

# Numerical Study of Resistance Parameters in Soil Nailing Systems with Various Configurations (Case Study: Marl Soils of Tabriz)

Alireza Naseri\*

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

alinaseri@iaut.ac.ir

## Keywords

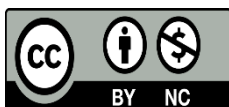
Reinforced walls,  
Soil nailing,  
Safety factor,  
FLAC3D

## Abstract

Soil nailing is a stabilization method utilizing tensile-resistant steel elements that can be employed for excavation and steep slope construction under static and dynamic loads. This research numerically investigates the resistance parameters of soil nailing systems in marly soils. The case study involves a 300-meter-long wall in Tabriz city, which experienced collapse and cracking at three points due to insufficient nail lengths and construction modifications. Using FLAC3D software, five different configurations were analyzed, and the results were compared with Yazdandoost's laboratory model. Results indicated that Model  $M_1$  with uniform nail lengths and Model  $M_2$  with a gradual 10% reduction in nail lengths from top to bottom showed unbalanced force distribution. In addition, Models  $M_3$  and  $M_4$ , which included increased nail lengths in the upper and middle sections, also demonstrated suboptimal performance. Finally, Model  $M_5$ , incorporating a 20% increase in nail lengths in the bottom row, exhibited the best performance with a maximum axial force of 169 (KN) and a safety factor of 1.44. The high correlation between numerical and laboratory results, with regression coefficients of 0.97 for wall displacement and 0.96 for axial force, validated the modeling accuracy. This study demonstrated that proper design of nail lengths and arrangements, particularly in the lower wall section, plays a crucial role in structural stability.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).



\* Corresponding Author

# مطالعه‌ی عددی پارامترهای مقاومتی سیستم میخ‌کوبی با چیدمان‌های مختلف (مورد پژوهش: خاک‌های مارنی تبریز)

علیرضا ناصری\*

گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

alinaseri@iaut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۰ اسفند ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: ۰۴ دی ۱۴۰۳

## چکیده

میخ‌کوبی خاک یک روش پایدارسازی، با استفاده از عناصر فولادی مقاوم در برابر کشش است که می‌تواند برای گودبرداری و حفاری شیب‌های تند تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی مورد قرار گیرد. این پژوهش به بررسی عددی پارامترهای مقاومتی سیستم میخ‌کوبی در خاک‌های مارنی پرداخته است. مطالعه موردی، شامل دیواری به طول ۳۰۰ متر در شهر تبریز است که به دلیل کوتاهی طول میخ‌ها و تغییرات حین اجرا، در سه نقطه دچار ریزش و ترک‌خوردگی شده است. با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D، پنج پیکربندی مختلف مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج با مدل آزمایشگاهی یزداندوست مقایسه شد. نتایج نشان داد که در مدل  $M_1$  با طول یکنواخت میخ‌ها و مدل  $M_2$  با کاهش تدریجی ۱۰ درصدی طول میخ‌ها از بالا به پایین، توزیع نیروها متعادل نبود. مدل‌های  $M_3$  و  $M_4$  با افزایش طول میخ‌ها در قسمت‌های بالایی و میانی نیز عملکرد مطلوبی نداشتند. در نهایت، مدل  $M_5$  با افزایش ۲۰ درصدی طول میخ‌ها در ردیف پایین، بهترین عملکرد را با حداکثر نیروی محوری ۱۶۹ کیلونیوتن و ضریب اطمینان ۱/۴۴ نشان داد. همبستگی بالای نتایج عددی و آزمایشگاهی با ضریب رگرسیون ۰/۹۷ برای جابجایی دیوار و ۰/۹۶ برای نیروی محوری، صحت مدل‌سازی را تأیید نمود. این مطالعه نشان داد که طراحی مناسب طول و آرایش میخ‌ها، به‌ویژه در قسمت پایین دیوار، نقش حیاتی در پایداری سازه دارد.

**واژگان کلیدی:** دیوارهای مسلح، میخ‌کوبی خاک، ضریب اطمینان، FLAC3D

## ۱- مقدمه

میخکوبی خاک یک روش پایدارسازی است که با استفاده از عناصر فولادی مقاوم در برابر کشش، می‌تواند برای گودبرداری‌ها و حفاری‌ها با شیب‌های تند، تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد. این روش، به دلیل سهولت در اجرا، نیاز به فضای کم، بهره‌وری اقتصادی و عملکرد مناسب، به سرعت گسترش یافته است [۲ و ۱]. در این روش، خاک موجود با نصب میلگردهای فولادی نزدیک به هم در یک سطح شیبدار یا قائم، از بالا به پایین مسلح می‌شود. میخ‌ها معمولاً در گمانه‌هایی که در دیواره‌ها ایجاد شده و توسط دوغاب سیمانی پر می‌شوند، قرار می‌گیرند. هدف اصلی استفاده از دوغاب سیمانی، جلوگیری از خوردگی میلگردها و همچنین انتقال بهتر نیروها بین خاک و میلگردها است. پس از نصب میخ‌ها، یک دیواره سطحی با ضخامت کم که معمولاً شاتکریت (بتن پاشی) با تسلیح سبک است، اجرا می‌شود. هدف از این دیواره، جلوگیری از فرسایش سطحی خاک و ایجاد سطح مناسب‌تری برای ساخت و سازهای احتمالی در نزدیکی دیواره گود است [۳ و ۴]. با توجه به زمین‌شناسی عمومی شهر تبریز، برخی مناطق بر روی خاک‌های مارنی قرار دارند. در مناطق شرقی و غربی، به دلیل شیب بستر سنگی، ضخامت لایه آبرفتی بسیار کم است و خاک‌های مارنی از ترازهای فوقانی قابل مشاهده هستند. در شکل (۱)، نقاط هاشورخورده، رخنمون‌های مارن در تبریز را نشان می‌دهند. از دیدگاه ژئوتکنیکی، مارن‌های تبریز در رده خاک‌های ریزدانه با شاخص پلاستیک قابل توجه قرار دارند و به سه گروه اصلی مارن‌های زرد، سبز زیتونی و خاکستری تقسیم می‌شوند [۵].

روش متداول میخکوبی خاک به این صورت است که میخ‌ها در گمانه‌های از پیش حفاری شده قرار می‌گیرند و سپس دوغاب با فشار در داخل گمانه تزریق می‌شود. شکل (۲)، مقطع یک دیوار خاکی میخکوبی شده را نشان می‌دهد که از اجزای میخ‌های فولادی مسلح‌کننده، دوغاب، سرمیخ انتهایی، نمای دیوار و زهکش تشکیل شده است [۶].

مراحل معمول ساخت یک دیوار خاکی میخکوبی شده شامل خاکبرداری (با ارتفاع مجاز که گود به مدت ۲۴ تا ۴۸ ساعت بدون هیچ حفاظی باقی بماند و ترک یا گسیختگی موضعی رخ ندهد)، حفر گمانه میخ‌ها، نصب میخ‌ها و تزریق، اجرای نمای شاتکریت موقت و سپس دائم است [۷]. از مزایای روش‌های مهار و میخکوبی خاک می‌توان به ایجاد پایدارسازی اولیه و موقت در حین عملیات خاکبرداری، کاهش مقدار حفاری و کارهای بتنی در پی‌سازی، حذف خاکریز پشت دیواره‌ها، امکان اجرای سریع میخکوبی داخل خاک، اجرای سریع و ارزان دیوار

نما و انعطاف‌پذیری اشاره کرد. از معایب آن می‌توان به مشکل در ساخت سیستم‌های زهکشی مناسب در خاک‌های ریزدانه و مارنی، نیاز به تغییر مکان برای بسیج نیروها در میخ‌ها و احتمال بروز ترک خوردگی در محیط‌های اطراف، عدم بسیج ظرفیت بیرون کشیدگی کامل میخ‌ها در خاک‌های چسبنده نرم و امکان خوردگی مصالح در محیط‌های مخرب اشاره نمود [۸]. روش مرسوم برای طراحی استاتیکی دیوارهای خاکی میخکوبی شده بر اساس گزارش شماره-FHWA0-IF-03-017 است. این گزارش استانداردهای آنالیز، طراحی و ساخت دیوارهای خاکی میخکوبی را مشخص کرده و در ایران نیز معمولاً از آن استفاده می‌شود. طراحی این دیوارها در دو مرحله طراحی اولیه و نهایی انجام می‌گیرد [۹]. بررسی مکانیزم و مقاومت کششی میخ‌ها در خاک و نتایج آزمایشگاهی مربوط به پارامترهای مقاومتی سیستم میخکوبی، بیان‌گر آن است که، طول بهینه میخ‌ها بر مبنای نیروی کششی تحت نیروهای لرزه‌ای و استاتیکی به دست آمده است. در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تأثیر شرایط مختلف خاک، از جمله چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع بر مقاومت کششی میخ‌ها پرداخته شده است [۱۱].

بررسی عملکرد سیستم میخکوبی تحت بارگذاری‌های مختلف، به خصوص در بارهای لرزه‌ای که نیروها به صورت رفت و برگشتی وارد می‌شود، اهمیت زیادی دارد. در این شرایط، میخ‌ها می‌توانند به صورت کششی و فشاری عمل کنند [۱۲]. رفتار کششی میخ‌ها در دیوارهای حائل در خاک‌های دانه‌ای به صورت آزمایشگاهی و با شبیه‌سازی عددی، بیان‌گر آن است که با افزایش ارتفاع دیوار مقدار نیروی کششی در میخ‌ها با نسبت خطی افزایش نیافته و مقدار افزایش نیروی کششی بیشتر خواهد بود [۱۳ و ۱۴]. بناب و علیایی<sup>۱</sup> [۱۵] به بررسی تأثیر بارگذاری چرخه‌ای بر تعامل میخ و خاک و مقاومت سیستم میخکوبی پرداخته‌اند.

این مطالعات نشان می‌دهند که شرایط محیطی، نوع خاک و نوع بارگذاری تأثیر مستقیم بر مقاومت سیستم میخکوبی دارند. با تحلیل دقیق این پارامترها، می‌توان به بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های میخکوبی و افزایش ایمنی و پایداری سازه‌های حائل کمک کرد. مطالعات آزمایشگاهی در زمینه بررسی پارامترهای مقاومتی سیستم‌های میخکوبی در ابعاد کوچک، نقش مهمی در درک عملکرد این سیستم‌ها در شرایط واقعی دارد. بررسی مقاومت کششی میخ‌ها در آزمایشگاه با استفاده از تست‌های مدل‌سازی کوچک‌مقیاس و تأثیر پارامترهایی مانند تراکم خاک و زوایای نصب [۱۶ و ۲۲]، بررسی دقیق اندرکنش بین خاک

<sup>1</sup> Bonab and Oliaei

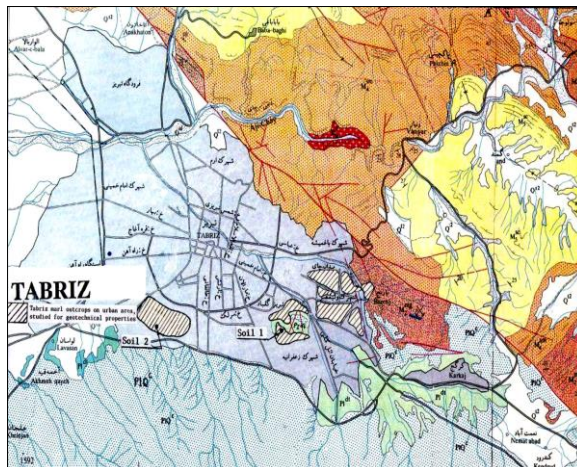
سیستم‌های میخکوبی خاک بدون دیوار، در خاک‌ریزهای ماسه‌ای و رسی با پوشش بتن‌پاشی شباهت زیادی به رفتار دیوارهای میخکوبی خاک در دیوارهای بتنی دارد. [۲۲، ۲۳ و ۲۴].

در این مقاله، به بررسی رفتار و ناپایداری دیوار تسلیح‌شده‌ای در شهر تبریز پرداخته می‌شود که به دلیل کوتاهی طول میخ‌ها و تغییرات احتمالی در طول فرآیند اجرا، دچار ریزش و ترک‌خوردگی شده است. روش مطالعه شامل مقایسه دیوار واقعی با مدل آزمایشگاهی یزداندوست و تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D است.

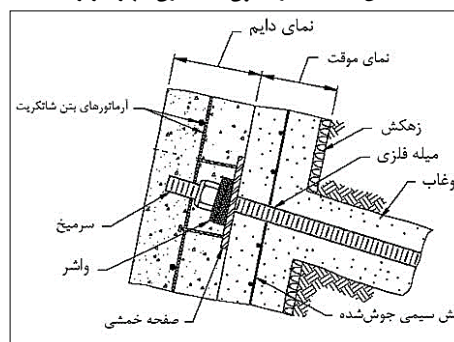
## ۲- مواد و روش‌ها

دیوار نشان داده‌شده در شکل ۳-الف، نمای دیوار اجرا شده را نشان می‌دهد و شکل ۳-ب، موقعیت مکانی دیوار در شهر تبریز را نشان می‌دهد. این دیوار به طول ۳۰۰ متر اجرا شده است و در سه نقطه دچار ریزش‌های جدی و در نقاط مختلف ترک‌های شدید بر رویه بتنی دیوار مشاهده می‌شود. این ناپایداری در دیوار یا به‌هنگام زلزله ایجاد شده است یا تأثیرات زلزله بوده که به صورت زمانی و با تأخیر در دیوار ظاهر شده است. هدف از این تحقیق، بررسی دلایل ریزش این دیوار به سبک مطالعات مشاوره‌ای نیست. طراحی دیوار بر اساس استاندارد گزارش FHWA0-IF انجام شده است [۲۵]. مشخصات خاک منطقه بسیار نزدیک به مطالعات خاک دیوار تسلیح شده مورد مطالعه یزداندوست و همکاران می‌باشد [۲۶ و ۲۷]. بر اساس تحقیقات انجام‌شده توسط ایشان و با توجه به هندسه و ابعاد آزمایشگاهی، مقایسه دیوار واقعی ناپایدار با دیوار بزرگ‌شده بر مبنای مقیاس دیوار آزمایشگاهی یزداندوست انجام پذیرفته و دلیل ناپایداری دیوار، طول کم میخ‌ها تشخیص داده شده است. این طول کم می‌تواند ناشی از طراحی اولیه یا کاهش طول میخ‌ها به‌هنگام اجرا، چه به صورت سهوی و چه عمدی، باشد. برای انجام مطالعه دو روش وجود دارد: یا ابعاد دیوار واقعی بر مبنای مقیاس کوچک‌شده و با دیوار آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گیرد، یا بالعکس، ابعاد دیوار بزرگ‌شده و با دیوار واقعی مقایسه شود. روش اول برای ساخت مدل‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود و روش دوم برای استفاده از نتایج آزمایشگاهی در عمل و ابعاد واقعی به کار می‌رود. لذا در این تحقیق از روش دوم استفاده شده است. در این تحقیق از دیوار آزمایشگاهی با نام مدل و اندیس ( $m$ )، از دیوار اجرا شده با اندیس ( $e$ ) و از دیوار بزرگ‌شده بر مبنای مقیاس آزمایشگاهی با نام پروتوتیپ و اندیس ( $p$ ) استفاده خواهد شد. ارتفاع دیوار ۱۰ متر و ارتفاع مدل آزمایشگاهی ۸۰ سانتی‌متر است؛ لذا مقیاس ۰/۸ و مقیاس معکوس ۱۲/۵ خواهد شد.

و میخ در مدل‌های فیزیکی کوچک‌مقیاس و تأثیر زاویه و طول میخ در ظرفیت کششی سیستم میخکوبی [۱۷ و ۲۳] از جمله این تحقیقات است. این داده‌ها به مهندسين ژئوتکنیک امکان می‌دهند تا پارامترهایی مانند مقاومت کششی و برشی، اندرکنش میخ و خاک، تأثیر تراکم خاک و رفتار سیستم در برابر بارهای مختلف را ارزیابی و بهبود بخشند.



شکل ۱- نقشه رخنمون‌های مارن شهر تبریز

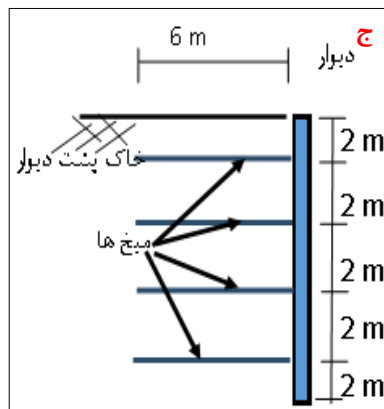
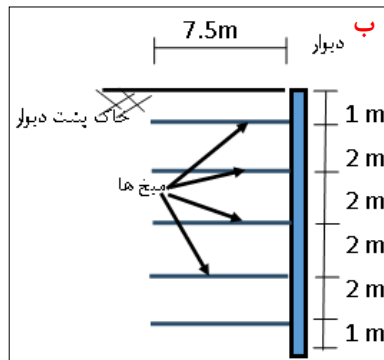


شکل ۲- اجزای تشکیل دهنده یک دیوار مسلح شده به روش میخکوبی

تحلیل تنش‌های عمودی و افقی، تغییر شکل‌ها و دوام دیوارهای مسلح توسط یانگ و همکاران [۱۸] و وفایی پورسرخابی و همکاران [۱۹] انجام گرفت و بر مبنای نتایج، پایداری بلندمدت و توزیع مجدد تنش در این دیوارها مورد ارزیابی قرار گرفت. در دیوارهای مسلح بهینه‌سازی دیوار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به طوری که هم طول و هم فاصله بین میخ‌ها بهینه باشد و هم عملکرد ژئوتکنیکی و سازه‌ای دیوار حفظ شود [۲۰ و ۲۱]. بررسی و تحلیل آزمایشگاهی و عددی

<sup>1</sup> Yang et al.

<sup>3</sup> Vafaei Pousorkhabi et al



شکل ۴- الف، دیوار آزمایشگاهی، ب، دیوار پروتوتیپ، ج، دیوار اجرا شده



(الف)

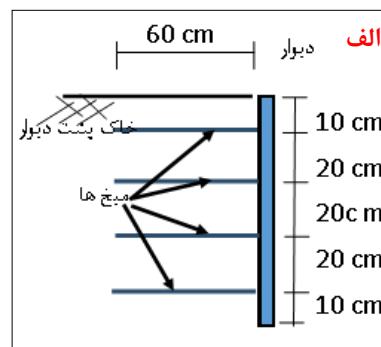


(ب)

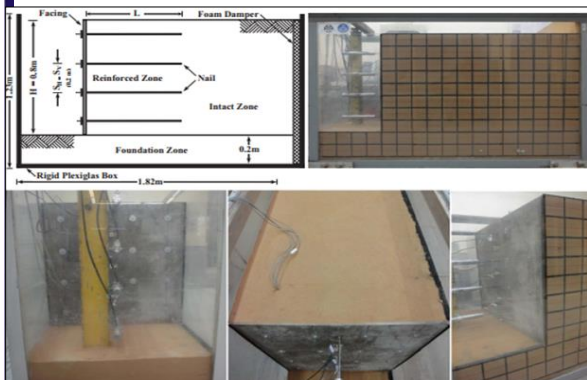
شکل ۳- الف، نمای دیوار اجرا شده، ب، موقعیت مکانی دیوار

شکل ۴، هر سه دیوار توضیح داده شده را نشان می دهد.

جدول ۱، مشخصات دیوار شامل مشخصات خاک، میخ ها و بتن رویه دیوار را نشان می دهد. با مقایسه دو شکل ۴-ب و ۴-ج، ملاحظه می شود که طراحی یا اجرای دیوار واقع در شهرک بعثت تبریز که دچار ریزش و ترک خوردگی شده است، بر اساس مدل آزمایشگاهی یزداندوست دارای طول میخ های کوتاه تر و تعداد کمتری از میخ ها می باشد. البته این موضوع به صورت سطحی بیان شده و برای تأیید این ادعا، نیاز به انجام کار مشاوره ای جدی و بر اساس آزمایش ژئوتکنیک وجود دارد. اگر طول میخ ها، تعداد آنها و اجرای صحیح دیوار صورت می گرفت، ممکن بود ناپایداری در دیوار به وجود نیاید. در هر حال، موضوع این تحقیق بررسی دلایل چیدمان میخ ها بر مبنای کار آزمایشگاهی انجام شده توسط یزداندوست می باشد. شکل ۵، دیوار و تسلیح کننده در مطالعه یزداندوست<sup>۴</sup> [۲۷] را نشان می دهد.



<sup>4</sup> Yazdandoust et al



شکل ۵- نمایی دیوار و تسلیح کننده در مطالعه یزداندوست [۲۷]

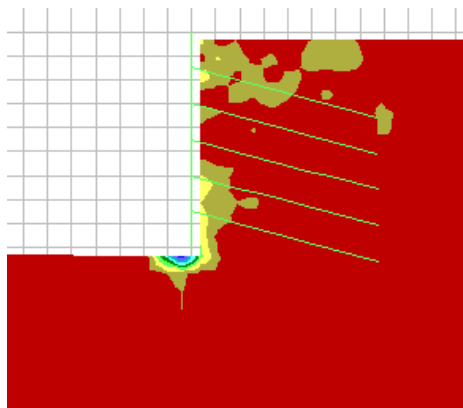
به منظور چیدمان، دیوار به همراه خاک بر مبنای جدول ۱ در نرم افزار FLAC3D مدل سازی شده و نتایج با هم مقایسه و ارزیابی شدند. دلیل انتخاب روش میکروبی خاک در این تحقیق، نوع خاک مارنی ماسه دار است که به خاک مورد نظر در این تحقیق نزدیک می باشد. تعیین فاصله مرزهای جانبی بر مبنای آیین نامه FHULA انجام شده و فاصله کف دیوار تا کف مدل دو برابر ارتفاع دیوار، فاصله مرز راست شش برابر ارتفاع دیوار و فاصله مرز چپ چهار برابر ارتفاع دیوار در نظر گرفته شده است. تحت این شرایط، در گودبرداری می توان مرزها را به صورت گیردار در مدل فرض نمود، چرا که به حد کافی از منطقه گسیختگی دور خواهند بود. برای تحقیق حاضر، از سه چیدمان برای میخ ها استفاده شده است. ارتفاع دیوار در تمام حالات ۱۰ متر و مشخصات خاک، میخ ها و دیوار مطابق جدول ۱ می باشد. نحوه چیدمان به گونه ای انتخاب شده است که میخ ها از سطح گسیختگی عبور کرده و دو طرف سطح گسیختگی را به هم متصل کنند و در نتیجه، ضریب اطمینان در پایداری را افزایش دهند. لذا میخ ها با زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق در نظر گرفته شدند تا عملکرد بهتری نسبت به حالت افقی داشته باشند. بهترین زاویه قرارگیری میخ ها به صورت متغیر و عمود بر سطح گسیختگی است؛ این کار هم از لحاظ مدلسازی و هم از لحاظ عملی و اجرایی مشکل است، لذا در این تحقیق از حالت ۳۰ درجه نسبت به افق استفاده شده است.

در چیدمان نوع اول ( $M_1$ )، طول میخ ها یکسان است. در نوع دوم ( $M_2$ )، طول میخ ها از بالا به پایین با کاهش ۱۰٪ کاهش می یابد. در نوع سوم ( $M_3$ )، طول میخ های بالایی ۲۰٪ بزرگتر از میخ های پایینی است. در نوع چهارم ( $M_4$ )، طول میخ های میانی ۲۰٪ بزرگتر از میخ های ردیف بالا و پایین است. در نوع پنجم ( $M_5$ )، طول میخ های ردیف پایین ۲۰٪ بزرگتر از ردیف های بالا می باشد. در تمامی حالات  $M_1$  تا  $M_5$ ، طول کل میخ ها یکسان است. شکل ۶ مدل سازی نمونه

جدول ۱- مشخصات خاک، دیوار و میخ ها در دیوار آزمایشگاهی ( $m$ )، دیوار بزرگ شده بر مبنای اصل آزمایشگاهی با نام پروتوتیپ ( $p$ ) و دیوار اجرا شده ( $e$ )

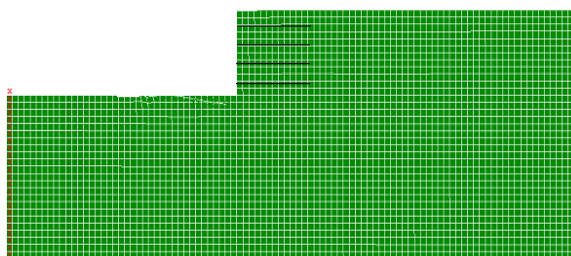
خاک					
	$\omega(\%)$	$\gamma_d (\text{KN/m}^3)$	$\gamma_{wet} (\text{KN/m}^3)$	$\gamma_{sat} (\text{KN/m}^3)$	$C(\text{kpa})$
$m$	۶	۱۶۷	۱۷/۱	۱۸/۳	۱۰
$p$	۶	۱۶۷	۱۷/۱	۱۸/۳	۱۰
$e$	۹	۱۷/۳	۱۷/۶	۱۸/۹	۱۲
میخ ها					
	$L(m)$	$F_y(\text{kpa})$	$F_u(\text{kpa})$	وضعیت	
$m$	۰/۶	۲۴	۳۷	افقی	
$p$	۷/۵	۲۴	۳۷	افقی	
$e$	۶	۲۴	۳۷	افقی	
دیوار					
	$H(m)$	$d_1(m)$	$d_2(m)$		
$m$	۰/۸	۰/۱	۰/۲		
$p$	۱۰	۱	۲		
$e$	۱۰	۲	۲		

در جدول (۱)، در پارامترهای خاک،  $\omega$ ، درصد رطوبت،  $\gamma_d$ ، وزن مخصوص خشک خاک،  $\gamma_{wet}$ ، وزن مخصوص رطوبت و  $\gamma_{sat}$ ، وزن مخصوص اشباع خاک،  $L$ ، طول میخ،  $F_y$ ، تنش جاری شدن فولاد،  $F_u$ ، تنش تسلیم شدن فولاد،  $S$ ، شیب میخ ها می باشند. همچنین، در پارامترهای دیوار،  $H$ ، ارتفاع دیوار،  $d_1$ ، فاصله قائم میخ ها،  $d_2$ ، فاصله قائم میلگرد فوقانی از سطح خاک و فاصله میلگرد تحتانی از کف جعبه آزمایش است.

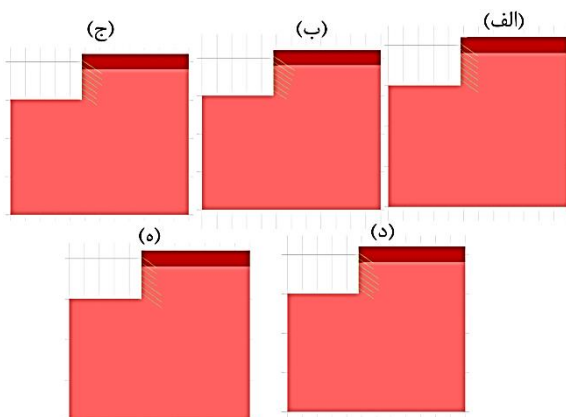


شکل ۹- صفحه‌ی گسیختگی

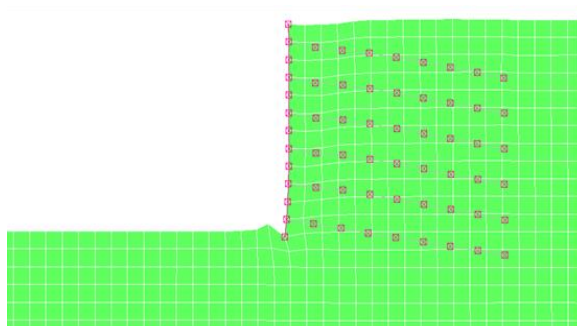
آزمایشگاهی، شکل ۷ نمایی از دیوار به همراه میخ‌ها و شاتکریت، شکل ۸ کنتور کرنش برشی، شکل ۹، صفحه گسیختگی و شکل ۱۰ (الف تا د)، چیدمان‌های مختلف را در نرم‌افزار FLAC نشان می‌دهد.



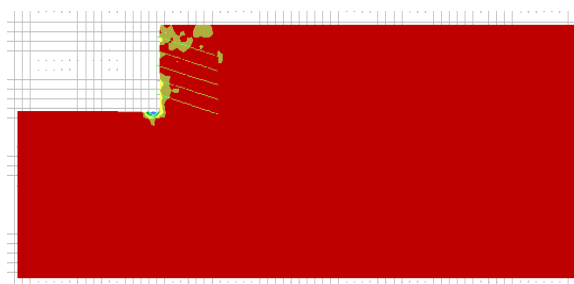
شکل ۶- مش بندی نمونه‌ی آزمایشگاهی در نرم‌افزار



شکل ۱۰- الف،  $M_1$ ، طول میخ‌ها یکسان، ب،  $M_2$ ، از بالا به پایین کاهش، ج،  $M_3$ ، طول میخ‌های بالایی بیشتر از پایینی، د،  $M_4$ ، طول میخ‌های میانی بزرگتر، ه،  $M_5$ ، طول میخ‌های ردیف پایینی بزرگتر



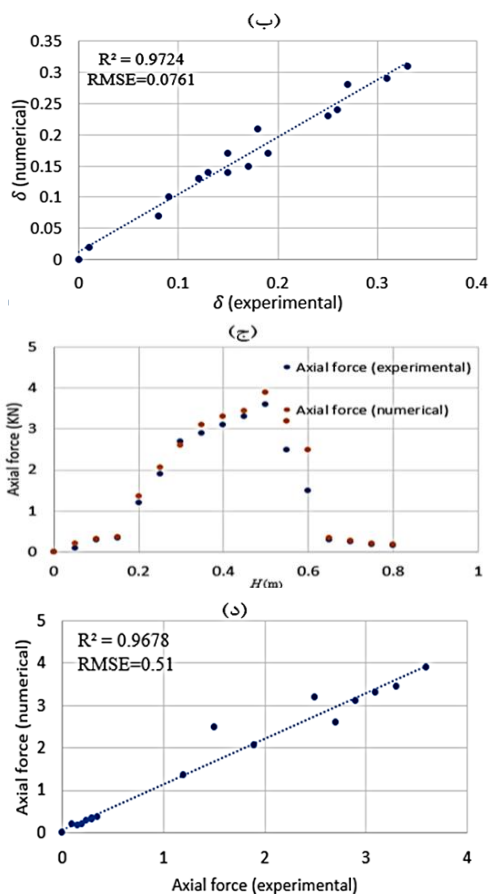
شکل ۷- نمایی از دیوار به همراه میخ‌ها و شاتکریت



شکل ۸- کنتور کرنش برشی

### ۳- نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش روش تحقیق اشاره شد، برای صحت‌سنجی این پژوهش از مدل آزمایشگاهی یزداندوست استفاده شده است. در شکل (۱۱-الف)، نمودار تغییر شکل دیوار نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی، در شکل (۱۱-ب)، نمودار تغییر شکل نمونه آزمایشگاهی در برابر نیروی محوری، در شکل (۱۱-ج)، نمودار نیروی محوری نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی و در شکل (۱۱-د)، نمودار نیروی محوری نمونه آزمایشگاهی در برابر نیروی محوری عددی نشان داده شده است. در شکل (۱۱-الف) دقت بالای مدل عددی در تکرار رفتار واقعی دیوارها مشهود است و نشان‌دهنده شبیه‌سازی دقیق حرکت‌های افقی دیوار

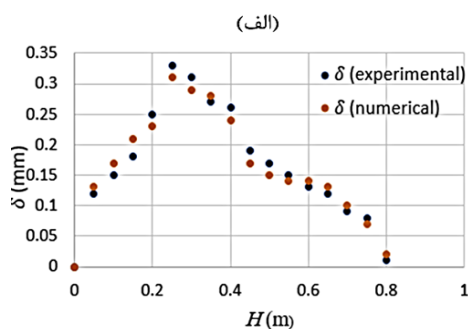


شکل ۱۱- الف، نمودار تغییر شکل دیوار در ارتفاع‌های مختلف در مدل عددی و آزمایشگاهی، ب، نمودار تغییر شکل دیوار در نمونه‌ی آزمایشگاهی در برابر مدل عددی، ج، نمودار نیروی محوری دیوار در ارتفاع‌های مختلف در مدل عددی و آزمایشگاهی، د، نمودار نیروی محوری نمونه‌ی آزمایشگاهی در برابر مدل عددی بر اساس نتایج حاصل از تحلیل عددی در نرم‌افزار FLAC3D، پارامترهای رفتاری دیوار قابل استخراج است که در پژوهش حاضر، نمودارهای تغییر شکل، نیروی محوری و ضریب اطمینان در برابر واژگونی ارائه شده است. در شکل ۱۲، نمودار تغییر شکل دیوار برای چیدمان‌های مختلف پنج‌گانه  $M_1$  تا  $M_5$  که در بخش روش تحقیق معرفی شده‌اند، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین تغییر مکان افقی در تمامی حالت‌های  $M_1$  تا  $M_5$  در رأس دیوار رخ می‌دهد، که امری طبیعی است. بیشترین تغییر مکان مربوط به چیدمان  $M_5$  است که مقدار آن برابر با  $5/3$  میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۱۳، نمودار نیروی محوری برای چیدمان‌های مختلف ارائه شده است. در این نمودار نیز بیشترین نیروی محوری در عمق ۸ متری

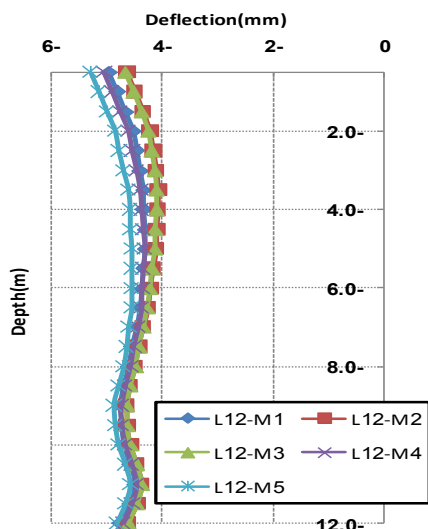
تحت بارگذاری‌های مختلف است. اختلافات جزئی جابجایی‌ها در مدل عددی و آزمایشگاهی بر اعتبار بالای مدل عددی در پیش‌بینی رفتار واقعی دیوارها تأکید دارد. شکل (۱۱-ب)، عملکرد مدل عددی در بازسازی جابجایی‌ها تحت بارهای محوری را نشان داده است. مدل عددی تقریب خوبی از نحوه توزیع و تغییر نیروی محوری در طول دیوار ارائه می‌دهد که با داده‌های آزمایشگاهی هماهنگی بالایی دارد. تحلیل شکل (۱۱-ج) نشان می‌دهد که مدل  $M_5$  با داشتن طول میخ‌های بیشتر در بخش‌های پایینی دیوار، ثبات بیشتری از خود نشان می‌دهد و این پیکربندی بهترین عملکرد را در کلیه شرایط بررسی شده داشته است، که به‌طور خاص با افزایش نیروی محوری در این قسمت‌ها نمایان می‌گردد. همان‌طور که از نمودارهای (۱۱-ب) و (۱۱-د) مشاهده می‌شود، ضریب  $R^2$  بسیار بالا و نزدیک به یک و RMSE بسیار پایین و نزدیک به صفر است که بیانگر تطابق خوب مدل عددی با مدل آزمایشگاهی است. این موضوع در مقاله حاضر، صحت‌سنجی خوبی در خاک مارنی ارائه داده و می‌توان با اطمینان بیشتری برای مدل‌های با ابعاد واقعی در مقاله استفاده کرد. اگر داده‌های حاصل از مدل عددی بر مبنای نرم‌افزار FLAC با  $\delta_n$  و داده‌های حاصل از مدل آزمایشگاهی با  $\delta_e$  نشان داده شوند، روابط ۱ و ۲، فرمول‌های مربوط به  $R^2$  و RMSE، برای جابجایی را نشان می‌دهند. از همین فرمول‌ها برای نیروی محوری نیز استفاده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\delta_n - \delta_e)^2}{\sum_{i=1}^n (\delta_n - \bar{\delta}_n)^2} \quad (۱)$$

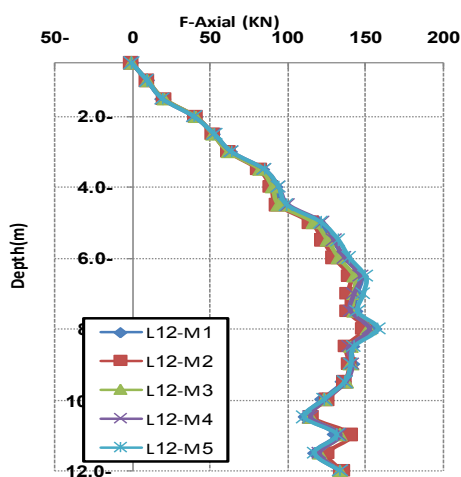
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_n - \delta_e)^2} \quad (۲)$$







شکل ۱۲- نمودار تغییر شکل دیوار بین چیدمان‌های مختلف پنج‌گانه  $M_1$  تا  $M_5$  در مدل عددی



شکل ۱۳- نمودار نیروی محوری دیوار بین چیدمان‌های مختلف پنج‌گانه  $M_1$  تا  $M_5$  در مدل عددی

جدول ۲- ضریب اطمینان بین چیدمان‌های مختلف پنج‌گانه  $M_1$  تا  $M_5$  در مدل عددی

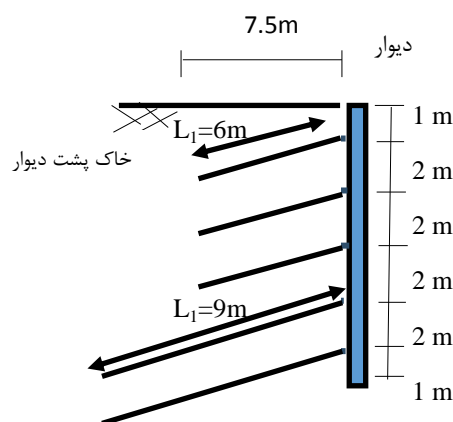
	ضریب اطمینان	تغییر نسبت به دیوار $M_0$ بر حسب درصد
$M_0$	۱	۰
$M_4$	۱/۳	۳۰
$M_2$	۱/۳۱	۳۱
$M_3$	۱/۴۰	۴۰
$M_1$	۱/۴۱	۴۱
$M_5$	۱/۴۴	۴۴

و با مقدار ۱۶۹ کیلونیوتن مشاهده می‌شود. همچنان که از نمودارهای شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشخص است، نحوه‌ی رفتار دیوارها با یکدیگر همخوانی نزدیکی دارند و این امر طبیعی است، زیرا تنها چینش میخ‌ها در این دیوارها متفاوت است، در حالی که طول میخ‌ها در تمامی چیدمان‌ها یکسان می‌باشد.

در نهایت، ضریب اطمینان در برابر واژگونی دیوار در جدول ۲ آمده است. بیشترین ضریب اطمینان مربوط به چیدمان میخ‌های حالت  $M_5$  با مقدار ۱/۴۴ است، و پس از آن چیدمان  $M_1$  قرار دارد. بنابراین، از نظر چیدمان میخ‌ها، چیدمان  $M_5$  بهترین گزینه است. این تحقیق پیشنهاد می‌کند که میخکوبی خاک با طول میخ‌های ردیف پایین به میزان ۲۰٪ بیشتر از ردیف‌های بالا انجام گیرد. این امر ممکن است به دلیل دوختن سطح گسیختگی در پای دیوار باشد. برای مقایسه یک دیوار شاهد بنام  $M_0$  با ضریب اطمینان ۱ مفروض می‌شود و مطابق جدول ۲، ملاحظه می‌گردد  $M_4$ ،  $M_2$ ،  $M_3$ ،  $M_1$  و  $M_5$  بترتیب با ۳۰، ۳۱، ۴۰، ۴۱ و ۴۴ درصد نسبت به شاهد عملکرد بهتری از لحاظ ضریب اطمینان دارد و دیوار  $M_5$  ۱۴ درصد نسبت به  $M_4$ ، ۱۳ درصد نسبت به  $M_2$ ، ۴ درصد نسبت به  $M_3$  و ۳ درصد نسبت به  $M_1$ ، ضریب اطمینان بیشتری را دارد.

با توجه به انتخاب چیدمان  $M_5$ ، شکل ۱۴ با اعمال مقیاس معکوس حاصل می‌شود که شکل پیشنهادی برای دیوار مورد نظر در این تحقیق (دیوار شکل ۳) می‌باشد. مقدار ۶ متر در شکل ۱۴ از حاصل کم کردن ۲۰٪ از ۷ متر به دست آمده و ۹ متر نیز از ۲۰٪ اضافه کردن بر ۷ متر به دست آمده است. لازم به ذکر است که این شکل پیشنهاد شده صرفاً از جنبه تحقیقاتی و بر اساس مدل و پروتوتیپ ارائه شده است. از این رو، از منظر مهندسی و طراحی، باید تمامی پارامترها در نظر گرفته شده و محاسبات میسوطی در این زمینه انجام شود.

افزایش طول میخ‌های ردیف پایینی به میزان ۲۰٪ در طراحی دیوارهای مشابه می‌تواند به طور قابل توجهی پایداری را بهبود بخشد. در همین راستا شکل پیشنهادی برای دیوار مورد نظر بر مبنای این تحقیق، پیشنهاد گردید. برای جلوگیری از ناپایداری ناشی از خطاهای اجرا، نظارت دقیق بر طول و چیدمان میخ‌ها ضروری است. تحقیقات بیشتر برای بررسی عملکرد این نوع دیوارها در شرایط لرزه‌ای توصیه می‌شود تا به طراحی‌های مقاوم‌تر در برابر زلزله منجر شود.



شکل ۱۴- شکل پیشنهادی برای دیوار مورد نظر در این تحقیق

#### ۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی اثرات چیدمان‌های مختلف میخ‌کوبی در پایداری دیوارهای خاکی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D و مقایسه نتایج با مدل آزمایشگاهی پرداخته است. تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی نشان دادند که عوامل متعددی، از جمله طول و چیدمان میخ‌ها، نقش بسیار مهمی در بهبود یا کاهش پایداری دیوار دارند. یافته‌ها به طور خاص به ضعف‌هایی در طراحی اولیه و اجرای دیوارهای بررسی شده در شهر تبریز اشاره داشتند که به ناپایداری و ترک‌خوردگی منجر شده‌اند.

مدل M5، که طول میخ‌های ردیف پایینی در آن ۲۰٪ بیشتر از ردیف‌های بالایی است، بهترین عمل کرد را با بیشترین ضریب اطمینان (۱/۴۴) و کمترین تغییر شکل افقی نشان داد. این چیدمان موجب انتقال موثر نیروها و دوختن بهتر سطح گسیختگی در پای دیوار می‌شود.

نتایج مدل‌سازی عددی دقت بالایی در پیش‌بینی رفتار دیوار واقعی نشان دادند. ضریب رگرسیون ۹۷٪ برای تغییر شکل دیوار و ۹۶٪ برای نیروی محوری، تطابق قوی بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌ها را تایید کرد.

مشخص شد که کوتاهی طول میخ‌ها، چه به صورت سهوی در مرحله اجرا و چه به دلیل طراحی نامناسب، عامل اصلی ناپایداری بوده است. این امر اهمیت طراحی مبتنی بر مطالعات عددی و آزمایشگاهی را برجسته می‌سازد.

## منابع

- [10] Babu G, Singh V. Soil nails field pullout testing: evaluation and applications. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2010; 4(1):13-21. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2010.04.01.13-21>
- [11] Hong CY, Yin JH, Pei HF, Zhou WH. Experimental study on the pullout resistance of pressure-grouted soil nails in the field. *Canadian geotechnical journal*. 2013; 50(7):693-704. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0103>
- [12] Wang H, Cheng J, Li H, Dun Z, Cheng B. Full-scale field test on construction mechanical behaviors of retaining structure enhanced with soil nails and prestressed anchors. *Applied Sciences*. 2021;27; 11(17):7928. <https://doi.org/10.3390/app11177928>
- [13] Ghareh S. Parametric assessment of soil-nailing retaining structures in cohesive and cohesionless soils. *Measurement*. 2015; 73:341-51. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.05.043>
- [14] Ye X, Wang S, Wang Q, Sloan SW, Sheng D. Numerical and experimental studies of the mechanical behavior for compaction grouted soil nails in sandy soil. *Computers and Geotechnics*. 2017; 90: 202-14. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.06.011>
- [15] Bonab BA, Oliaei M. Cyclic and Postcyclic Pullout Resistance of Soil Nail. *International Journal of Geomechanics*. 2023; 23(11):06023019. <https://doi.org/10.1061/IJGNALGMENG-8493>
- [16] Hong CY, Zhang YF, Guo JW, Li GY. Experimental study on the influence of drillhole roughness on the pullout resistance of model soil nails. *International Journal of Geomechanics*. 2016;16(2):04015047. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000491](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000491)
- [17] Palmeira EM, Araújo GL, Santos EC. Sustainable solutions with geosynthetics and alternative construction materials—A review. *Sustainability*. 2021; 13(22):12756. <https://doi.org/10.3390/su132212756>
- [18] Yang G, Ding J, Zhou Q, Zhang B. Field behavior of a geogrid reinforced soil retaining wall with a wrap-around facing. *Geotechnical Testing Journal*. 2010; 33(1):96-101. <https://doi.org/10.1520/GTJ102410>
- [19] Rostami S, Vafaei Poursorkhabi R, Naseri A. Enhancing trench stability: a geogrid reinforcement approach. *Proceedings*. 2024;105(1):114. <https://doi.org/10.3390/proceedings2024105114>
- [1] Fan C, Liu H, Cao J, Ling HI. Responses of reinforced soil retaining walls subjected to horizontal and vertical seismic loadings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020;129:105969. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105969>
- [2] Kilic IE, Cengiz C, Edincliler A, Guler E. Seismic behavior of geosynthetic-reinforced retaining walls backfilled with cohesive soil. *Geotextiles and Geomembranes*. 2021;1;49(5):1256-69. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.04.004>
- [3] Shahir, H., Delfan, S. Numerical Investigation of Nailing Pattern Effect on Nailed Wall Performance. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 2021; 54(2): 331-350. <https://doi.org/10.22059/cej.2021.298632.1659>
- [4] Li J. Field study of a soil nailed loose fill slope [Ph.D. thesis]. Hong Kong: The University of Hong Kong. 2003; 200. [https://doi.org/10.5353/th\\_b3124567](https://doi.org/10.5353/th_b3124567)
- [5] Dadadszadeh N, Hashemi M, Gazifard A, Asghari-Kaljahi E. Physical properties of Tabriz gray marlstone, NW of Iran. In: *Smart Geotechnics for Smart Societies*. Chemical Rubber Company Press. 2023; 845-52. <https://doi.org/10.1201/9781003299127-115>
- [6] Bhuiyan MZ, Wang S, Carter J. New test facility for studying the behavior of pressure-grouted soil nails. *Transportation Geotechnics*. 2022; 34: 100752. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100752>
- [7] Marwane H, Mohamed EH, Mohammed M, Bensaïd M, Kamal B, Mohammed A, Morabit A. Soil nailing for slope stabilization: an overview. *Interactions*. 2025;246(1):1-23. <https://doi.org/10.1007/s10751-024-02234-z>
- [8] Shen CK, DeNatale JS, Kulchin L, Romstad KM, Bang S. Field measurements of an earth support system. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1981;107(12):1625-42. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001217>
- [9] Esmaeili F, Varshosaz M, Ebadi H. Displacement measurement of the soil nail walls by using close range photogrammetry and introduction of CPDA method. *Measurement*. 2013;46(9):3449-59. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.069>

- [20] Shakeel M, Azam R, Riaz MR, Shihata A. Design optimization of reinforced concrete cantilever retaining walls: A state-of-the-art review. *Advances in Civil Engineering*. 2022;4760175. <https://doi.org/10.1155/2022/4760175>
- [21] Gandomi AH, Kashani AR, Roke DA, Mousavi M. Optimization of retaining wall design using evolutionary algorithms. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2017; 55:809-25. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1521-3>
- [22] Tokhi H, Ren G, Li J. Laboratory study of a new screw nail and its interaction in sand. *Computers and Geotechnics*. 2016; 78:144-54. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.05.009>
- [23] Wei XX, Zou JF, Chen GH. Seismic stability analysis of heterogeneous slopes reinforced by inclined soil nails. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2023; 27(16):4544-62. <https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2194938>
- [24] Yin JH, Su LJ. An innovative laboratory box for testing nail pull-out resistance in soil. *Geotechnical Testing Journal*. 2006; 29(6):451-61. <https://doi.org/10.1520/GTJ100216>
- [25] Liu H, Tang L, Lin P, Mei G. Accuracy assessment of default and modified Federal Highway Administration (FHWA) simplified models for estimation of facing tensile forces of soil nail walls. *Canadian Geotechnical Journal*. 2018; 55(8):14 <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0237>
- [26] Baghal AE, Maleki A, Vafaei R. On the Pull-Out Behavior of Hooked-End Shape Memory Alloys Fibers Embedded in Ultra-HighPerformance Concrete. *International Journal of Engineering & Technology Innovation*. 2021; 11(4):6. <https://doi.org/10.46604/IJETI.2021.7060>
- [27] Yazdandoust M. Experimental study on seismic response of soil-nailed walls with permanent facing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017; 98:101-19. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.04.009>