



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir



Journal of Ferdowsi
Civil Engineering

ISSN 2783-2897

Vol. 35, No. 3
Summer 2022

Proposing a Design Method for Soil-Nailed Walls and Comparing it with the Conventional Design Method*

Research Article

Mohammad Hazeghian¹ 

DOI: [10.22067/jfcej.2022.76614.1142](https://doi.org/10.22067/jfcej.2022.76614.1142)

1. Introduction

Several methods have been employed to stabilize slopes and excavations, such as retaining walls, driven and cast-in-place piles, soil nailing, soil anchorage, etc. Among these methods, the soil nailing technique is prevalent in Iran. During the design of a soil-nailed wall, geotechnical engineers attempt to provide an optimal economic design by modifying various design parameters, including the length, inclination, diameter, and spacing of nails.

The optimization of soil nailing designs has been the subject of many researches. Nevertheless, most previous studies assumed that the length, diameter, and spacing of nails would remain constant throughout the depth of excavation. The assumption is based on the conventional design method outlined in the FHWA guidance for soil-nailed walls. This assumption does not necessarily result in an optimal economic design. The main objective of the this study is proposing a practical method for designing soil-nailed walls, which allows the length, diameter, and spacing of nails to be varied throughout the depth of the excavation.

2. Method

Calculating the global factor of safety (FOS) and wall displacement are the key steps in the design of a soil-nailed wall. In this study, FOS and wall displacement were computed using GEOSLOPE and FLAC3D software, respectively. The adopted numerical modeling method was verified by comparing the experimental and numerical profiles of lateral displacement and tensile force distributions along the nails of a soil-nailed wall constructed during the Clouterre project.

In the conventional design method for soil-nailed walls, the length, diameter, and spacing of nails are assumed to remain constant throughout the excavation depth. Figure 1(a) illustrates the conventional soil nailing design with a FOS of 1.50 for a wall with a height of 20 m. The length, diameter and spacing of nails are respectively 14 m, 40 mm, and 1.8 m. The soil properties were assumed to be: $\gamma=17.8$ kN/m³, $E_{50}=57$ MPa, $\nu=0.30$, $\phi=36^\circ$, $\psi=6^\circ$, $c=10$ kPa, $K_0=0.412$ and $q_u=400$ kpa (the pull-out resistance). Moreover, the ground surface surcharge was presumed to be $Q=10$ kpa.

The length, diameter, and spacing of nails could vary depending on the excavation depth in the proposed design method for soil-nailed walls presented in this study. Using this method, the design process is carried out from top to bottom of the excavation wall in a step-by-step manner. The soil nailing design illustrated in Figure 1(b) was achieved using the proposed design method and the same FOS for the excavation model considered. According to Figure 1(b), the proposed design method redistributes the volumetric nail density through the excavation depth so that it increases as the excavation depth increases (i.e., by increasing the weight of the critical failure wedge). Accordingly, the nails vary in length, diameter, and spacing from top to bottom of the wall, ranging from 14 to 7.5 m, 25 to 2×32 mm, and 2 to 1.6 m, respectively. As a result of this redistribution, soil-nailed walls will be more economically designed.

The volumetric nail densities of the conventional and proposed soil nailing designs were estimated 0.0054 and 0.0037, respectively. In comparison with the conventional design method, the proposed design method reduced volumetric nail density by about 31%, which is a significant economic benefit. In terms of the wall displacement, the total displacements at the wall crest for conventional and proposed designs were computed 35 and 36 mm, respectively, which are approximately equal. As a result of this, it would appear that the proposed design method will increase wall displacement marginally despite reducing volumetric nail density significantly.

3. Results and discussion

In order to compare the conventional design method with the proposed design method, a parametric study comprising 54 analyses was conducted. This parametric study examined the effects of excavation depth, soil cohesion, soil density, surcharge, and required FOS.

Figure 2 illustrates the variations in displacement ratios and volumetric nail density differences for various soil types as a function of excavation depth. In this context, the volumetric nail density difference is defined as a percentage difference between the volumetric nail densities of the proposed and conventional soil nailing designs. Furthermore, the displacement ratio represents

*Manuscript received: 10 May 2022; Revised, 31 May 2022, Accepted, 19 July 2022.

¹. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran. Email: m.hazeghian@yazd.ac.ir

the ratio of the total displacement at the wall crest for the proposed soil nailing design to that for the conventional soil nailing design.

Figure 2(a) shows that volumetric nail density differences increase with increasing excavation depth (H), irrespective of soil type. As H is increased from 10 to 20 m, the volumetric nail density differences for the loose, medium, and dense soils increase from 24% to 36%, 28% to 38% and 12% to 43%, respectively. Therefore, the dense soil exhibits the most significant increase.

In Figure 2(b), it can be seen that displacement ratios versus H do not follow the same trend for various soil types. In the case of loose soil, the displacement ratio remains almost constant with an increase in H. For medium soils, the displacement ratio decrease from 1.22 at H=10m to 1.04 at H=15m, and then remains roughly constant with increasing H. The displacement ratio for dense soil remains roughly unchanged when H is increased from 10 to 15 m, and then decreases from 1.26 at H=15 m to 1.05 at H=10 m. According to Figure 2(b), the dashed lines represent the average volumetric nail density differences and displacement ratios of the various

soil types. When H is raised from 10 to 20 m, the average volumetric nail density difference increases from 21% to 39%, whereas the average displacement ratio decreases from 1.20 to 1.08.

4. Conclusion

A practical design method for soil-nailed walls was proposed and compared with the conventional design method in the present study. The main conclusions are as follows:

- 1) The proposed design method for soil-nailed walls reduced the volumetric nail density from 8% to 43% (on average 30% for all models in the study), which is very significant from an economic point of view;
- 2) As compared to the conventional design method, the proposed design method increased the total displacement from 1% to 27% (on average 11% for all models).

In accordance with these results, it can be concluded that the proposed design method does not significantly increase the wall displacement despite the substantial reduction in drilling length and the weight of rebar used.

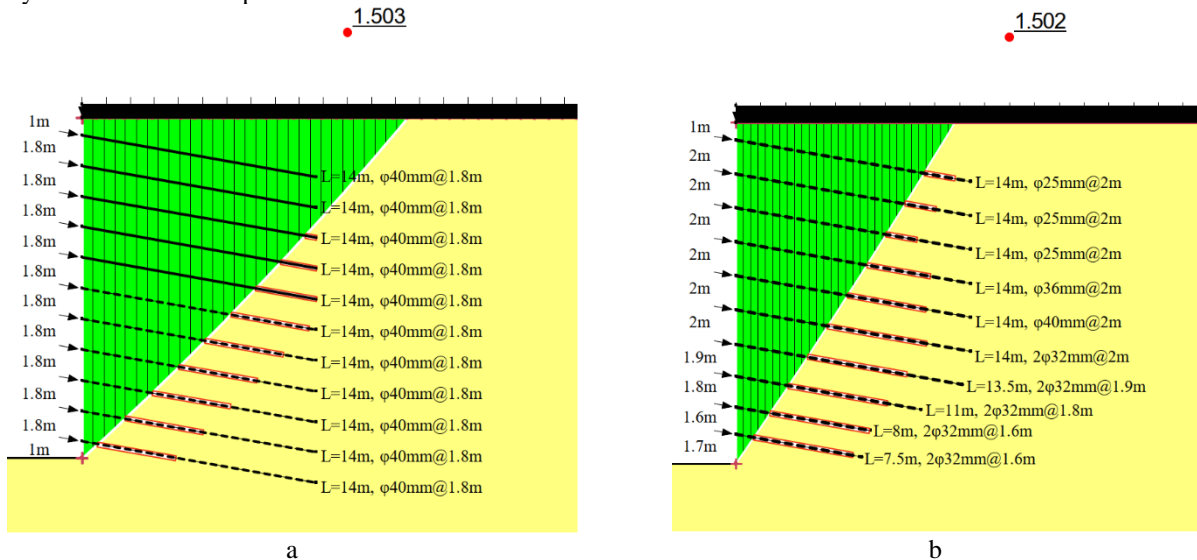


Figure 1. Soil nailing designs with the FOS=1.5 for a wall with a height of 20 m: a) the conventional design method and b) the proposed design method

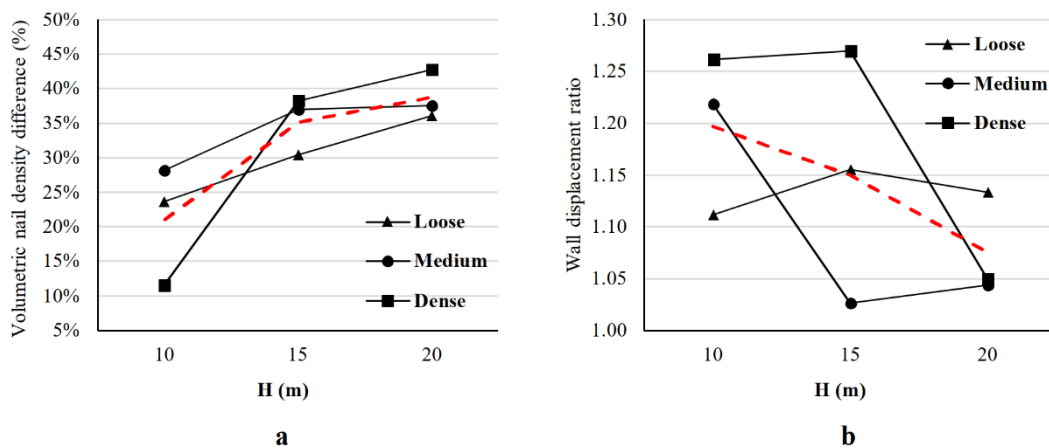


Figure 2. Variations of a) volumetric nail density difference and b) displacement ratio versus H for various soil types



ارائه یک روش طراحی برای دیوارهای میخ گذاری شده و مقایسه آن با روش طراحی سنتی*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfpei.2022.76614.1142

محمد حاذقیان^۱

چکیده در روش طراحی سنتی برای دیوارهای میخ گذاری شده که مبتنی بر راهنمای FHWA است، معمولاً مشخصات طراحی میخها (طول، فاصله و قطر میخها) در عمق گود ثابت فرض می شود. اما در روش طراحی معرفی شده در مطالعه حاضر (روش طراحی پیشنهادی) با کنترل گام به گام ضریب اطمینان برای هر یک از ردیف های میخ از بالا به پایین گود، مشخصات طراحی آنها در عمق تغییر داده می شود. در مطالعه حاضر، ابتدا فرضیات مدل سازی بیان و سپس روش مدل سازی عددی با آزمون پروژه کلوتره صحت سنجی می شود. در ادامه جزئیات روش های طراحی سنتی و پیشنهادی توصیف می شود. سپس یک مطالعه پارامتری برای مقایسه روش های طراحی سنتی و پیشنهادی انجام می شود. در این مطالعه پارامتری، اثر عمق گود، تراکم خاک، چسبندگی خاک، سربار و ضریب اطمینان پایداری مورد نیاز بررسی می شود. نتایج مطالعه حاضر نشان می دهد که روش طراحی پیشنهادی نسبت به سنتی، چگالی حجمی میخها (مجموع حجم میخها تقسیم بر مساحت دیواره) را به طور متوسط ۳۰٪ کاهش می دهد که از لحاظ اقتصادی قابل توجه است. همچنین نتایج مطالعه حاضر نشان می دهد که تغییر شکل تاج دیواره گود در روش طراحی پیشنهادی نسبت به سنتی به طور متوسط حدود ۱۰٪ بیشتر است.

واژه های کلیدی گود، میخ گذاری، روش طراحی سنتی، روش طراحی پیشنهادی، چگالی حجمی میخها و FLAC^{3D}.

Proposal of a Design Method for Soil-Nailed Walls and Compare it with the Conventional Design Method

Mohammad Hazeghian

Abstract In the conventional design method for soil-nailed walls that is based on the FHWA guidance, the nails properties (the length, spacing and diameter of nails) through the excavation depth is usually assumed constant. However, in the design method introduced in the present study (the proposed design method), the nails properties are varied through the excavation depth by step-by-step control of the factor of safety for each row of nails. In the present study, first numerical assumptions are explained and then the numerical modelling methodology is verified through the Clouterre project. Afterwards, the details of the conventional and proposed design methods are described. Next, a parametric study is performed to compare the conventional and proposed design methods. In the parametric study, the effects of the excavation depth, soil density, soil cohesion, surcharge and required factor of safety are investigated. The results of the present study show that the proposed design method compared with the conventional one would decrease on average 30% the nails volumetric density (i.e. the volume of nails divided by the wall area), which is considerable from the economical point of view. Moreover, the results show that the total displacement at the wall crest for the proposed design method is comparatively 10% higher than that of the conventional design method.

Keywords Excavation, soil nailing, Conventional design method, Proposed design method, Nails volumetric density and FLAC^{3D}.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۲/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۴/۲۸ می باشد.

Email: m.hazeghian@yazd.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

مقدمه

پایدارسازی شیروانی‌ها و گودها از لحاظ فنی، اقتصادی و ایمنی بسیار حایز اهمیت است. روش‌های متعددی مانند دیواره‌های حائل، شمع‌های درجا و کوبشی، میخ‌گذاری، مهارگذاری و... برای پایدارسازی شیروانی‌ها و گودها پیشنهاد شده و مورد استفاده قرار گرفته‌است. در این میان، روش میخ‌گذاری از محبوبیت خاصی به‌خصوص در کشور ایران برخوردار است.

روش میخ‌گذاری برای اولین بار توسط مهندسان اتریشی برای پایدارسازی دیواره‌های یک تونل به‌کار رفت. پس از آن، این روش به‌دلیل سادگی اجرا و اقتصادی بودن در سطح جهان مورد توجه قرار گرفت. در دهه اخیر، پایدارسازی شیروانی‌ها و گودها با استفاده از روش میخ‌گذاری بسیار گسترش یافته‌است [1].

در طراحی دیواره‌های میخ‌گذاری شده، طراحان همواره اقتصاد پروژه را در نظر می‌گیرند و تلاش می‌کنند با استفاده از روش‌های متفاوت و تغییر در پارامترهای طراحی شامل طول، زاویه، قطر و آرایش میخ‌ها، یک طرح بهینه از لحاظ اقتصادی ارائه دهند. تحقیق‌های متعددی در ارتباط با بهینه‌سازی طرح دیواره‌های میخ‌گذاری انجام شده‌است [2-9]. در این مطالعه‌ها، بهینه‌سازی پارامترهای مختلف شامل زاویه میخ‌ها، طول میخ‌ها و آرایش آنها مورد بررسی قرار گرفته‌است.

با استفاده از روش تعادل حدی و روابط ارائه‌شده در راهنمای FHWA، به مطالعه تأثیر عوامل مختلف شامل طول، قطر و فاصله میخ‌ها بر زاویه بهینه میخ‌ها پرداختند. آنها نشان دادند که با افزایش قطر میخ‌ها تا یک مقدار مشخص، زاویه بهینه میخ‌ها افزایش می‌یابد و سپس ثابت می‌ماند. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، زاویه بهینه میخ‌ها افزایش می‌یابد. علاوه بر این، [2] نشان دادند که افزایش چسبندگی خاک (با فرض زاویه اصطکاک داخلی ثابت) تا یک مقدار مشخص موجب کاهش زاویه بهینه میخ‌ها می‌شود اما افزایش بیشتر آن تأثیری چندانی بر زاویه بهینه میخ‌ها ندارد. [7] با استفاده از روش ژامبوی تعمیم‌یافته حداقل نیروی لازم در میخ‌ها برای دستیابی به یک ضریب اطمینان مجاز را تعیین کردند. [8] بهینه‌سازی طرح میخ‌گذاری را به‌صورت جامعی با در نظر گرفتن تمام عوامل مرتبط مانند طول، زاویه، قطر و فاصله میخ‌ها به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. [7، 8]

سطح گسیختگی بحرانی برای دیواره میخ‌گذاری شده را سطح گسیختگی آن بدون مسلح‌سازی در نظر گرفتند که فرض درستی نیست چراکه سطح گسیختگی بحرانی با حضور میخ‌ها تغییر می‌کند. [10] با به‌کارگیری روش المان محدود غیرخطی و کاهش مقاومت، آرایش بهینه میخ‌ها برای شیروانی‌های میخ‌گذاری شده با هندسه‌های متفاوت را تعیین کردند. آنها نتیجه گرفتند که زاویه بهینه میخ‌ها با افزایش زاویه شیب دامنه شیروانی افزایش می‌یابد. آنها نشان دادند که برای دیواره‌های قائم، زاویه بهینه میخ‌ها صفر درجه است. البته آنها پیشنهاد دادند اگر میخ‌ها در گمانه‌های پیش حفاری شده و تزریق دوغاب اجرا می‌شوند، زاویه میخ‌ها کمتر از ۱۰-۱۵ درجه در نظر گرفته نشود. علاوه بر این، آنها نتیجه گرفتند میخ‌های یک سوم پایداری عمق دیواره نسبت به میخ‌های یک سوم میانی و بالایی تأثیر بیشتری بر ضریب اطمینان کلی دیواره گود دارند.

هر چند تحقیقات زیادی در ارتباط با بهینه‌سازی طرح روش میخ‌گذاری انجام شده‌است، اما در اکثریت آنها فاصله و قطر میخ‌ها در عمق یک‌نواخت فرض شده‌است. این فرض را می‌توان به روش طراحی سنتی برای دیواره‌های میخ‌گذاری شده که مبتنی بر راهنمای FHWA است نسبت داد که در آن طول، فاصله و قطر میخ‌ها در عمق گود ثابت است. اما این فرض لزوماً منتهی به طرح بهینه نمی‌شود.

مقاله حاضر یک روش طراحی کاربردی ارائه می‌دهد که در آن طول، فاصله و قطر میخ‌ها می‌تواند در عمق تغییر کند و برای هر ردیف میخ مستقل از سایر ردیف‌ها باشد. ساختار مطالعه حاضر بدین صورت است که ابتدا مفروضات مدل‌سازی بیان می‌شود. سپس روش مدل‌سازی عددی صحت‌سنجی می‌شود. در ادامه با ذکر یک مثال طراحی، جزئیات روش‌های طراحی سنتی و پیشنهادی بیان و مقایسه می‌شود. در ادامه یک مطالعه پارامتری برای بررسی تأثیر عمق گود، نوع خاک، چسبندگی خاک، سربار و ضریب اطمینان پایدارسازی انجام می‌شود. در مطالعه پارامتری، طرح‌های سنتی و پیشنهادی میخ‌گذاری برای مدل‌های گود از نظر چگالی حجمی و تغییر شکل مقایسه می‌شود. در انتها نیز خلاصه و جمع‌بندی مطالعه ارائه می‌شود.

مفروضات مدل‌سازی

مراحل اصلی طراحی میخ‌گذاری شامل کنترل ضریب

$$R = \frac{E_{ur}}{E_{50}} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} - 1 \quad (2)$$

که E_{50} و E_{ur} به ترتیب مدول بارگذاری سکانت در ۵۰٪ مقاومت برشی نهایی و مدول باربرداری- بارگذاری مجدد است. برای تمامی مدل‌های مطالعه حاضر $E_{ur}=3E_{50}$ فرض شده است. هم‌چنین مدول برشی حداکثر (G_{max}) و حداقل (G_{min}) خاک نیز در مدل رفتاری CYSOIL قابل تعریف است.

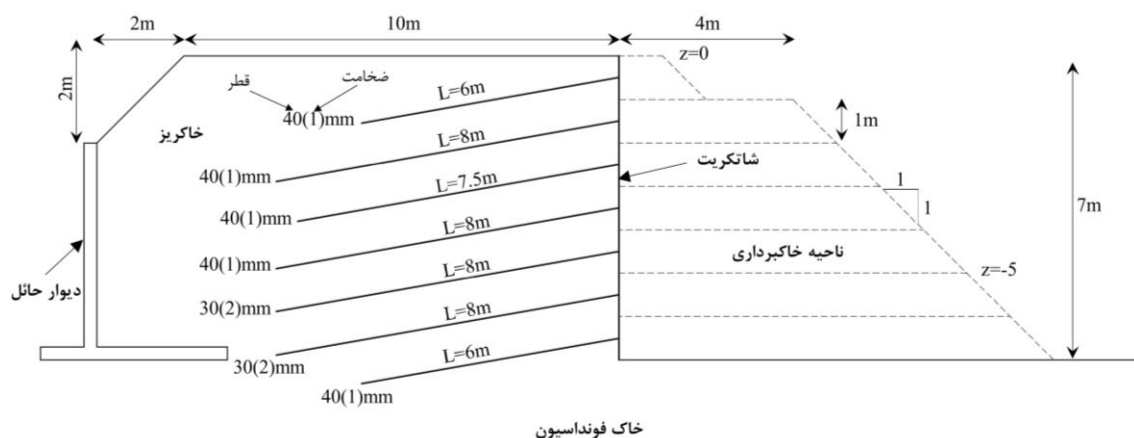
صحت‌سنجی

مدل عددی به‌کاررفته در مطالعه حاضر با مدل‌سازی یک آزمون بزرگ‌مقیاس که بر روی یک دیواره میخ‌گذاری شده در پروژه کلوتره انجام شده است [12]، صحت‌سنجی شد. ارتفاع و عرض (بعد عمود بر صفحه) دیواره میخ‌گذاری شده در پروژه کلوتره به ترتیب ۷ m و ۷/۵ m است. برای پایدارسازی خاکریز در این پروژه از ۷ ردیف میخ توخالی آلومینیومی با فاصله قائم و افقی به ترتیب ۱ m و ۱/۱۵ m استفاده شده است. شکل ۱) هندسه دیواره میخ‌گذاری شده و مشخصات ردیف‌های میخ شامل طول، قطر و ضخامت آنها را نشان می‌دهد. یک لایه پوشش شاتکریتی با ضخامت ۸۰ mm بر روی دیواره اجرا شده است [12]. در مدل‌سازی عددی، چگالی، مدول الاستیسته و نسبت پواسون شاتکریت (میخ) به ترتیب 2400 kg/m^3 (2700)، 25 GPa (70) و 0.2 (0.2) فرض شده است. جدول ۱) مشخصات خاکریز و خاک فونداسیون در مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد.

اطمینان پایداری کلی دیواره گود و تغییرشکل آن می‌شود. در مقاله حاضر، از نرم‌افزارهای GEOSLOPE و FLAC^{3D} به ترتیب برای محاسبه ضریب اطمینان و تغییرشکل استفاده شده است. نرم‌افزار GEOSLOPE یک نرم‌افزار مبتنی بر روش تعادل حدی است که قابلیت محاسبه ضریب اطمینان با روش‌های متفاوت مانند فلنیوس، عمومی جانبو، اسپنسر و... را دارد. نرم‌افزار FLAC^{3D} یک نرم‌افزار مبتنی بر روش تفاضل محدود است که برای حل مسائل در محیط‌های پیوسته به‌کار می‌رود.

در مقاله حاضر از روش اسپنسر و مدل رفتاری موهر-کولمب برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری دیواره گود استفاده شده است. تحلیل‌های تغییرشکل با فرض کرنش مسطح انجام شده است. برای مدل‌سازی میخ‌ها و شاتکریت به ترتیب از المان‌های الاستیک تیر (beam) و پوسته (shell) استفاده شد [11]. برای تحلیل تغییرشکل از مدل رفتاری CYSOIL که یک مدل رفتاری پلاستیک با پوش (کلاسیک‌دار) و با کرنش سخت‌شونده است، استفاده شده است. پارامترهای اصلی این مدل رفتاری شامل زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، زاویه اتساع (ψ)، چسبندگی (c) و نسبت پواسون خاک (ν)، توان باربرداری (m) که برای تمامی تحلیل‌های مطالعه حاضر مطابق با پیش‌فرض آن در نرم‌افزار FLAC^{3D} ۰/۵ فرض شد، ضریب بیش‌تحکیمی (OCR) که برای تمامی تحلیل‌ها ۱ در نظر گرفته شده است (خاک عادی تحکیم‌یافته)، فشار مرجع که در مطالعه حاضر برابر با فشار هوا ($P_{ref}=100 \text{ kPa}$) در نظر گرفته شده است و پارامترهای G_{ref} و R می‌شوند. پارامترهای G_{ref} و R به ترتیب از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند.

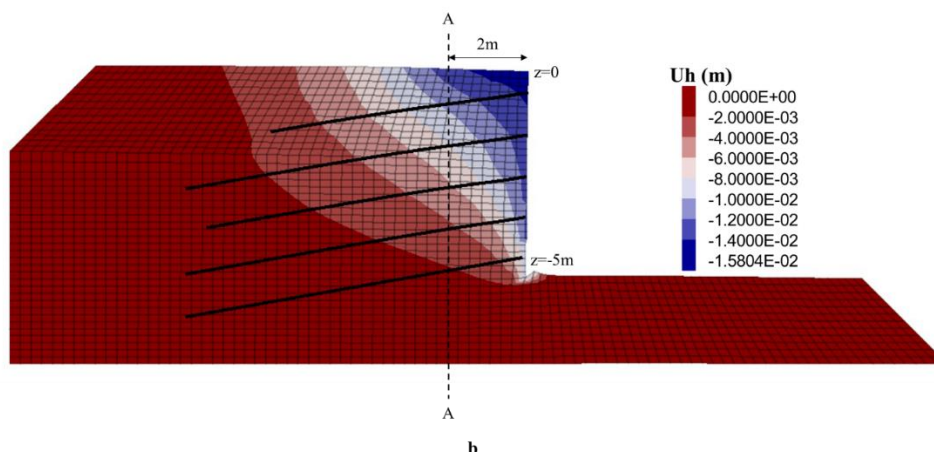
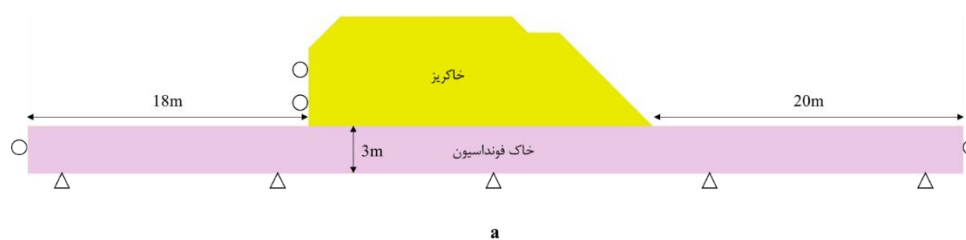
$$G_{ref} = \frac{E_{50}}{P_{ref}} \cdot \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \quad (1)$$



شکل ۱ هندسه دیواره میخ‌گذاری شده در پروژه کلوتره [۱۲]

جدول ۱ مشخصات خاک خاکریز و فونداسیون [۱۲]

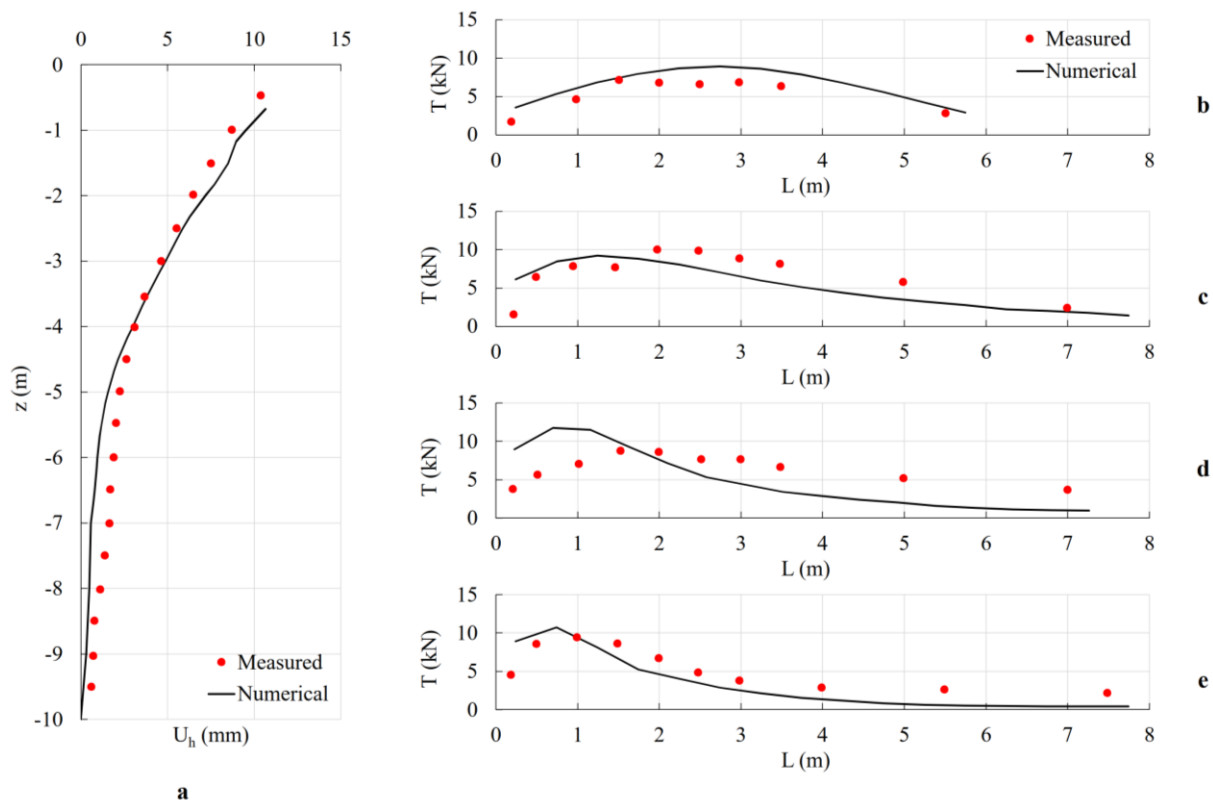
خاک فونداسیون	خاکریز	
۱۷/۰	۱۶/۱	وزن مخصوص γ ، (kN/m ³)
۷۰	۲۰	مدول بارگذاری سکانت در ۵۰٪ مقاومت برشی نهایی E_{50} ، (MPa)
۲۶/۳	۷/۵	مدول برشی حداکثر، G_{max} (MPa)
۰/۳۳	۰/۳۳	نسبت پواسون، ν
۰	۳	چسبندگی c ، (kPa)
۳۸	۳۸	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)، ϕ
۲۰	۲۵	زاویه اتساع (درجه)، ψ
۰/۳۸۴	۰/۳۸۴	ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون، K_0



شکل ۲ (a) مدل عددی پروژه کلوتره، (b) کانتور جابه‌جایی افقی خاکریز در انتهای مرحله پنجم خاکبرداری

تنش‌های برجا با در نظر گرفتن ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون در مدل ایجاد شد. در ادامه عملیات خاکبرداری، نصب شاتکریت و میخ‌ها به صورت گام‌به‌گام تا عمق $z=-5m$ (شکل ۱) انجام شد. شکل ۲- (b) کانتور جابه‌جایی افقی (U_h) خاکریز در انتهای مرحله پنجم خاکبرداری را نشان می‌دهد.

برای مدل‌سازی عددی پروژه کلوتره، ابتدا هندسه مدل به صورتی که در شکل ۲- (a) نشان داده شده است، ساخته و شرایط مرزی مدل تعریف شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مرز پایینی خاک فونداسیون در دو جهت و مرزهای دو طرف آن در جهت عمود بر صفحه بسته شده است. علاوه بر این، با فرض ناچیز و بی‌تأثیر بودن جابه‌جایی دیوار حائل بر نتایج مدل‌سازی، از مدل‌سازی دیوار حائل اجتناب و در عوض حرکت عمود بر صفحه خاکریز در محل دیوار حائل بسته شده است. سپس



شکل ۳: مقایسه داده‌های عددی و اندازه‌گیری شده جابه‌جایی افقی در امتداد محور A-A، b تا e: مقایسه نمودارهای عددی و اندازه‌گیری شده نیروی کششی میخ برحسب فاصله از سرمیخ

۸/۹ (۷/۱)، ۹/۲ (۱۰)، ۱۱/۷ (۸/۸) و ۱۰/۷ (۹/۴) کیلونیوتن است که به ترتیب اختلاف ۰/۲۳، ۰/۸، ۰/۲۸ و ۰/۱۳ با یکدیگر دارند.

معرفی روش‌های طراحی سستی و پیشنهادی

در مطالعه حاضر صرف‌نظر از روش طراحی (سستی یا پیشنهادی)، زاویه میخ‌ها نسبت به افق ۱۰ درجه و فاصله افقی هر ردیف میخ برابر با فاصله قائم آن فرض شده است. البته برای یک تا دو ردیف انتهایی میخ (نزدیک به کف گود) ممکن است فاصله قائم با فاصله افقی میخ برابر نباشد. حداقل قطر میلگرد و حداکثر فاصله میخ‌ها مطابق با راهنمای FHWA به ترتیب ۲۵ mm و ۲ در نظر گرفته شده است. حداکثر قطر میلگرد و حداقل فاصله میخ‌ها با توجه به شرایط اجرایی ۳۲×۲ mm (دو میلگرد با قطر ۳۲ mm) و ۱ m در نظر گرفته شده است. حداکثر طول میخ‌ها در بازه H - ۱ - ۰/۷ تا ۱ برابر ارتفاع دیواره گود) فرض

شکل ۳ (a) پروفیل‌های جابه‌جایی افقی اندازه‌گیری شده و عددی در امتداد محور A-A (شکل ۲، b) که در فاصله ۲ m از شاتکریت قرار دارد را مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پروفیل‌های اندازه‌گیری شده و عددی سازگار خوبی با یکدیگر دارند. مقادیر جابه‌جایی افقی اندازه‌گیری شده و عددی در تاج دیواره به ترتیب حدود ۱۰/۶ mm و ۱۰/۴ mm است که اختلافی حدود ۰/۲ دارند. شکل ۳- b تا شکل ۳- e) به ترتیب نمودارهای نیروی کششی اندازه‌گیری شده و عددی برحسب فاصله از سرمیخ در میخ‌های اول تا چهارم را مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل‌سازی عددی روند کلی تغییرات نیروی کششی در طول میخ‌ها را به صورت قابل قبولی بازتولید کرده است. مقادیر عددی حداکثر نیروی کششی در طول میخ برای میخ‌های اول، سوم و چهارم نسبت به مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده بیشتر اما برای میخ دوم کمتر است. مقادیر عددی (اندازه‌گیری شده) حداکثر نیروی کششی میخ‌ها به ترتیب

رديف ميخ بعدي) عبور مي‌کنند. با کنترل ضريب اطمینان، دو حالت ممکن است رخ دهد: حالت اول: ضريب اطمینان از مقدار موردنیاز بزرگتر است. در این حالت، طراحی میخ به پایان می‌رسد. حالت دوم: ضريب اطمینان از حداقل مقدار موردنیاز کوچکتر است. در این حالت با افزایش قطر یا کاهش فاصله میخ یا هر دو، ضريب اطمینان تأمین می‌شود. این که کدام گزینه (افزایش قطر یا کاهش فاصله میخ یا هر دو) برای تقویت طرح میخ انتخاب شود، بستگی به تجربه طراح، شرایط خاک، قضاوت مهندسی، قیمت میلگرد و هزینه اجرای گمانه (حفاری و تزریق) دارد.

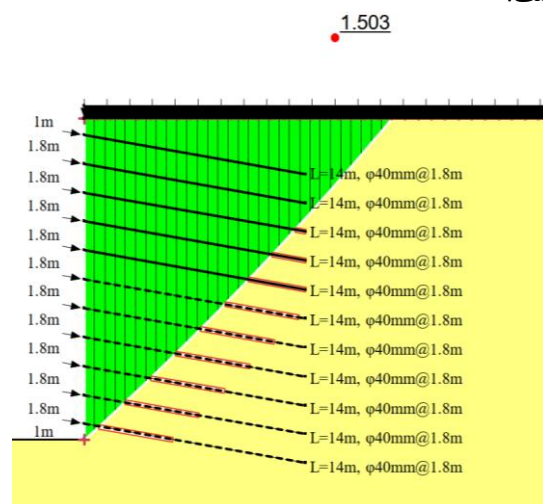
طراحی سایر ردیف‌های میخ مشابه اولین ردیف میخ با کنترل ضريب اطمینان پایداری برای هر ردیف و اصلاح طرح آن به صورت گام به گام تا کف گود انجام می‌شود.

در انتها، طول‌های اضافی میخ‌هایی که ظرفیت مجاز بیرون‌کشش (حاصل ضرب مقاومت مجاز بیرون‌کشش در طولی از میخ که پشت گوه گسیختگی قرار دارد) از ظرفیت مجاز کششی میلگرد آنها بزرگتر است، تا حد ممکن کوتاه می‌شود به طوری که ظرفیت‌های مجاز بیرون‌کشش و کششی میلگرد تقریباً برابر شود. البته باید کنترل شود که کوتاه کردن میخ‌ها موجب کمتر شدن ضريب اطمینان پایداری از مقدار موردنیاز نشود.

(شکل ۵ و شکل ۶) مراحل طراحی میخ‌گذاری براساس روش طراحی پیشنهادی برای یک دیواره ۲۰ m با ضريب اطمینان ۱/۵ را نشان می‌دهد. ارتفاع دیواره و مشخصات خاک مشابه مدل قبلی با روش طراحی سنتی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضرایب اطمینان پایداری برای تمامی ردیف‌های میخ از مقدار موردنیاز بزرگتر است. شکل ۷) طرح نهایی میخ‌گذاری با روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. روش طراحی پیشنهادی این امکان را فراهم می‌آورد که چگالی میخ‌ها در عمق دیواره متناسب با افزایش عمق (افزایش وزن گوه گسیختگی) تنظیم شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق، قطر میلگرد میخ‌ها افزایش و فاصله آنها کاهش می‌یابد. در ردیف‌های بالایی، میخ‌هایی با قطر ۲۵ mm با فاصله ۲ m برای تأمین پایداری دیواره کافی است. اما در ردیف‌های پایینی، چگالی میخ‌ها افزایش می‌یابد (میخ‌های ۳۲×۲ mm با فاصله ۱/۶

شده است. هم‌چنین مطابق با راهنمای FHWA، ضريب اطمینان‌های جزئی مقاومت کششی میلگرد و مقاومت بیرون‌کشش میخ به ترتیب ۱/۸ و ۲ لحاظ شده است.

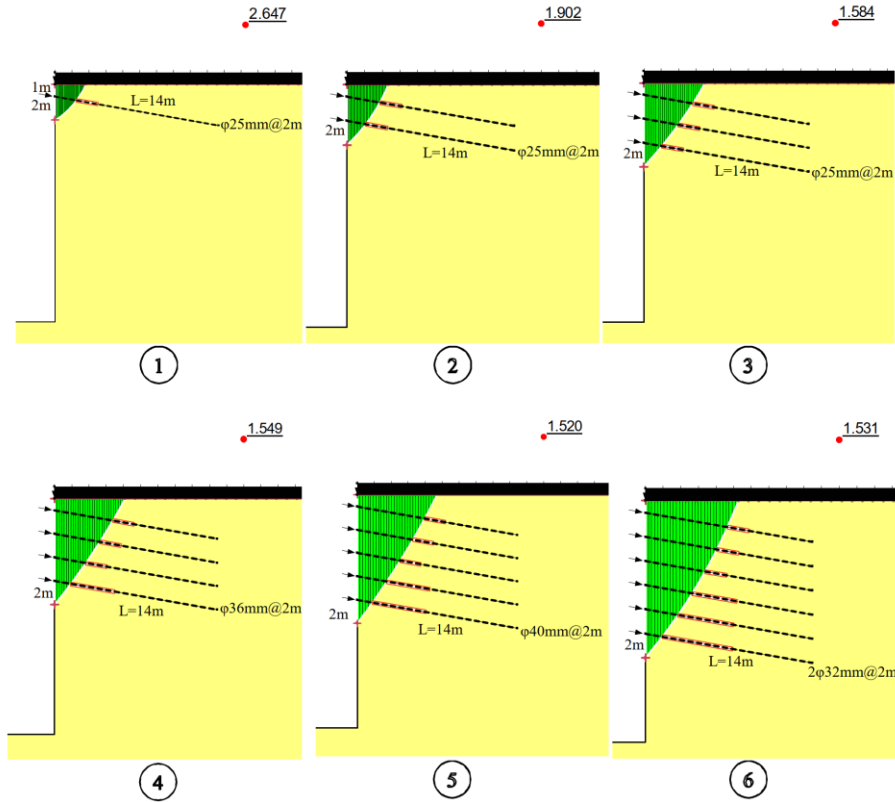
در روش طراحی سنتی، طول، قطر و فاصله میخ‌ها در عمق گود ثابت است. طول، قطر و فاصله میخ‌ها طوری انتخاب می‌شود که ضريب اطمینان پایداری موردنیاز برای دیواره گود تأمین شود. (شکل ۴) طرح میخ‌گذاری براساس روش سنتی برای یک دیواره ۲۰ m با ضريب اطمینان پایداری $FOS=1/5$ را نشان می‌دهد. طول، قطر و فاصله میخ‌ها در طرح میخ‌گذاری با روش سنتی به ترتیب ۱۴ m، ۴۰ mm و ۱/۸ است. مشخصات خاک مدل $\psi=6^\circ$ ، $\phi=36^\circ$ ، $v=0/3$ ، $E_{50}=57 \text{ MPa}$ ، $\gamma=17/8 \text{ kN/m}^3$ ، $c=10 \text{ kPa}$ ، $K_0=0/412$ و $q_u=400 \text{ kPa}$ (مقاومت نهایی بیرون‌کشش) است. سربار سطح زمین $Q=10 \text{ kPa}$ فرض شده است.



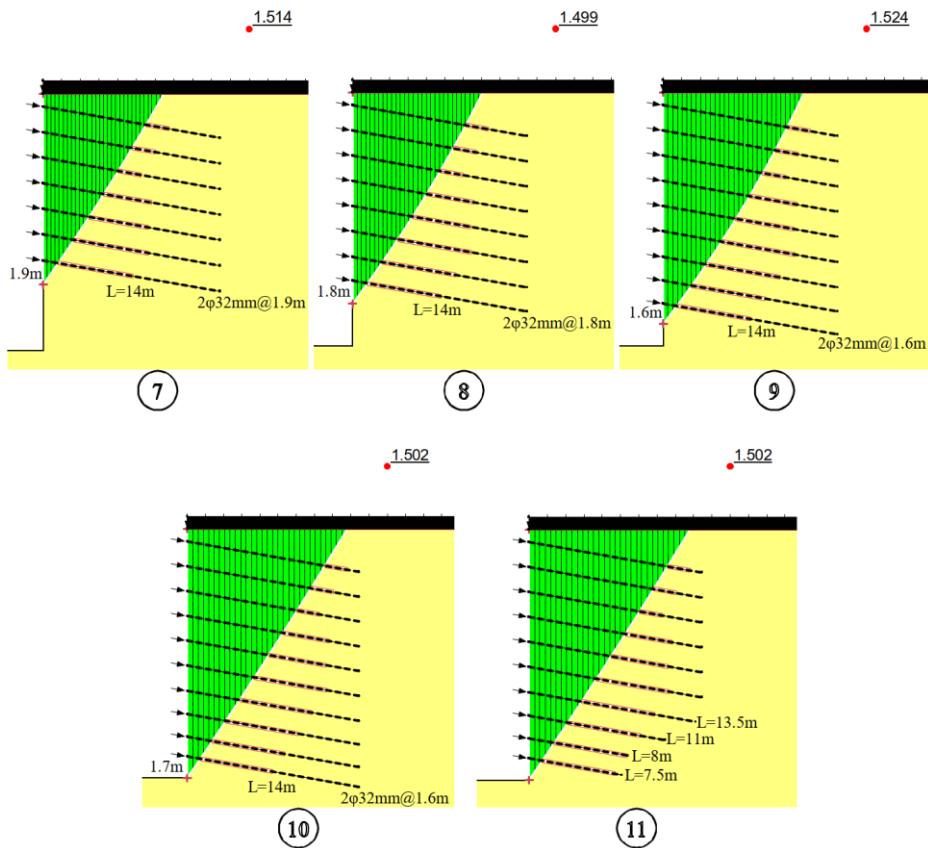
شکل ۴ طرح میخ‌گذاری با روش سنتی برای یک دیواره ۲۰ m با ضريب اطمینان ۱/۵

در روش طراحی پیشنهادی برخلاف روش طراحی سنتی، طول، فاصله و قطر میخ‌ها در عمق گود می‌تواند تغییر کند. طراحی میخ‌گذاری با روش پیشنهادی به صورت گام به گام از بالا به پایین دیواره گود انجام می‌شود که به صورت خلاصه شامل مراحل زیر است:

اولین ردیف میخ نصب می‌شود. در ابتدا حداقل قطر و حداکثر فاصله (اقتصادی‌ترین حالت) برای آن در نظر گرفته می‌شود. سپس ضريب اطمینان کنترل می‌شود. برای کنترل ضريب اطمینان، تنها گوه‌های لغزشی در نظر گرفته می‌شود که از پایین محدوده فاصله قائم اولین ردیف میخ (محل نصب



شکل ۵ مراحل اول تا ششم طراحی میخ‌گذاری براساس روش پیشنهادی برای یک دیواره ۲۰ m با ضریب اطمینان ۱/۵



شکل ۶ مراحل هفتم تا یازدهم طراحی میخ‌گذاری براساس روش پیشنهادی برای یک دیواره ۲۰ m با ضریب اطمینان ۱/۵

۰/۰۰۵۴ و ۰/۰۰۳۷ به دست می‌آید. بنابراین روش طراحی پیشنهادی نسبت به روش سنتی موجب کاهش ۳۱٪ چگالی حجمی طرح میخ‌گذاری شده است که از لحاظ اقتصادی قابل توجه است.

برخلاف بسیاری از تحقیقات پیشین [۹-۲] که تنها فاکتور ضریب اطمینان را در بهینه‌سازی طرح میخ‌گذاری در نظر گرفتند، مطالعه حاضر به فاکتور تغییرشکل نیز توجه داشته است. در تحلیل تغییرشکل، مدول الاستیسته مصالح میخ و شاتکریت به ترتیب ۲۰۰ GPa و ۲۰ GPa و نسبت پواسون آنها به ترتیب ۰/۲ و ۰/۱۵ فرض شد. شکل ۸ هندسه مدل گود و شرایط مرزی را نشان می‌دهد. ابعاد مدل و چگالی مش براساس [۱۳] انتخاب شده است. مراحل مدل‌سازی تحلیل تغییرشکل بدین صورت بود که ابتدا تنش‌های برجا داخل محیط خاکی ایجاد شد. در ادامه خاک موجود در ناحیه خاکبرداری به صورت گام به گام با حداکثر ارتفاع ۲ متر تا کف گود برداشته و نیل‌های موجود در محدوده هر پانل خاکبرداری شده نصب شد.

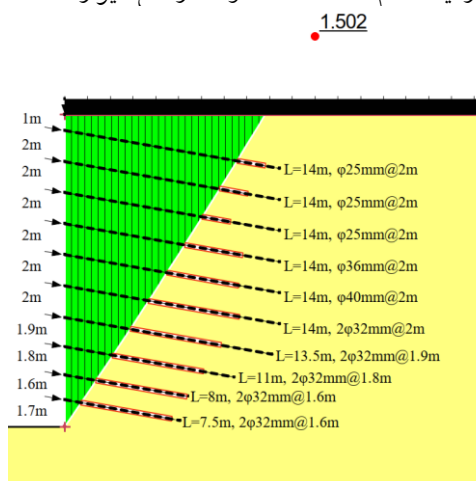
شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب کانتورهای جابه‌جایی کل دیواره گود برای طرح‌های میخ‌گذاری با دو روش سنتی و پیشنهادی را نشان می‌دهد. مقادیر جابه‌جایی کل در تاج دیواره گود برای این طرح‌ها به ترتیب ۳۵ و ۳۶ mm است که تقریباً برابرند.

در مجموع مقایسه طرح‌های میخ‌گذاری با دو روش سنتی و پیشنهادی برای مدل در نظر گرفته نشان می‌دهد روش طراحی پیشنهادی علی‌رغم کاهش قابل توجه طول حفاری و وزن میلگرد مصرفی (اقتصادی کردن طرح میخ‌گذاری) چندان موجب افزایش تغییرشکل دیواره گود نیز نمی‌شود.

توزیع بهینه میخ‌ها متناسب با عمق در روش طراحی پیشنهادی موجب اقتصادی‌تر شدن طرح میخ‌گذاری در مقایسه با روش طراحی سنتی می‌شود. به منظور مقایسه اقتصادی طرح‌های میخ‌گذاری با دو روش سنتی و پیشنهادی، چگالی حجمی (مجموع حجم میخ‌ها تقسیم بر مساحت دیواره گود) این دو طرح مقایسه می‌شود. چگالی حجمی (D_v) برای یک طرح میخ‌گذاری به صورت زیر تعریف می‌شود:

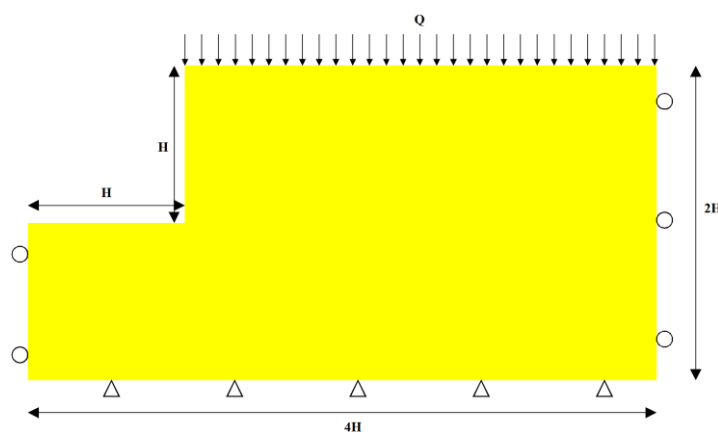
$$D_v = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_i A_i / S_{h(i)}}{H} \quad (3)$$

که در رابطه بالا، n تعداد ردیف میخ، L_i : طول میخ‌های ردیف i ام، $S_{h(i)}$: فاصله افقی میخ‌های ردیف i ام، A_i : سطح مقطع میخ‌های ردیف i ام ($A_i = \pi d_i^2 / 4$) و H ارتفاع دیواره است.

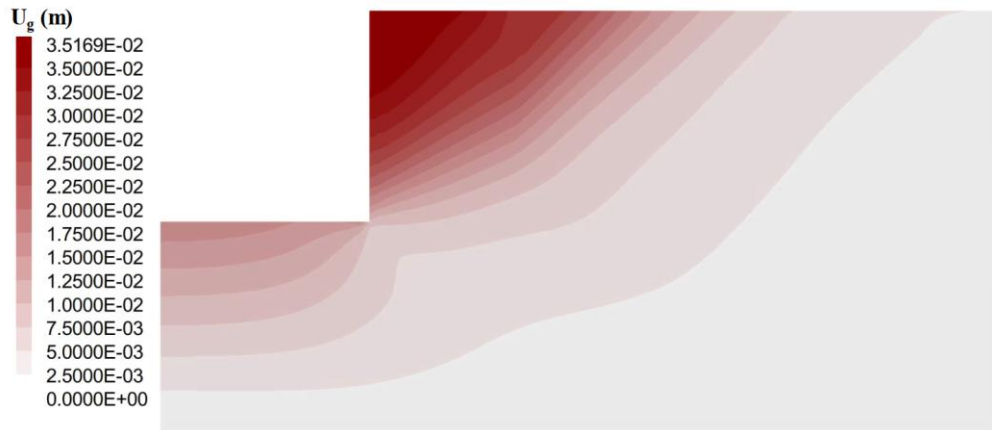


شکل ۷ طرح میخ‌گذاری با روش پیشنهادی برای یک دیواره ۲۰ m با ضریب اطمینان ۱/۵

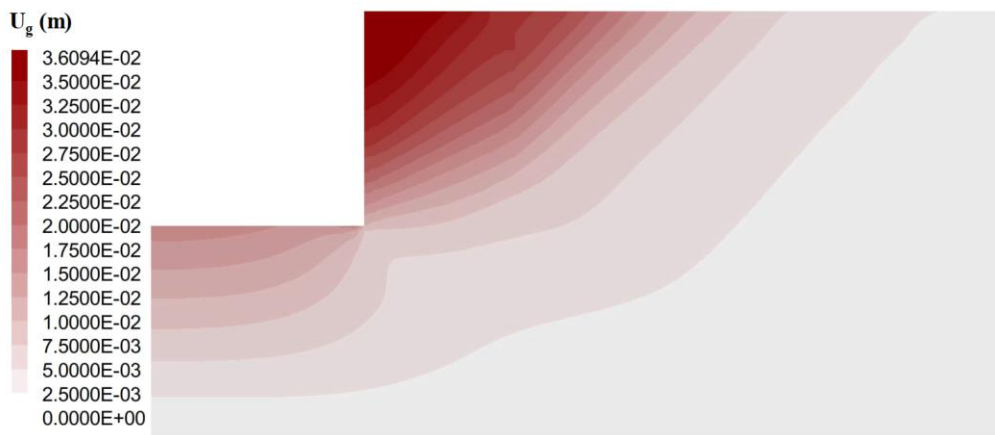
با استفاده از رابطه بالا، چگالی‌های حجمی طرح‌های میخ‌گذاری با دو روش طراحی سنتی و پیشنهادی به ترتیب



شکل ۸ ابعاد و شرایط مرزی مدل گود در مطالعه پارامتری



شکل ۹ کانتور تغییرشکل کل برای طرح میخ گذاری با روش سستی برای دیواره ۲۰ m



شکل ۱۰ کانتور تغییرشکل کل برای طرح میخ گذاری با روش پیشنهادی برای دیواره ۲۰ m

جدول ۲ جزئیات مطالعه پارامتری

FOS	Q (kPa)	H (m)	c (kPa)	نوع خاک
۱/۵	۱۰	۱۰	۱۰	شل، متوسط و متراکم
۱/۵	۱۰	۱۵	۱۰	شل، متوسط و متراکم
۱/۵	۱۰	۲۰	۱۰	شل، متوسط و متراکم
۱/۵	۱۰	۱۵	۲۰	شل، متوسط و متراکم
۱/۵	۱۰	۱۵	۳۰	شل، متوسط و متراکم
۱/۵	۲۰	۱۵	۱۰	شل، متوسط و متراکم
۱/۵	۴۰	۱۵	۱۰	شل، متوسط و متراکم
۱/۳۵	۱۰	۱۵	۱۰	شل، متوسط و متراکم
۲	۱۰	۱۵	۱۰	شل، متوسط و متراکم

جدول ۳ مشخصات انواع خاک مورد استفاده در مطالعه پارامتری

نوع خاک	γ (kN/m ³)	ϕ°	q_u (kPa)	E_{50} (MPa)
شل	۱۶/۶	۳۰	۲۰۰	۳۰
متوسط	۱۷/۸	۳۶	۴۰۰	۵۷
متراکم	۱۸/۷	۴۱	۶۰۰	۹۰

چگالی حجمی و تغییرشکل، از دو کمیت اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل استفاده می‌شود. اختلاف چگالی حجمی به صورت درصد (%) کاهش چگالی حجمی طرح پیشنهادی نسبت به طرح سنتی تعریف می‌شود. بدیهی است هر چه اختلاف چگالی حجمی بیشتر باشد، بدین معنی است که طرح پیشنهادی نسبت به طرح سنتی اقتصادی‌تر است. نسبت تغییرشکل برابر با نسبت تغییرشکل کل تاج دیواره گود در طرح پیشنهادی به مقدار متناظر آن در طرح سنتی تعریف می‌شود. در مطالعه حاضر، نسبت تغییرشکل همواره بزرگ‌تر از یک است. به عنوان مثال، اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل برای مدل نشان داده شده در بخش قبل به ترتیب برابر با $0.31 = (0.0054 / 0.037) / 0.0054$ و $1.03 = 36/35$ است.

شکل (۱۱) تغییرات اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش عمق گود را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۱-a) مشاهده می‌شود، صرف‌نظر از نوع خاک، اختلاف چگالی حجمی با افزایش عمق گود افزایش می‌یابد. با افزایش عمق گود از ۱۰ m به ۲۰، اختلاف چگالی حجمی برای خاک شل از ۲۴٪ به ۳۶٪، خاک متوسط از ۲۸٪ به ۳۸٪ و برای خاک متراکم از ۱۲٪ به ۴۳٪ افزایش می‌یابد. بیشترین تغییرات در خاک متراکم رخ داده است. همان‌طور که دیده می‌شود، اختلاف چگالی حجمی برای عمق‌های ۱۵ m و ۲۰ m با افزایش تراکم خاک افزایش می‌یابد. اما برای عمق ۱۰ m، ابتدا با تغییر نوع خاک از شل به متوسط افزایش و سپس با تغییر نوع خاک از متوسط به متراکم به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۱۱-b) نشان داده شده است، بر خلاف اختلاف چگالی حجمی، روند تغییرات نسبت تغییرشکل با افزایش ارتفاع گود ثابت نیست. برای خاک شل، تقریباً نسبت تغییرشکل با افزایش ارتفاع گود ثابت می‌ماند. برای خاک متوسط، با افزایش ارتفاع گود از ۱۰ m به ۱۵، نسبت تغییرشکل از ۱/۲۲

به منظور دستیابی به طرح بهینه در هر یک از روش‌های طراحی (سنتی یا پیشنهادی)، مراحل طراحی این روش‌ها مطابق با توضیحات بخش قبل در قالب دو برنامه کامپیوتری در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شد. با ایجاد یک لینک میان نرم‌افزارهای GEOSLOPE و MATLAB، از قابلیت نرم‌افزار GEOSLOPE برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری دیواره استفاده شد. ایجاد این لینک را می‌توان از نوآوری‌های مطالعه حاضر دانست. در برنامه‌های کامپیوتری نوشته شده، متغیرهای طراحی شامل طول، قطر و فاصله میخ‌ها با استفاده از یک دستور حلقه تغییر داده شد تا طرح‌های بهینه با کمینه کردن چگالی حجمی طرح میخ‌گذاری (D_v) به دست آید. بدین ترتیب یک طرح بهینه براساس روش طراحی سنتی و یک طرح بهینه براساس روش طراحی پیشنهادی برای هر مدل به دست آمد (در مجموع ۵۴ طرح بهینه با دو روش سنتی و پیشنهادی برای تمامی مدل‌ها در جدول ۲). جدول ۴ دامنه تغییرات متغیرهای طراحی شامل طول، قطر و فاصله میخ را نشان می‌دهد. در انتها تحلیل‌های تغییرشکل طرح‌های بهینه با دو روش سنتی و پیشنهادی (در مجموع ۵۴ تحلیل تغییرشکل) با استفاده از نرم‌افزار FLAC^{3D} انجام شد.

جدول ۴ دامنه تغییرات متغیرهای طراحی

متغیرهای طراحی	دامنه تغییرات
طول میخ	۰/۷ H، ۰/۸ H، ۰/۹ H و ۱ H
قطر میخ	۲۰، ۳۲، ۳۶، ۴۰، ۴۲ و ۴۳ mm
فاصله میخ	۱ m، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴، ۱/۵، ۱/۶، ۱/۷، ۱/۸، ۱/۹ و ۲

نتایج و بحث

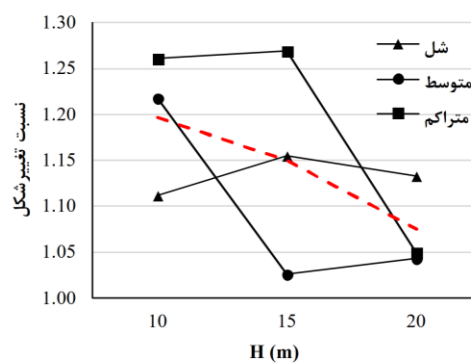
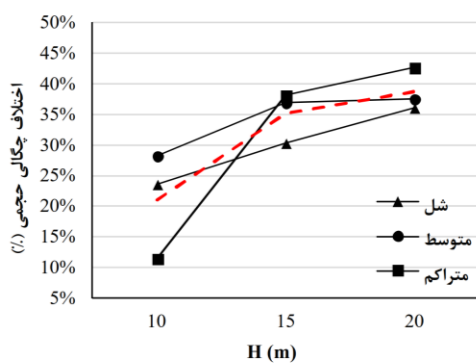
به منظور مقایسه طرح‌های سنتی و پیشنهادی از منظرهای

می‌ماند. برای خاک متوسط، ابتدا با افزایش چسبندگی از ۱۰ kPa به ۳۰، اختلاف چگالی حجمی از ۳۷٪ به ۴۳٪ افزایش و سپس با افزایش چسبندگی از ۲۰ kPa به ۳۰، به صورت قابل توجهی از ۴۳٪ به ۸٪ کاهش می‌یابد. برای خاک متراکم، با افزایش چسبندگی از ۱۰ kPa به ۳۰، اختلاف چگالی حجمی به صورت پیوسته از ۳۸٪ به ۱۵٪ کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۲-ب) مشاهده می‌شود، نسبت تغییرشکل برای خاک شل با افزایش چسبندگی تقریباً ثابت می‌ماند. با افزایش چسبندگی از ۱۰ kPa به ۳۰، نسبت تغییرشکل برای خاک متوسط از ۱/۰۳ به ۱/۱۴ افزایش و برای خاک متراکم از ۱/۲۷ به ۱/۰۶ کاهش می‌یابد. با افزایش چسبندگی خاک از ۱۰ kPa به ۳۰، میانگین اختلاف چگالی حجمی از ۳۵٪ به ۱۶٪ و میانگین نسبت تغییرشکل از ۱/۱۵ به ۱/۱۱ کاهش می‌یابد.

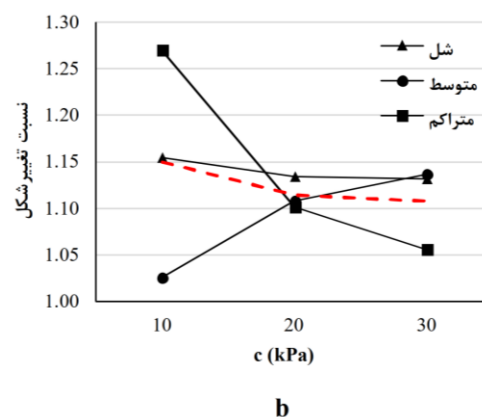
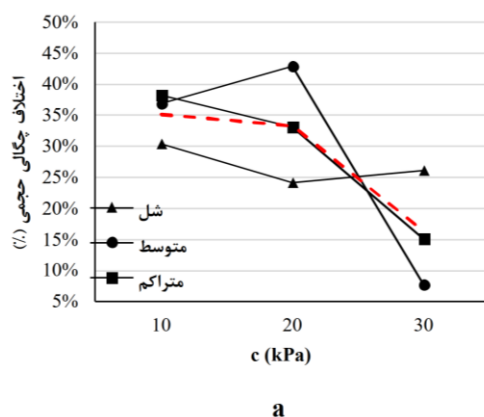
به ۱/۰۴ کاهش می‌یابد و سپس تقریباً ثابت می‌ماند. برای خاک متراکم، با افزایش ارتفاع گود از ۱۰ m به ۱۵، نسبت تغییرشکل ثابت می‌ماند و سپس با افزایش آن از ۱۵ m به ۲۰، از ۱/۲۶ به ۱/۰۵ کاهش می‌یابد.

میانگین اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با خط‌چین در شکل ۱۱) نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق گود از ۱۰ m به ۲۰، میانگین اختلاف چگالی حجمی از ۲۱٪ به ۳۹٪ افزایش و میانگین نسبت تغییرشکل از ۱/۲۰ به ۱/۰۸ کاهش می‌یابد.

شکل ۱۲) تغییرات اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش چسبندگی خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۲-ا) دیده می‌شود، برای خاک شل، با افزایش چسبندگی از ۱۰ kPa به ۲۰، اختلاف چگالی حجمی از ۳۰٪ به حدود ۲۵٪ کاهش می‌یابد و سپس ثابت



شکل ۱۱ تغییرات (a) اختلاف چگالی حجمی و (b) نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش عمق گود (FOS=۱/۵ و Q=۱۰ kPa, c=۱۰ kPa)

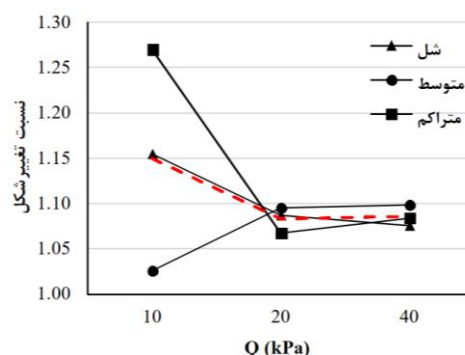
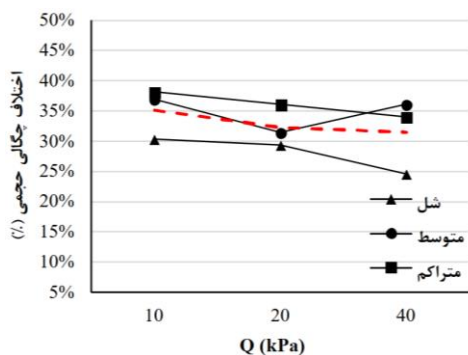


شکل ۱۲ تغییرات (a) اختلاف چگالی حجمی و (b) نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش چسبندگی خاک (FOS=۱/۵ و Q=۱۰ kPa, H=۱۵ m)

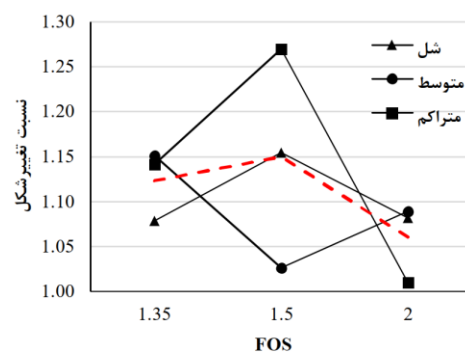
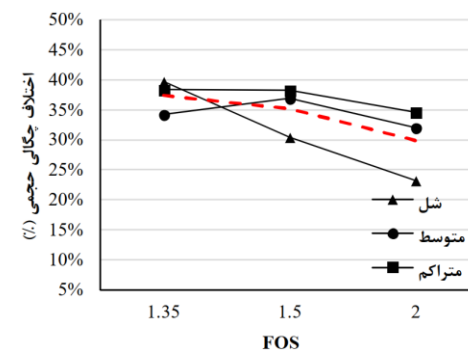
برای خاک شل از ۰.۴۰٪ به ۰.۲۳٪ و برای خاک متراکم از ۰.۳۸٪ به ۰.۳۵٪ کاهش می‌یابد. برای خاک متوسط، با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۳۵ به ۱/۵، اختلاف چگالی حجمی از ۰.۳۴٪ به ۰.۳۷٪ افزایش و سپس با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۵ به ۲، اختلاف چگالی حجمی از ۰.۳۷٪ به ۰.۳۲٪ کاهش می‌یابد. افزایش ضریب اطمینان بیشترین تأثیر را برای خاک شل دارد. با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۳۵ به ۱/۵، نسبت تغییرشکل برای خاک شل از ۱/۰۸ به ۱/۱۵ و برای خاک متراکم از ۱/۱۴ به ۱/۲۷ افزایش می‌یابد اما برای خاک متوسط، از ۱/۱۵ به ۱/۰۳ کاهش می‌یابد. با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۵ به ۲، نسبت تغییرشکل برای خاک شل از ۱/۱۵ به ۱/۰۸ و برای خاک متراکم از ۱/۲۷ به ۱/۰۱ کاهش می‌یابد اما برای خاک متوسط، از ۱/۰۳ به ۱/۰۹ افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب اطمینان، میانگین اختلاف چگالی حجمی از ۰.۳۷٪ به ۰.۳۰٪ کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۱۲ به ۱/۵، میانگین نسبت تغییرشکل از ۱/۱۲ به ۱/۱۵ افزایش و سپس با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۵ به ۲، میانگین نسبت تغییرشکل از ۱/۱۵ به ۱/۰۶ کاهش می‌یابد.

شکل ۱۳ تغییرات اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش سربار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۳-a مشاهده می‌شود، صرف‌نظر از مدل خاک متوسط با سربار ۴۰ kPa، اختلاف چگالی حجمی با افزایش سربار به صورت جزئی کاهش می‌یابد. با افزایش سربار از ۱۰ kPa به ۴۰ kPa، اختلاف چگالی حجمی برای خاک شل از ۰.۳۸٪ به ۰.۳۴٪ کاهش می‌یابد. برای انواع خاک، با افزایش سربار از ۱۰ kPa به ۲۰، نسبت تغییرشکل کاهش و سپس تقریباً ثابت می‌ماند. با افزایش سربار از ۱۰ kPa به ۴۰، میانگین اختلاف چگالی حجمی از ۰.۳۵٪ به ۰.۳۲٪ کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش سربار از ۱۰ kPa به ۲۰، میانگین نسبت تغییرشکل از ۱/۱۵ به حدود ۱/۰۸ کاهش می‌یابد و سپس ثابت می‌ماند.

شکل ۱۴ تغییرات اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش ضریب اطمینان طراحی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۴-a مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۳۵ به ۲، اختلاف چگالی حجمی



شکل ۱۳ تغییرات (a) اختلاف چگالی حجمی و (b) نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش سربار (H=۱۵ m, c=۱۰ kPa و FOS=۱/۵)



شکل ۱۴ تغییرات (a) اختلاف چگالی حجمی و (b) نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش ضریب اطمینان طراحی

(Q=۱۰ kPa و c=۱۰ kPa, H=۱۵ m)

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر یک روش طراحی برای دیواره‌های میخ‌گذاری شده ارائه می‌دهد. در روش طراحی پیشنهادی برخلاف روش طراحی سنتی، طول، قطر و فاصله میخ‌ها می‌تواند تغییر کند. در روش طراحی پیشنهادی، طراحی ردیف‌های میخ به صورت گام‌به‌گام از بالا به پایین و با کنترل ضریب اطمینان پایداری برای هر کدام از ردیف‌های میخ انجام می‌شود.

در مطالعه حاضر، ابتدا با انجام یک آزمون صحت‌سنجی، مفروضات و روند مدل‌سازی عددی اعتبارسنجی شد. سپس یک مطالعه پارامتری جامع با تغییر در نوع خاک، عمق گود، چسبندگی خاک، سربار و ضریب اطمینان پایداری شامل ۲۷ مدل انجام شد. در این مطالعه پارامتری، ابتدا طرح‌های میخ‌گذاری با دو روش طراحی سنتی و پیشنهادی برای تمامی مدل‌ها بدست آمد (مجموعاً ۵۴ طرح میخ‌گذاری). برای بهینه‌سازی طرح‌ها و هم‌چنین رفع خطای انسانی در پروسه طراحی، دو برنامه کامپیوتری در نرم‌افزار MATLAB برای طراحی میخ‌گذاری با روش‌های سنتی و پیشنهادی پیاده‌سازی شد. در این برنامه‌های کامپیوتری، یک لینک میان نرم‌افزارهای MATLAB و GEOSLOPE برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری دیواره ایجاد شد که از نوآوری‌های مطالعه حاضر محسوب می‌شود. سپس تحلیل‌های تغییرشکل مدل‌های گود با استفاده از نرم‌افزار FLAC^{3D} انجام شد.

نتایج مهم مطالعه حاضر عبارتند از:

- ۱- روش طراحی پیشنهادی نسبت به سنتی، چگالی حجمی (مجموع حجم میلگردها تقسیم بر سطح دیواره گود) طرح میخ‌گذاری را از ۸٪ تا ۴۳٪ (به‌طور متوسط ۳۰٪) برای تمامی مدل‌ها در مطالعه پارامتری) کاهش داد که از لحاظ اقتصادی قابل توجه است.
- ۲- روش طراحی پیشنهادی نسبت به سنتی تغییرشکل کل تاج دیواره گود را از ۱٪ تا ۲۷٪ (به‌طور متوسط ۱۱٪) برای

تمامی مدل‌ها در مطالعه پارامتری) افزایش داد. این بدین معنی است که روش طراحی پیشنهادی با حفظ ضریب اطمینان پایداری و علی‌رغم کاهش قابل توجه طول حفاری و وزن میلگرد مصرفی، چندان موجب افزایش تغییرشکل دیواره گود نمی‌شود.

۳- صرف‌نظر از نوع خاک، با افزایش عمق گود از ۱۰ m به ۲۰، میانگین اختلاف چگالی حجمی طرح پیشنهادی نسبت به سنتی از ۲۱٪ به ۳۹٪ افزایش می‌یابد. هم‌چنین نسبت تغییرشکل آنها (تغییرشکل کل تاج دیواره گود در طرح پیشنهادی نسبت به سنتی) از ۱/۲۰ به ۱/۰۸ کاهش می‌یابد.

۴- با افزایش چسبندگی خاک از ۱۰ kPa به ۳۰، میانگین اختلاف چگالی حجمی طرح پیشنهادی نسبت به سنتی از ۳۵٪ به ۱۶٪ و میانگین نسبت تغییرشکل آنها از ۱/۱۵ به ۱/۱۱ کاهش می‌یابد.

۵- با افزایش سربار از ۱۰ kPa به ۴۰، میانگین اختلاف چگالی حجمی طرح پیشنهادی نسبت به سنتی از ۳۵٪ به ۳۲٪ و میانگین نسبت تغییرشکل آنها از ۱/۱۵ به حدود ۱/۰۸ کاهش می‌یابد.

در مجموع مطالعه حاضر نشان داد روش طراحی پیشنهادی یک روش طراحی ساده، کاربردی و اقتصادی است که می‌تواند برای طراحی دیواره‌های میخ‌گذاری شده مورد استفاده قرار گیرد. در روش طراحی سنتی، چگالی حجمی میخ‌ها در عمق ثابت است، اما در روش طراحی پیشنهادی، چگالی حجمی میخ‌ها در عمق گود متناسب با افزایش عمق و وزن گوه گسیختگی بازتوزیع و موجب اقتصادی‌تر شدن آن نسبت به روش طراحی سنتی می‌شود. البته تغییرشکل‌های گود در روش طراحی پیشنهادی نسبت به سنتی به مقدار کمی افزایش می‌یابد که باید در طراحی‌ها مورد توجه قرار گیرد.

مراجع

1. Ausilio, E., Conte, E., and Dente, G., "Seismic stability analysis of reinforced slopes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 19, pp. 159-172, (2000).
2. Arvin, M.R., Ghavami, E., and Azari, M.M., "Optimization of Nail Inclination Angle in Soil Nail Walls Based on a

- Prevalent Limit Equilibrium Method", *Indian Geotechnical Journal*, Vol. pp. 20.
3. Cheuk, C.Y., Ho, K.K.S., and Lam, A.Y.T., "Influence of soil nail orientations on stabilizing mechanisms of loose fill slopes", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 50, pp. 1236-1249, (2013).
 4. Derghoum, R. and Meksaouine, M., "Numerical study for optimal design of soil nailed embankment slopes", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol. 12, pp. 18, (2021).
 5. Juran, I., Baudrand, G., Farrag, K., and Elias, V., "Kinematical Limit Analysis for Design of Soil- Nailed Structures", *Journal of Geotechnical Engineering-Asce*, Vol. 116, pp. 54-72, (1990).
 6. Yazdi, J.S., Rahman, M.M., and Cameron, D.A., "Effect of nail layout variability on soil nailed wall analysis", *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, (2014).
 7. Sabhahit, N., Basudhar, P.K., and Madhav, M.R., "A generalized procedure for the optimum design of nailed soil slopes", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 19, pp. 437-452, (1995).
 8. Patra, C.R. and Basudhar, P.K., "Optimum design of nailed soil slopes", 4th International Symposium on Landmarks in Earth Reinforcement, Fukuoka, Japan, A a Balkema Publishers, (2001).
 9. Ortigao, J.A.R. and Palmeira, E.M., "Optimised design for soil nailed walls", 3rd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Inst Civil Engineers, London, England, Thomas Telford Services Ltd, (1997).
 10. Fan, C.C. and Luo, J.H., "Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes", *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, pp. 585-599, (2008).
 11. FLAC3D, fast Lagrangian analysis of continua, Ver. 7, Itasca consulting group, Minneapolis, (2020).
 12. Unterreiner, P., Schlosser, F., and Benhamida, B., "Calculation of the displacements of a full scale experimental soil nailed wall-French National Research Project Clouterre", The practice of soil reinforcing in Europe: Proceedings of the symposium The practice of soil reinforcing in Europe organised by the Tenax Group under the auspices of the International Geosynthetics Society, and held at the Institution of Civil Engineers on 18 May 1995, Thomas Telford Publishing, (1995).
 13. Khodaverdian, S., Hazeighian, M., and Mokhtari, M., "Three-dimensional Numerical Study of the Effect of Convex Corners on the Displacements Induced by Excavation for Soil-Nailed Walls", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Vol. 53, pp. 7-7, (2021).