



شکل ۱۸- تغییرات مقاومت در برابر تغییرمکان میخ B3  
Fig. 18. Changes in strength to nail displacement B3



شکل ۲۱- تغییرات مقاومت در برابر تغییرمکان میخ B6  
Fig. 21. Changes in strength to nail displacement B6



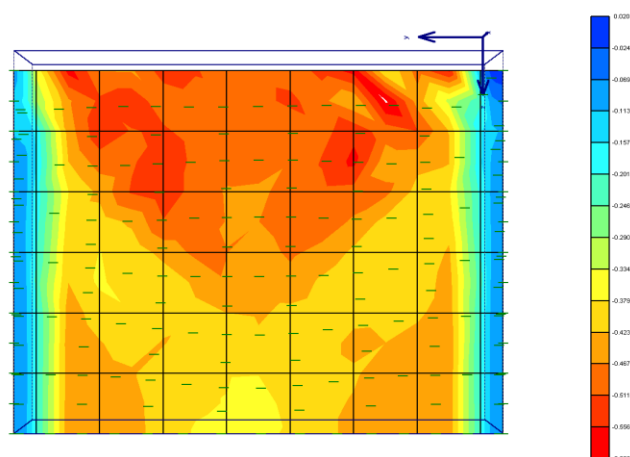
شکل ۲۰- تغییرات مقاومت در برابر تغییرمکان میخ B5  
Fig. 20. Changes in strength to nail displacement B5

شود میزان تنش در کناره‌ها تقریباً برابر صفر است و به علت اصطکاکی که خاک در این ناحیه با جداره صلب دارد، خاک نشست نکرده و هیچ تنشی از تنش اعمالی دریافت نمی‌کند. کاهش میزان تنش با فاصله گرفتن از سطح خاک را می‌توان بدین گونه توجیه کرد که با توجه به شرایط مرزی که در جداره‌های صلب در نظر گرفته شده، میزان تنش به علت اصطکاک خاک با جداره‌ها در عمق کاهش می‌یابد.

## نتایج و بحث

### تاثیر فشار سربار اعمالی

وضعیت تنش‌های ایجاد شده در جعبه آزمایش مطابق شکل ۲۲ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود توزیع تنش در بالای جعبه آزمایش تقریباً برابر با تنش اعمالی است و این توزیع تنش با فاصله گرفتن از سطح خاک کاهش می‌یابد. با وجود جداره‌ی صلبی که در دو طرف جعبه آزمایش می‌باشد ملاحظه می‌



شکل ۲۲- تغییرات تنش در عمق مدل در اثر سربار اعمالی

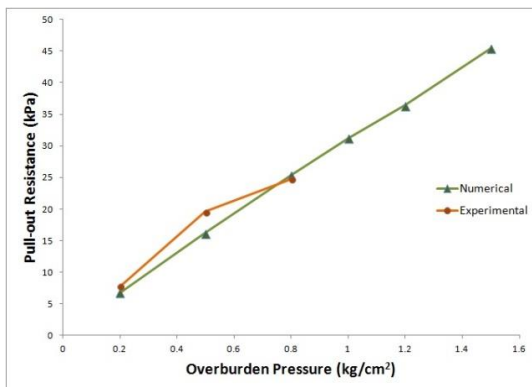
Fig. 22. Stress changes in the depth of the model due to the applied overburden.

بر سانتی‌متر مکعب، ۵۵٪ افزایش ظرفیت بیرون-کشیدگی نسبت به حالت اولیه خواهد داشت. به ازای افزایش فشار سربار از ۱ به ۱/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، افزایش ظرفیت بیرون‌کشیدگی برای وزن مخصوص‌های خشک ۱/۴ و ۱/۶ گرم بر سانتی-متر مکعب به ترتیب ۲۵٪ و ۱۶٪ می‌باشد و این مقادیر افزایش به ازای افزایش سربار از ۱/۲ به ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، برابر ۲۴ درصد است. نکته قابل ملاحظه در این قسمت این است که اولاً افزایش فشار سربار اعمالی در نمونه‌های خاک با وزن مخصوص ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب به مراتب تاثیر بیشتری نسبت به نمونه‌های خاک با وزن مخصوص ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، در ظرفیت بیرون-کشیدگی میخ دارد. علت این امر، افزایش وزن مخصوص خاک (یا به عبارتی تراکم خاک)، افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک و نیز اصطکاک بین خاک و دوغاب را به دنبال دارد. ثانیاً فشار سربار اعمالی چه در خاک با وزن مخصوص ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر

همان‌گونه که در نمودارها مشخص است افزایش فشار سربار اعمالی در نمونه خاک با وزن مخصوص ۱/۴ و ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب باعث افزایش ظرفیت بیرون‌کشیدگی میخ می‌شود. زیرا با افزایش فشار سربار اعمالی، تراکم خاک بیشتر شده و این خود باعث بالا رفتن مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک می‌شود. لذا بالا رفتن مقادیر این پارامترها، افزایش مقاومت بیرون‌کشیدگی میخ را به دنبال دارد. به‌گونه‌ای که با افزایش سربار از ۰/۲ به ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، در نمونه خاک با وزن مخصوص ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، باعث افزایش ۱۰۰ درصدی و در نمونه خاک با وزن مخصوص ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب، باعث افزایش ۱۵۰ درصدی در ظرفیت بیرون‌کشیدگی میخ می‌شود. همچنین به ازای افزایش سربار از ۰/۵ به ۰/۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، در خاک با وزن مخصوص ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۵۰٪ افزایش ظرفیت بیرون‌کشیدگی و در خاک با وزن مخصوص ۱/۶ گرم

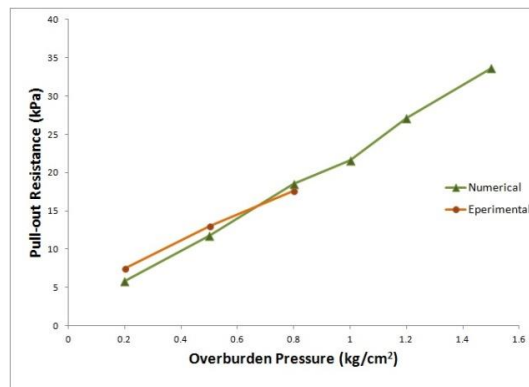
برشی بسیج شده بین خاک و دوغاب در اثر افزایش تنش قائم ناشی از سربار می‌باشد.

مکعب و چه در خاک با وزن مخصوص  $1/6$  گرم بر سانتی‌متر مکعب، با ظرفیت بیرون‌کشیدگی میخ افزایش می‌یابد. دلیل این پدیده، افزایش مقاومت



شکل ۲۴- اثر تغییرات فشار سربار اعمالی برای وزن مخصوص خشک  $1/6 \text{ gr/cm}^3$

Fig. 24. Effect of applied overburden pressure changes for the dry specific gravity of  $1.6 \text{ gr/cm}^3$



شکل ۲۳- اثر تغییرات فشار سربار اعمالی برای وزن مخصوص خشک  $1/4 \text{ gr/cm}^3$

Fig. 23. Effect of applied overburden pressure changes for the dry specific gravity of  $1.4 \text{ gr/cm}^3$

خواهد داشت. برای سربار  $1$  کیلوگرم بر سانتی‌متر-مربع، افزایش وزن مخصوص خشک باعث افزایش  $44$  درصدی ظرفیت بیرون‌کشیدگی و با سربار  $1/2$  کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، این مقدار افزایش برابر  $34\%$  می‌شود و به ازای فشار سربار اعمالی  $1/5$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، ظرفیت بیرون‌کشیدگی میخ در خاک  $35$  درصد افزایش می‌یابد.

در نتیجه تاثیر تراکم خاک در فشار سربارهای اعمالی بالاتر به مراتب بیشتر از تاثیر این پارامتر در فشار سربارهای اعمالی پایین‌تر است و در نتیجه هرچه فشار سربار اعمالی به خاک افزایش یابد،

### تاثیر تراکم خاک

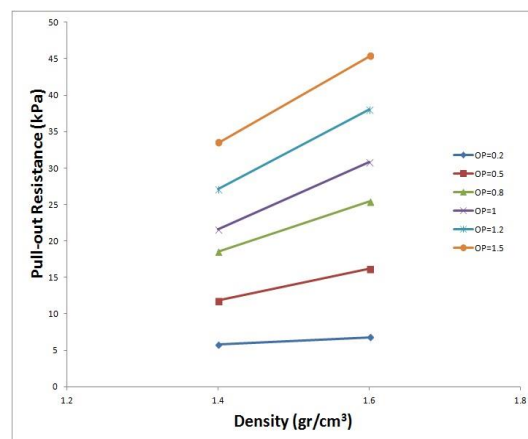
همان‌گونه که از نتایج برمی‌آید، افزایش تراکم خاک تحت سربارهای مختلف باعث افزایش ظرفیت بیرون‌کشیدگی میخ می‌شود. به‌گونه‌ای که افزایش وزن مخصوص خشک خاک از  $1/4$  به  $1/6$  گرم بر سانتی‌متر مکعب باعث افزایش  $16$  درصدی تحت سربار  $0/2$  کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و با سربار  $0/5$  کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع باعث افزایش  $35$  درصدی در ظرفیت بیرون‌کشیدگی میخ می‌شود. همچنین، به ازای سربار  $0/8$  کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع،  $40$  درصد افزایش ظرفیت بیرون‌کشیدگی نسبت به حالت اولیه

بر سانتی متر مکعب، باعث افزایش ظرفیت بیرون-کشیدگی میخ به مقدار به ترتیب ۱۰۰ و ۱۵۰ درصدی می شود.

همچنین به ازای افزایش سربار از ۰/۵ به ۰/۸ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، در خاک با وزن مخصوص ۱/۴ گرم بر سانتی متر مکعب، ۵۰٪ افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی و در خاک با وزن مخصوص ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب، ۵۵٪ افزایش ظرفیت بیرون-کشیدگی نسبت به حالت اولیه خواهد داشت.

در شرایط یکسان فشار سربار اعمالی، ظرفیت بیرون کشیدگی میخها در اثر افزایش وزن مخصوص خشک خاک که افزایش تراکم خاک می باشد، افزایش خواهد یافت. همان گونه که از نتایج برمی آید، افزایش تراکم خاک تحت سربارهای مختلف باعث افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی میخ می شود. به گونه ای که افزایش وزن مخصوص خشک خاک از ۱/۴ به ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب باعث افزایش ۱۶ درصدی تحت سربار ۰/۲ کیلوگرم بر سانتی مترمربع و با سربار ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی مترمربع باعث افزایش ۳۵ درصدی در ظرفیت بیرون کشیدگی میخ می شود. همچنین به ازای سربار ۰/۸ کیلوگرم بر سانتی-مترمربع، ۴۰ درصد افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی نسبت به حالت اولیه خواهد داشت. برای سربار ۱ کیلوگرم بر سانتی مترمربع، افزایش وزن مخصوص خشک باعث افزایش ۴۴ درصدی ظرفیت بیرون-کشیدگی و با سربار ۱/۲ کیلوگرم بر سانتی مترمربع، این مقدار افزایش برابر ۳۴٪ می شود. به علاوه، به ازای فشار سربار اعمالی ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع،

افزایش تراکم خاک و در نتیجه بهبود پارامترهای مقاومتی خاک همچون ضریب چسبندگی C و زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  را به دنبال دارد که این نیز تاثیر بیشتری بر روی افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی میخ دارد.



شکل ۲۵- اثر تغییر تراکم خاک

Fig. 25. The effect of changing soil density

## نتیجه گیری

با مقایسه رفتار بیرون کشیدگی میخ، مشاهده گردید که نتایج مدل سازی آزمایشگاهی و عددی تقریباً روند یکسانی را دنبال می کنند. برای مدل سازی عددی آزمایش های انجام شده با پارامترهای موجود و کالیبراسیونی که با مدل آزمایشگاهی صورت گرفت، ضریب سطح مشترک خاک و ملات ( $R_{int}$ ) حدود ۰/۶۵ بدست آمد.

در شرایط یکسان تراکم خاک، ظرفیت بیرون-کشیدگی انواع میخها با افزایش فشار سربار اعمالی بر روی خاک، افزایش پیدا می کند. به گونه ای که با افزایش سربار از ۰/۲ به ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، در نمونه خاک با وزن مخصوص ۱/۴ و ۱/۶ گرم

افزایش فشار ناشی از افزایش سربار اعمال شده، تراکم خاک روند افزایشی را دنبال نموده و این پدیده منجر به بالا رفتن مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک می‌شود.

ظرفیت بیرون کشیدگی میخ در خاک ۳۵ درصد افزایش می‌یابد.

از طرفی ظرفیت بیرون کشیدگی میخ در فشار سربارهای اعمالی بالاتر، بیشتر از فشار سربارهای اعمالی پایین تر تحت تاثیر قرار می‌گیرد. همچنین با

Journal of Central South University. 20(8), 2285-2292.

Hong, C-Y., Zhang, Y-F., Guo, J-W., Li, G-Y., 2016. Experimental study on the influence of drillhole roughness on the pullout resistance of model soil nails. International Journal of Geomechanics, 16(2), 1-9

Hossain M .A., Yin J-H., 2014. Behavior of a pressure-grouted soil-cement interface in direct shear tests. International Journal of Geomechanics, 14(1), 101-109.

Jewell, R. A., 1990. Review of theoretical models of soil nailing. Proc. Int. Reinforced Soil Conf., Glasgow, Scotland, 265-275.

Juran, I., Baudrand, G., Farrage, K. Elias, V., 1999. Design of Soil Nailed Retaining Structures, Design and performance of Earth Retaining Structure. Geotechnical Special Publication, No. 25, ASCE, 644-659.

Kazemi M., Bolouri B. J., 2018. A curtain traveling pluviator to reconstitute large scale sand specimens, Geomechanics and Engineering, 14 (2), 131-139.

Plaxis: Finite element code for soil and rock analyses (Version 8.2).

Pradhan, B., 2003. Study of pullout behavior of soil nails in completely decomposed granite fill. M.Phil thesis, The University of Hong Kong.

Shaw-Shong, L., 2005. Soil nailing for slope strengthening. Geotechnical Engineering, Gue & Partners Sdn Bhd, Kuala Lumpur, Malaysia, 30-31.

Soil Nailing, 2002. ISSMFE-TC-17, 1-13.

Su, L.J., Yin, J.H., Zhou, W.H., 2010. Influences of overburden pressure and soil dilation on soil nail pull-out resistance. Computers and Geotechnics, 37(4), 555-564.

Tan S. A., Ooi P. H., Park T. S., Cheang W. L., 2008. Rapid Pullout Test of Soil Nail. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 134(9), 1327-1338.

Tei, K., Tei, K., 1993. A study of soil nailing in sand. Ph.D thesis, University of Oxford.

## References

Bayoumi, A., Bobet, A., Lee, J., 2008. Pullout capacity of a reinforced soil in drained and undrain conditions. Finite Elements in Analysis and Design, 44(9-10), 525-536.

Bruce, D. A., Jewell, R. A., 1987. Soil nailing: Application and Practice - Part 2. Ground Engineering, 20(1), 21-23.

Cartier, G., Gigan, J. P., 1983. Experiments and observations on soil nailing structures. Proc. European Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, 473-476.

Chu, L. M., Yin, J. H., 2005. A Laboratory Device to Test the Pull-Out Behavior of Soil Nails. Geotechnical Testing Journal, 28(5), 499-513.

Elias, V., Juran, I., 1991. Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations. Publication FHWA-RD-89-198, Federal Highway Administration, Washington D.C.

Fang, H.Y., 1992. Foundation Engineering Handbook, 2<sup>nd</sup> Edition, Chapman & Hall, 868-905.

Franzen, G., 1998. Soil Nailing – A laboratory and field study of pullout capacity. Doctoral thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.

French National Research, Recommendations Clouterre, 1991. Federal High Way Administration.

Geotechnical Engineering Office, 2008. Manual, Guide to soil nail design and construction (Geoguide7). Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department.

Hong, C.Y., Yin, J.H., Zhou, W.H., Pei, H.F., 2012. Analytical study on progressive pullout behavior of a soil nail. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(4), 500-507.

Hong, C-Y., Yin J-H., Pei H-F., 2013. Comparative study on pullout behavior of pressure grouted soil nails from field and laboratory tests.

- Tokhi, H., Ren, G., Li, J., 2016. Laboratory study of a new screw nail and its interaction in sand. *Computers and Geotechnics*, 78, 144–154.
- Ye, X., Wang, S., Wang, Q., Sloan, S.W. Sheng, D., 2017. Numerical and experimental studies of the mechanical behavior for compaction grouted soil nails in sandy soil. *Computers and Geotechnics*, 90, 202-214.
- Yin J.-H., Zhou W.-H., 2009. Influence of grouting pressure and overburden stress on the interface resistance of a soil nail. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*. 135(9), 1198–1208.
- Zhou, Y.D., Cheuk, C.Y., Tham, L.G., 2009. Numerical modelling of soil nails in loose fill slope under surcharge loading. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 837-850.
- Zhou, W. H., Yin, J. H., 2008. A simple mathematical model for soil nail and soil interaction analysis. *Computers and Geotechnics*, 35(3), 479-488.