



Research Article

Technical Comparison of Seismic Stability Analysis of Excavation Walls Using Soil Nailing and Prestressed Anchors (Anchorage)

Naeem Hassouni Nejad¹, Ali Saligheh Zadeh^{2*}

1- M.Sc. in Civil Engineering – Geotechnical Engineerin, Jahad University Khuzestan, Ahvaz, Iran.

2* - Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khuzestan Jihad University Institute of Higher Education, Ahvaz, Iran

Received: 02 March 2026; Revised: 16 March 2026; Accepted: 03 April 2026; Published: 21 April 2026

Abstract

Due to rapid urban population growth and spatial constraints, the demand for designing and constructing high-rise buildings has significantly increased. This trend has led to deeper excavations and a greater need for effective stabilization methods. The present study investigates the performance of various stabilization techniques—including soil nailing, prestressed anchors (anchorage), and their combination—under static conditions, with a focus on deep excavation stability. Numerical modeling was conducted using FLAC3D software. Five static models incorporating different stabilization systems were designed, considering geotechnical soil properties, excavation dimensions, and static loading. The numerical analyses evaluated safety factors, wall displacements, and axial forces in retaining elements. Additionally, the effect of applying shotcrete was assessed across the models.

Results indicated that using soil nailing alone without shotcrete surface coverage does not provide adequate stability for deep excavations and may lead to wall failure in certain cases. Improved soil cohesion and the application of shotcrete significantly enhanced model performance. Among the static models, the anchorage system with shotcrete (Model 4) demonstrated superior performance, achieving a safety factor of 2 and minimal displacement.

In conclusion, selecting an appropriate stabilization method based on geotechnical conditions, soil cohesion, seismicity of the region, and shotcrete implementation plays a critical role in ensuring the safety and stability of deep excavations.

Keywords: Excavation, Soil Nailing, Anchorage, Shotcrete, Static Analysis, FLAC3D

Cite this article as Hassouni Najad, N and Saligheh Zadeh, A . (2026). Technical Comparison of Seismic Stability Analysis of Excavation Walls Using Soil Nailing and Prestressed Anchors (Anchorage). (e239652). Civil and Project, 8(2), e239652 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2026.572916.1428>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: a.salighehzadeh@iau.ac.ir



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

مقایسه فنی تحلیل پایداری دیواره گودبرداری با استفاده از روش میخ کوبی و مهاربند پیش تنیده (انکراژ)

نعیم حسونی نژاد^۱، علی سلیقه زاده^{۲*}

۱- کارشناس ارشد عمران ژئوتکنیک، جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۱ اسفند ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۲۵ اسفند ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴ فروردین ۱۴۰۵؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ اردیبهشت ۱۴۰۵

چکیده

با توجه به رشد سریع جمعیت در مناطق شهری و محدودیت‌های فضایی، نیاز به طراحی و ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه بیش از گذشته احساس می‌شود. این روند منجر به افزایش تعداد طبقات و عمق گودبرداری‌ها شده و ضرورت استفاده از روش‌های پایداری مؤثر را دوچندان کرده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی عملکرد روش‌های مختلف پایداری شامل میخ‌کوبی (نیلینگ)^۱، مهاربند پیش‌تنیده (انکراژ)^۲ و ترکیبی از آن‌ها در شرایط استاتیکی، با تمرکز بر پایداری گودهای عمیق انجام شده است. در این تحقیق، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D صورت گرفت. پنج مدل استاتیکی با انواع مهارهای پایداری طراحی شد و ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک، ابعاد گود و بارگذاری استاتیکی در آن‌ها لحاظ گردید. تحلیل‌های عددی شامل بررسی ضریب ایمنی، میزان جابه‌جایی دیواره و نیروی محوری در المان‌های نگهدارنده بود. همچنین، تأثیر اجرای یا عدم اجرای شاتکریت^۳ در مدل‌ها ارزیابی شد.

نتایج نشان داد که استفاده صرف از نیلینگ بدون پوشش سطحی شاتکریت نمی‌تواند پایداری لازم را در گودبرداری‌های عمیق فراهم کند و در برخی موارد منجر به گسیختگی دیواره شده است. با افزایش چسبندگی خاک و اجرای شاتکریت، عملکرد مدل‌ها به‌طور قابل توجهی بهبود یافت. در تحلیل استاتیکی، مدل انکراژ همراه با شاتکریت (مدل ۴) با ضریب ایمنی ۲ و کمترین میزان جابه‌جایی، عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها ارائه داد.

در نتیجه، انتخاب صحیح روش پایداری با توجه به شرایط ژئوتکنیکی، چسبندگی خاک و اجرای شاتکریت، نقش کلیدی در افزایش ایمنی و پایداری گودبرداری‌های عمیق ایفا می‌کند.

کلیدواژه‌ها: گودبرداری، نیلینگ، انکراژ، شاتکریت، تحلیل استاتیکی، FLAC3D.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: a.salighehzadeh@iau.ac.ir

¹ Nailing

² Anchorage

³ Shotcrete

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، به علت شتاب گرفتن ساخت‌وساز ساختمان‌های بلند در اکثر کلان‌شهرها، گودبرداری‌های عمیق و نیمه‌عمیق در پروژه‌های عمرانی به‌طور گسترده انجام می‌شود. پایداری‌سازی جداره گود از ضروریات هر پروژه عمرانی محسوب می‌شود و در مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان نیز به آن اشاره شده است. روش‌های مختلفی برای پایداری‌سازی وجود دارد که شامل روش خرابایی، مهار متقابل، سپرکوبی، اجرای شمع، دیوار دیافراگمی، سیستم مهار به پشت، میخ‌کوبی (نیلینگ) و مهاربند پیش‌تنیده (انکراژ) می‌باشند. از آنجایی که در برخی پروژه‌های گودبرداری شده، به دلایل مختلف ممکن است فاصله زمانی زیادی بین تاریخ شروع گود مهارشده تا اجرای مراحل بعدی پروژه ایجاد شود، دیواره گود در معرض خطرات تخریب قرار می‌گیرد. این عوامل شامل نفوذ آب‌های سطحی است که باعث اشباع خاک پشت دیواره شده و منجر به کاهش چسبندگی، کاهش زاویه اصطکاک داخلی و در نتیجه کاهش ضریب ایمنی می‌شود. همچنین بارهای جانبی از جمله بارهای استاتیکی می‌توانند پایداری دیواره را تهدید کنند. از این‌رو در چنین پروژه‌هایی لازم است گودها به‌صورت استاتیکی تحلیل شوند. در این تحقیق، برای تحلیل پایداری از پارامترهای مستقلی مانند مشخصات خاک، قطر و زاویه میخ، فاصله قائم میخ‌ها، ترکیب روش‌های مهار میخ‌کوبی و مهاربند پیش‌تنیده استفاده شده است تا تأثیر این عوامل بر پارامترهای وابسته‌ای نظیر جابه‌جایی دیواره، نشست سطح بالا و کف گود، نیروی محوری میخ‌ها و انکرها و ضریب ایمنی بررسی شود. بنابراین، استفاده از روشی بهینه که علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، پایداری مناسب گود را نیز تأمین کند، ضروری است. [1]

وجه تمایز این تحقیق با مطالعات پیشین در آن است که علاوه بر استفاده از روش‌های پایداری‌سازی مانند میخ‌کوبی و مهاربند پیش‌تنیده بصورت مجزا، از ترکیب این دو روش نیز بهره گرفته شده و رفتار دیوار مهارشده در نرم‌افزار FLAC3D مدل‌سازی شده است، این رویکرد با تلفیق دو روش رایج، امکان بهینه‌سازی عملکرد سازه‌ای دیواره را در برابر بارهای وارده فراهم می‌سازد. تحلیل دقیق اثرات هندسی و مکانیکی این ترکیب، زمینه‌ساز ارائه راهکارهای اجرایی مؤثر و اقتصادی در پروژه‌های عمرانی خواهد بود.

۲- مرور ادبیات

در این پژوهش، تأثیر اجرای پله در دیوارهای میخ‌کوبی‌شده با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 2D و سه مدل رفتاری خاک موهرکولمب^۱ (MCM)، سخت‌شونده^۲ (HSM) و سخت‌شونده در کرنشهای نرم^۳ (HSSM) بررسی شد. نتایج نشان داد که اجرای پله باعث کاهش قابل توجهی در تغییر شکل‌های افقی و قائم دیواره و لبه گود و همچنین افزایش ضریب اطمینان می‌شود. [1]

درصد کاهش تغییر شکل‌ها			
انواع مدل‌های رفتاری خاک	کاهش تغییر شکل افقی دیواره (%)	کاهش تغییر شکل قائم دیواره (%)	کاهش تغییر شکل افقی لبه ی بالای گود (%)
MCM	13	7	75
HSM	41	8	51
HSSM	48	10	53

¹ Mohr-Coulomb Model

² Hardening Soil Model

³ Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness

در این تحقیق، پایداری عددی گودهای عمیق به روش میخ‌کوبی با استفاده از نرم‌افزارهای GeoSlope و Plaxis بررسی شد. طراحی‌ها با در نظر گرفتن مشخصات مقاومتی خاک، سربار معادل ساختمان شش طبقه، و عمق گود تا پنج طبقه زیرزمین انجام شد. نتایج نشان داد روش میخ‌کوبی برای گودهایی تا عمق ۱۳ متر و سربار ۶۰ کیلونیوتن بر مترمربع مناسب است، اما در شرایط سخت‌تر نیاز به سیستم‌های ترکیبی مانند میخ‌کوبی و انکر وجود دارد. این مطالعه منجر به ارائه جداول و نمودارهای کاربردی برای طراحی اقتصادی شد. [2]

در این تحقیق آزمایشگاهی (عبدالهی و بلوری بزاز، ۱۳۹۷)، پایداری دیواره گود در خاک ماسه‌ای با استفاده از روش ترکیبی شمع درجا و مهار پیش‌تنیده (انکراژ) مورد بررسی قرار گرفته است. مدل فیزیکی درون جعبه‌ای فلزی با ابعاد مشخص ساخته شده و شمع‌ها با لوله‌های پلی‌پروپیلن به صورت مقیاس‌شده اجرا شده‌اند. مراحل گودبرداری از طریق درپچه‌های تدریجی شبیه‌سازی شده است. در ارزیابی عملکرد سازه نگهدارنده، سه پارامتر کلیدی شامل فاصله بین شمع‌ها (S/D)، نوع اتصال انتهای شمع‌ها (گیردار یا آزاد)، و وجود سربار در نزدیکی گودبرداری بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد:

افزایش فاصله بین شمع‌ها برخلاف انتظار، موجب کاهش جابه‌جایی جانبی دیواره و نشست سطحی زمین شده است. اتصال آزاد انتهای شمع‌ها در مقایسه با حالت گیردار، نشست سطحی زمین را تا ۹۱٪ کاهش داده است. وجود سربار در مجاورت گود، باعث افزایش ۱۷٪ تا ۳۸٪ جابه‌جایی دیواره‌ها و افزایش نشست سطحی تا ۱۶۴٪ شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی بهینه سازه نگهدارنده با در نظر گرفتن نحوه اتصال شمع‌ها و موقعیت سربار می‌تواند تأثیر چشمگیری بر پایداری گود داشته باشد. [3]

در این تحقیق، رفتار دیوار میخ‌کوبی شده دائمی تحت بار دینامیکی با استفاده از ابزارگذاری در گود هتل نرگس ۲ و مدل‌سازی در نرم‌افزار FLAC2D بررسی شد. تحلیل‌ها شامل ۱۵ شتاب‌نگاشت، سه نوع ساختگاه (مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰)، چهار نوع بار هارمونیک معادل، سه ارتفاع گود (۳، ۶، ۹ متر) و دو زاویه میخ‌گذاری بودند.

نتایج اصلی پارامترهای مستقل با توجه نوع خاک: با کاهش مقاومت برشی خاک از ساختگاه نوع ۱ به ۳، نیروی میخ‌ها، جابه‌جایی افقی و نشست افزایش یافت. زاویه میخ‌گذاری: کاهش زاویه از ۱۵° به ۱۰° باعث افزایش نیروی میخ‌ها و کاهش جابه‌جایی افقی شد. نوع بارگذاری: با تغییر نوع بار هارمونیک، رفتار گود وابسته به میرایی و جنس خاک تغییر کرد. با افزایش ارتفاع، جابه‌جایی افقی نیز افزایش یافت. [4]

در این پژوهش آزمایشگاهی، رفتار دیواره‌های میخ‌کوبی شده در خاک ماسه‌ای با تمرکز بر تغییرشکل‌های وابسته به زمان در طول عملیات گودبرداری مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس کوچک و با تحلیل استاتیکی انجام شده است. نتایج نشان داد:

با افزایش عمق گودبرداری، نشست سطحی و تغییر مکان‌های جانبی دیواره و تغییرشکل‌های زمان‌مند افزایش می‌یابد. تأخیر در عملیات موجب افزایش ۱۰۰٪ نشست آبی و ۳۱٪ تغییر مکان افقی شده و می‌تواند به سازه‌های مجاور آسیب برساند. تغییرشکل‌های زمان‌مند در بازه‌های کوتاه (مثلاً دو ساعت) نیز به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابند. روند تغییرشکل‌ها با گذشت زمان کاهش یافته که ناشی از افزایش سختی خاک است. وجود سربار در نزدیکی گود، فشار جانبی خاک را افزایش داده و موجب افزایش تغییر مکان‌های افقی می‌شود. این تحقیق اهمیت در نظر گرفتن اثر زمان و شرایط اجرایی را در طراحی و پایداری دیواره‌های میخ‌کوبی شده برجسته می‌سازد. [5]

در تحقیقی که باهدف بررسی رفتار لرزه‌ای گودبرداری‌های تقویت شده با روش میخ‌کوبی خاک انجام گردید. با استفاده از متغیرهایی مستقل از قبیل اثرات طول و زاویه میخ‌های خاکی نصب شده بر رفتار لرزه‌ای خاک‌های میخ‌کوبی شده پرداخته‌اند. برای این منظور از رکوردهای زلزله طیس و منجیل استفاده شده است. برای کنترل متغیرهای وابسته مانند پاسخ شتاب و همچنین تغییر مکان‌های عمودی و افقی در دیواره و سطح گود از نرم‌افزار تحلیل المان محدود Plaxis 2D، استفاده شد.

نتایج بررسی نشان داد برای تثبیت دیواره گود در طرح پیشنهادی از میخ هایی با طول ۳۲ میلی متر و سوراخ حفاری با عمق ۱۰۰ میلی متر استفاده شده است. همانطور که در این تحقیق مشاهده شد، حداکثر جابه‌جایی افقی در وسط دیوار اتفاق می افتد که برابر با ۵۶ میلی متر است. این نشان می‌دهد که دیوار میخ شده با خاک پایدار است. همچنین طبق مطالعات قبلی، حداکثر جابه‌جایی عمودی برابر با ۱۴۰ میلی متر است. همچنین نتایج نشان داد که طول و زاویه میخ بر پاسخ شتاب و همچنین جابه‌جایی‌های عمودی و افقی در سطح گودبرداری در طول زلزله تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این نشان داده شد که وزن سربار، نوع خاک و شتاب زلزله بر پایداری لرزه‌ای دیوارهای میخکوبی شده و ضریب تشدید تأثیر می‌گذارد. [5]

در این مطالعه، دیوارهای میخکوبی‌شده با ارتفاع‌های ۶ و ۱۰ متر تحت بارگذاری استاتیکی با استفاده از مدل سخت‌شونده خاک (HS) در نرم‌افزار PLAXIS 2D تحلیل شده‌اند. هدف، بررسی تأثیر زاویه و طول میخ، نوع خاک، و توزیع نیروها بر پایداری دیوار بوده است. نتایج نشان داد: زاویه بهینه میخ‌ها برای کاهش جابه‌جایی دیوار، ۱۵ درجه است و این مقدار مستقل از ارتفاع دیوار ثابت می‌ماند. نسبت طول به ارتفاع میخ (L/H) در مقدار ۰٫۷، بیشترین کاهش جابه‌جایی را ایجاد می‌کند؛ حدود ۳۸٪ برای دیوار ۶ متری و ۳۷٪ برای دیوار ۱۰ متری. نوع خاک تأثیر زیادی دارد؛ خاک نوع E بیشترین تغییر شکل را دارد، در حالی که خاک‌های نوع C و D عملکرد بهتری نشان می‌دهند. نیروی کششی میخ‌ها در نزدیکی پایه دیوار بیشترین مقدار را دارد و از انتهای میخ به سمت پایه کاهش می‌یابد. فشار جانبی خاک توزیع غیرخطی دارد؛ در دیوار ۶ متری بیشترین فشار در فاصله ۰٫۲۴ H از پایه و در دیوار ۱۰ متری در نزدیکی پایه مشاهده می‌شود. [6]

در این مطالعه، تأثیر زاویه نصب کابل‌های انکراژ بر پاسخ لرزه‌ای شمع‌های تثبیت‌کننده در سیستم پایداری شیب با استفاده از آزمایش‌های سانتریفیوژ بررسی شده است. متغیرهایی مانند خواص خاک، زاویه و طول کابل، و آرایش هندسی آن‌ها بر پارامترهایی نظیر نشست، فشار جانبی، نیروی محوری و گشتاور دینامیکی تحلیل شده‌اند. نتایج نشان داد:

- تغییر زاویه کابل انکراژ می‌تواند نشست سطحی و آسیب لرزه‌ای شیب را تا ۷۷٪ کاهش دهد.
- عمق لغزش با تنظیم زاویه کابل تا ۲٫۸ متر کاهش می‌یابد.
- زاویه کابل‌ها اگرچه الگوی توزیع فشار و گشتاور را تغییر نمی‌دهد، اما بر میزان و سرعت رشد آن‌ها تأثیرگذار است.
- زاویه مناسب کابل‌ها موجب کاهش نیروی داخلی و کاهش احتمال خرابی در کابل‌های انکراژ می‌شود.
- این تحقیق اهمیت زاویه نصب کابل‌های انکراژ را در بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های پایداری شیب برجسته می‌سازد. [7]

۳- روش انجام تحقیق

پژوهش حاضر با جهت بررسی عملکرد سیستم‌های مختلف پایداری دیواره‌های گودبرداری‌شده با استفاده از روش‌های نیلینگ، انکراژ و ترکیبی، تحت شرایط بارگذاری استاتیکی، به‌صورت عددی و با بهره‌گیری از نرم‌افزار FLAC3D انجام شده است. هدف آن ارائه راهکارهای بهینه برای پایداری گودهای شهری با استفاده از تحلیل‌های عددی و مقایسه عملکرد سیستم‌های مختلف تسلیح خاک است. رویکرد تحقیق، تحلیلی-مقایسه‌ای است و از مدل‌سازی عددی برای شبیه‌سازی رفتار واقعی خاک و سازه استفاده شده است. در ادامه، اجزای روش تحقیق به تفصیل شرح داده می‌شود:

مراحل انجام پژوهش

ابتدا مطالعات مقدماتی مطالعات نظری و کتابخانه‌ای به‌منظور آشنایی با اصول روش‌های نیلینگ و انکراژ، رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های مسلح‌شده، و قابلیت‌های نرم‌افزار FLAC 3D انجام شد. این مرحله شامل بررسی مقالات مرجع، تحلیل تجربیات پروژه‌های مشابه، و شناخت پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی عددی بود.

بعد از آن صحت‌سنجی مدل‌سازی برای اعتبارسنجی مدل عددی، از مطالعه لاجوردی و همکاران (۱۳۹۷) استفاده شد. مدل دوبعدی ارائه شده در مقاله مذکور به مدل سه‌بعدی تبدیل شده و نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج منتشرشده مقایسه گردید. این مرحله

نقش کلیدی در اطمینان از دقت مدل سازی و انتخاب پارامترهای مناسب داشت. در مرحله بعد، پنج مدل سه بعدی با ابعاد $24 \times 100 \times 21$ متر و گودی به عمق ۷ متر مدل سازی شد. مشخصات هندسی و مکانیکی میخ ها و سیستم های تسلیح (مهارهای نیلینگ، انکراژ و ترکیبی) مطابق با جداول ۱ و ۲ و ۳ تحت سربار 60 kn/m^2 در همه مدل ها چسبندگی خاک 15 کیلوپاسکال به جز مدل اول که چسبندگی خاک 10 کیلوپاسکال استفاده شد. و مشخصات خاک همه مدل ها طبق جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات اجرایی انکراژ			
ردیف	طول تماسی (m)	طول آزاد (m)	طول کلی (m)
۱	۴	۳	۷
۲	۴	۳	۷
۳	۳	۳	۶
۴	۳	۳	۶

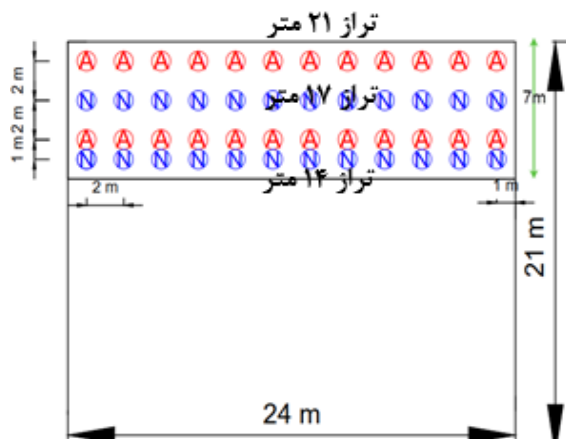
جدول ۱: مشخصات اجرایی نیلینگ		
ردیف	طول کلی (m)	قطر (mm)
۱	۷	۳۲
۲	۷	۳۲
۳	۷	۳۶
۴	۷	۳۶

در آخر استخراج و تحلیل نتایج حاصل از تحلیل عددی شامل تغییر مکان های افقی دیواره و نیروهای محوری در المان های تسلیح استخراج شد. در مجموع، ۴ نمودار برای تغییر مکان ها و ۱ نمودار برای نیروی محوری در میخ ها ترسیم گردید. تحلیل نتایج با هدف ارزیابی عملکرد نسبی سیستم های مختلف پایدار سازی و ارائه پیشنهاد های فنی انجام گرفت.

جدول ۴: خصوصیات خاک و بتن	
پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته خاک (MPa)	۳۰
چسبندگی (KP)	۱۵
وزن مخصوص kg/m^3	۱۹۰۰
زاویه اصطکاک ϕ	۳۴
نسبت پواسون خاک ν	۰/۳
مدول الاستیسیته بتن (GPa)	۲۰
نسبت پواسون بتن ν	۰,۲

جدول ۳: خصوصیات میخها (نیلینگ و انکراژ)	
پارامتر	مقدار
مدول الاستیک میخ	210 GPa
مقاوت تسلیم میخ	415 MPa
قطر میخ	32 , 36 mm
قطر سوراخ حفر شده	100 mm
زاویه میخ	15°
فاصله بین میخ ها	2 m x 2 m

نحوه آرایش المان های تسلیح



شکل ۱: آرایش میخهای ترکیبی

در مدل های ۱ و ۲: چهار ردیف میخ نیلینگ با زاویه 15° درجه نسبت به افق و فواصل 2×2 متر، اجرا شدند. مدل شماره ۳: از چهار ردیف انکراژ بهره گرفته شده است. این سیستم شامل کابل های پیش تنیده ای می باشد. در مدل شماره ۴: از ترکیب دو روش نیلینگ و انکراژ استفاده شده است. در این مدل ها، ردیف های اول و سوم به صورت انکراژ و ردیف های دوم و چهارم به صورت نیلینگ اجرا شده اند. این ترکیب، که مطابق با شکل ۱ تنظیم شده است.

در جدول ۵ انواع مدل‌ها و مشخصات آنها جهت تحلیل و بررسی ارائه شده است.

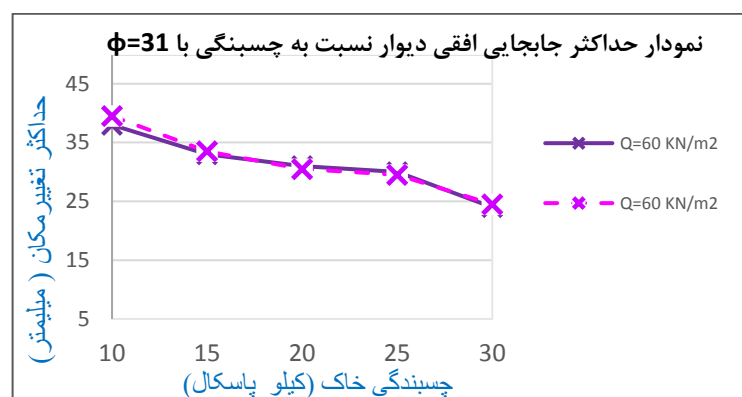
جدول ۵: انواع مدل‌ها					
مدل	نوع سیستم پایداری	شاتکریت	عرض گود	ارتفاع کل مدل	عمق گود
۱	نیلینگ بدون شاتکریت	×	24 m	21 m	7 m
۲	نیلینگ	✓	24 m	21 m	7 m
۳	انکراژ	✓	24 m	21 m	7 m
۴	ترکیبی (نیلینگ + انکراژ)	✓	24 m	21 m	7 m

۴- صحت سنجی

صحت سنجی یکی از بخش‌های مهم در تحلیل‌های عددی به شمار می‌رود که با استفاده از یک مدل اعتبارسنجی برای تأیید درستی نتایج انجام می‌شود. [8] به منظور بررسی صحت و اثبات تحلیل‌ها در نرم‌افزار FLAC3D، مدل ارائه‌شده باید مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد. در این بخش، برای اعتبارسنجی از مدل‌های مربوط به مطالعه‌ای که لاجوردی و همکاران آن با عنوان (مطالعه عددی پایداری گودهای عمیق به روش میخکوبی با ارائه جداول و نمودارهای کمک طراحی) انجام داده‌اند استفاده شده است. جهت صحت سنجی گودی به عمق ۱۰ متر از نظر جابه‌جایی دیواره توسط ۵ مدل با خاک با چسبندگی ۱۰ الی ۳۰ کیلوپاسکال و با زاویه اصطکاک ۳۱ درجه مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت و نتایج و مقایسه با مقاله اصلی در نمودار ۱ ارائه گردیده است.

۴-۱- مقایسه نتایج مدل‌های صحت سنجی با مقاله لاجوردی بر روی نمودار

❖ خط ممتد مربوط به اصل مقاله و خط چین چین مربوط به مدل‌های صحت سنجی می‌باشد.



نمودار ۱. حداکثر جابجایی افقی دیوار با چسبندگی‌های مختلف خاک مدل‌های صحت سنجی با $\phi=31$

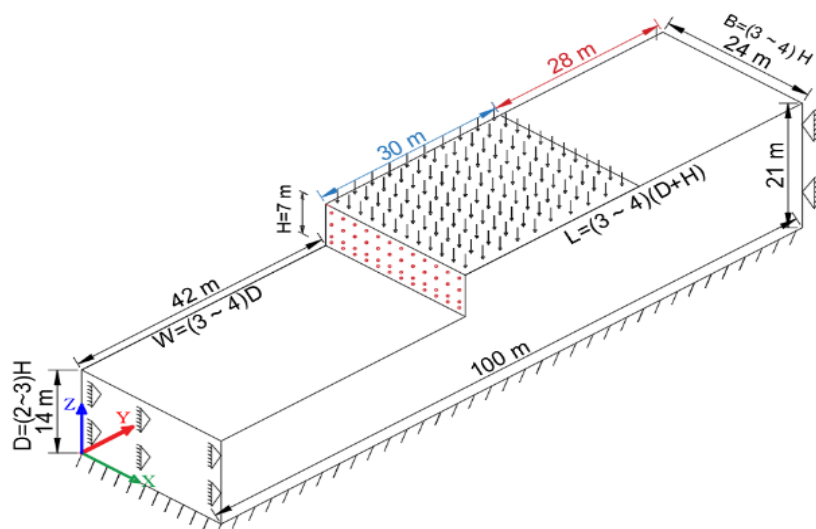
۵- هندسه مدل عددی

با توجه به نوع مدل و موقعیت آن، باید مدل به‌صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شود. این رویکرد اگرچه منجر به افزایش زمان تحلیل می‌گردد، اما برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر ضروری است. در این میان، دیواره مدل‌شده در نرم‌افزار Flac3d، به‌دلیل شرایط سربار و فاصله آن از ناحیه گودبرداری، به‌عنوان بحرانی‌ترین بخش در نظر گرفته می‌شود. [9] مرزهای مدل نیز باید به‌اندازه کافی از ناحیه گودبرداری فاصله داشته باشند تا تأثیرات تنش به‌درستی شبیه‌سازی شود. با این حال، افزایش بیش از حد این فاصله می‌تواند منجر به افزایش غیرضروری زمان تحلیل گردد. [10] بر این اساس، و با استناد به ارتفاع گودبرداری (۷ متر) و دستورالعمل ارائه‌شده در شکل ۲ ابعاد کلی مدل به‌صورت زیر تعیین شده است: عرض مدل در راستای محور X برابر با ۲۴ متر، طول آن در راستای محور Y برابر با ۱۰۰ متر، و ارتفاع در راستای محور Z معادل ۲۱ متر در نظر گرفته شده است.

ابعاد ناحیه گودبرداری نیز به گونه‌ای تعریف شده‌اند که در راستای محور X برابر با ۲۴ متر، در راستای محور Y برابر با ۴۲ متر، و در راستای محور Z ارتفاع) معادل ۷ متر باشد؛ به نحوی که پایداری دیواره‌ها تا زمان عدم وقوع ریزش تضمین گردد. [11]

سر بار اعمال شده در مجاورت گودبرداری، معادل ۶۰ کیلوپاسکال (KN/m^2) در نظر گرفته شده است که تقریباً معادل وزن یک ساختمان پنج طبقه می‌باشد. این بار گسترده با ابعاد ۳۰ متر طول و ۲۴ متر عرض بر سطح مدل اعمال شده است. تعیین دقیق محدوده اعمال سر بار، که تنها در تحلیل‌های سه بعدی امکان پذیر است، نقش مهمی در کنترل طرح و انتخاب ضریب اطمینان مناسب در طراحی حالت‌های استاتیکی ایفا می‌کند.

در تحلیل استاتیکی، شرایط مرزی به گونه‌ای تعریف شده‌اند که مرزهای جانبی به صورت تکیه‌گاه مفصلی و کف مدل به صورت گیردار در نظر گرفته شده‌اند. این شرایط با استفاده از دستور fix در نرم افزار اعمال شده و از جابجایی مدل جلوگیری می‌شود. [12]



شکل ۲: مدل سه بعدی

۶- مدل رفتاری خاک مدل عددی

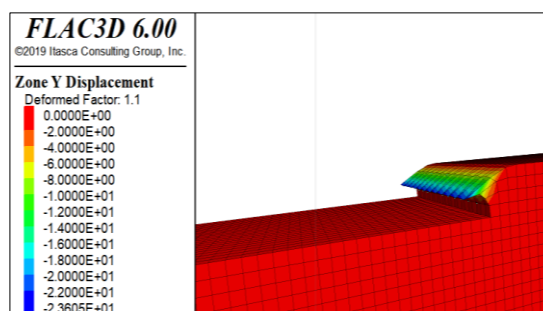
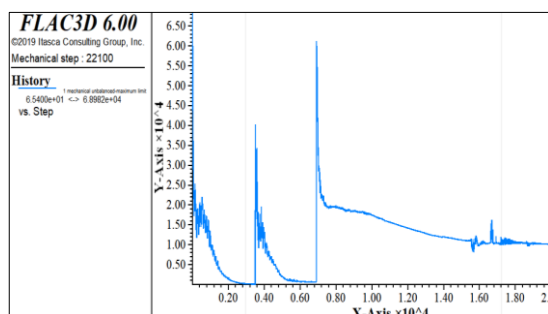
باتوجه به ویژگی‌های خاک منطقه، از مدل رفتاری Mohr-Coulomb برای مصالح خاکی استفاده شده است. در گام نخست، مدل باید به حالت تعادل اولیه برسد و پس از این مرحله، تمامی تغییر مکان‌ها صفر شده و فرآیند ساخت مدل مطابق با مراحل اجرایی پیش‌بینی شده انجام می‌گیرد. به این ترتیب، ابتدا کدنویسی لازم برای ساخت کل مدل صورت می‌پذیرد در ادامه، مراحل مختلف گودبرداری بر این اساس که در ۳ مرحله اول عمق هر سه لایه ۲ متر است و لایه چهارم یک متر حفاری انجام خواهد شد. بعد از هر مرحله، مهاربندها مطابق مشخصات ارائه شده در جدول ۱ و ۲ به همراه روکش بتنی (شاتکریت) مدل سازی می‌شوند. برای دستیابی به نتایج دقیق تر و ایجاد دید جامع تر در مورد عملکرد دیواره گود در شرایط استاتیکی، نتایج تحلیل استاتیکی برای دو وضعیت پایداری سازی نشده و پایداری سازی شده به شرح زیر ارائه شده‌اند.

۷- تجزیه و تحلیل مدل های استاتیکی

مدل ۱) بررسی استاتیکی پایداری دیواره خاکی بدون سازه ی تقویت کننده

قبل از بررسی نحوه و میزان و نوع تقویت کننده‌ها، لازم بود تا وضعیت پایداری دیواره خاکی بدون هیچ گونه عملیات بهسازی یا تسلیح مورد بررسی قرار گیرد تا میزان عملکرد سیستم نگهداری دیواره گود در مراحل بعدی سنجیده شود.

مدل اول به صورت تحلیل استاتیکی مهار شده فقط با نیلینگ طبق مشخصات جدول ۵ بدون شاتکریت و دارای خاک با چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال است که در مرحله دوم گودبرداری دچار گسیختگی شد که در شکل (ب. ۴-۱۶) نشان داده شده است.



شکل ۴: نیروهای نامتعادل کننده مدل اول

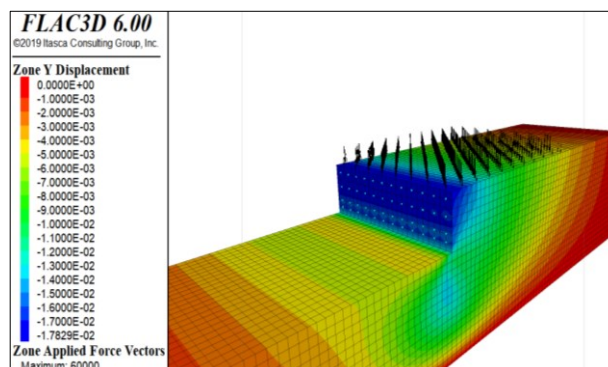
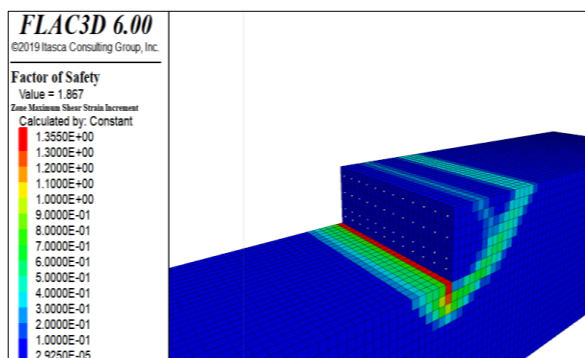
شکل ۳: مقادیر جابجایی دیواره گود مدل ۱ در امتداد محور Y

بررسی نیروهای نامتعادل کننده در شکل ۴ نشان می‌دهد که پس از

گذشت ۲۲۱۰۰ گام زمانی، برای رسیدن گود به تعادل، مقدار نیروهای نامتعادل کننده کاهش نیافته است، این موضوع بیانگر گسیختگی و شکست کامل مدل است.

مدل ۲) بررسی استاتیکی پایداری دیواره خاکی با سیستم میخکوبی و روکش بتنی

در مدل دوم که به صورت تحلیل استاتیکی مهار شده با میخ‌های خاکی (نیلینگ) در چهار ردیف با فواصل ۲ متر بصورت افقی و عمودی طبق مشخصات جداول ۵ و با روکش بتنی (شاتکریت) و دارای خاک با چسبندگی ۱۵ کیلوپاسکال است پس از تجزیه تحلیل حداکثر جابه‌جایی دیواره گود برابر با ۱۸ میلی‌متر (شکل ۵) که در سمت چپ لبه بالایی گود تراز ۲۱ متری تحت تاثیر بار استاتیکی ۶۰ کیلو پاسکال اتفاق افتاد است. در این مدل تاثیر اجرای روکش بتنی به ضخامت ۱۵ سانتیمتر باعث کاهش جابه‌جایی در دیواره و باعث افزایش ضریب ایمنی به مقدار ۱٫۸۶ شده است که در شکل ۶ ضریب ایمنی دیواره گود نشان داده شده است. در مدل دوم درصد کاهش جابه‌جایی، نسبت به مدل ۲ برابر با ۲۸٪ می‌باشد. در این مدل بیشترین تغییر مکان در سطح بالای گود در جهت Z برابر با ۳/۳- میلی‌متر و در سطح کف گود برابر ۴۷ میلی‌متر است.



شکل ۶: ضریب ایمنی مدل دوم

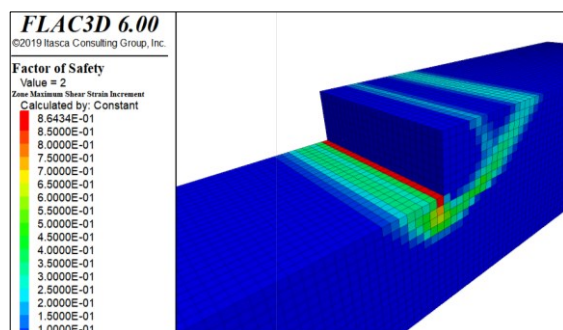
شکل ۵: مقادیر جابجایی دیواره گود مدل ۲ در امتداد محور Y

حداکثر نیروهای نامتعادل کننده ایجاد شده که در حالت استاتیکی به گود اعمال شده را نشان می‌دهد. همچنین بررسی نیروهای نامتعادل کننده نشان می‌دهد که پس از گذشت ۱۶۵۰۹ گام زمانی مقدار نیروهای نامتعادل کننده کاهش یافته است، و مقدار آن به صفر میل کرده است. که نشان دهنده تاثیر مثبت شاتکریت را تأیید می‌کند.

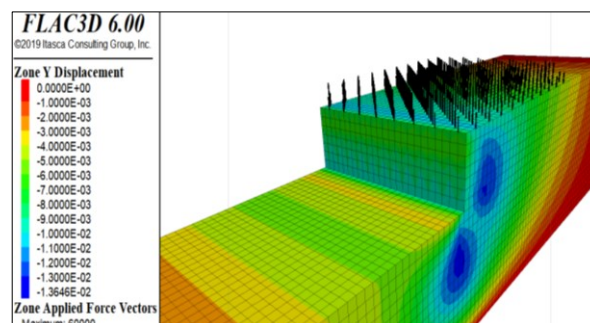
در مدل دوم که از چهار ردیف نیلینگ که با فواصل افقی و عمودی ۲ متری استفاده شده بود، حداکثر نیروی محوری میخ‌های خاکی (نیلینگ‌ها) ایجاد شده در مدل دوم در اثر بار استاتیکی برابر ۱۰/۸ کیلونیوتن است.

مدل ۳) بررسی استاتیکی پایداری دیواره خاکی با سیستم مهار پیش تنیده و روکش بتنی

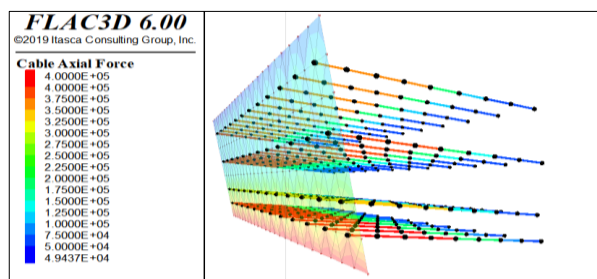
در مدل سوم به صورت تحلیل استاتیکی، پایداری دیواره خاکی که به وسیله مهار پیش تنیده (انکراژ) طبق مشخصات جدول ۵ و با روکش بتنی (شاتکریت) و دارای خاک با چسبندگی ۱۵ کیلوپاسکال است پس از تجزیه تحلیل حداکثر جابه جایی دیواره گود برابر با ۱۰ میلیمتر (شکل ۷) که در سمت راست و چپ لبه پایینی گود تراز ۱۴ متری تحت تاثیر بار استاتیکی ۶۰ کیلو پاسکال افتاد است. در این مدل تاثیر اجرای روکش بتنی به ضخامت ۱۵ سانتیمتر باعث کاهش جابه جایی در دیواره و همچنین باعث افزایش ضریب ایمنی به مقدار ۲ شده است که در شکل ۸ ضریب ایمنی دیواره گود نشان داده شده است. همچنین بررسی نیروهای نامتعادل کننده نشان می دهد که پس از گذشت ۱۵۲۴۰ گام زمانی مقدار نیروهای نامتعادل کننده کاهش یافته است، و مقدار آن به صفر میل کرده است. در این مدل بیشترین تغییر مکان در سطح بالای گود در جهت Z برابر با ۳/۱- میلیمتر و در سطح کف گود برابر ۴۷ میلیمتر است. در مدل سوم درصد کاهش جابه جایی، نسبت به مدل ۲ برابر با ۶۰٪ می باشد.



شکل ۸: ضریب ایمنی مدل سوم



شکل ۷: مقادیر جابه جایی دیواره گود مدل ۳ در امتداد محور Y



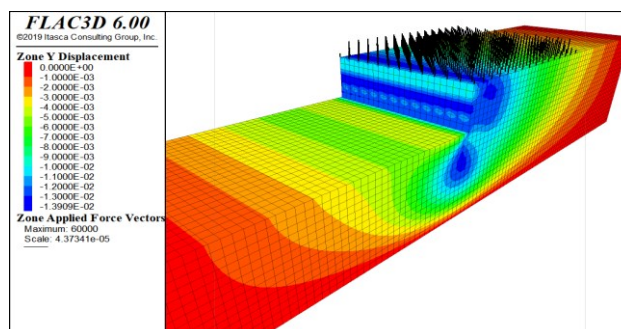
شکل ۹: حداکثر نیروی محوری انکرها مدل سوم با روکش بتنی

حداکثر نیروی محوری میخ های خاکی (انکراژها) ایجاد شده در مدل سوم در اثر بار استاتیکی برابر ۴۰۰ کیلونیوتن است که در شکل ۹ نشان داده شده است.

مدل ۴) بررسی استاتیکی پایداری دیواره خاکی با مهار ترکیبی و روکش بتنی

در مدل چهارم مدل به صورت ترکیبی از انکراژ و نیلینگ که ردیف اول و سوم از المان انکراژ و ردیفهای دوم و چهارم با نیلینگ تسلیح شده است که مشخصات مهارها طبق جدول ۵ و با روکش بتنی (شاتکریت) و دارای خاک با چسبندگی ۱۵ کیلوپاسکال است پس از تجزیه تحلیل حداکثر جابه جایی دیواره گود برابر با ۱۳ میلیمتر (شکل ۱۰) که در وسط مدل سمت چپ تراز ۱۸ متری تحت تاثیر بار استاتیکی ۶۰ کیلو پاسکال اتفاق افتاد است. در این مدل به دلیل استفاده از مهارهای ترکیبی (انکراژ و نیلینگ) نسبت مدل ۳ که فقط از مهار انکراژ استفاده شده بود، باعث شده تا تغییر مکان های دیواره گود افزایش گردد. و همچنین باعث کاهش ضریب ایمنی به مقدار ۱٫۹۲ شده است. در مدل چهارم درصد کاهش جابه جایی، نسبت به مدل ۲ برابر با ۴۸٪ می باشد.

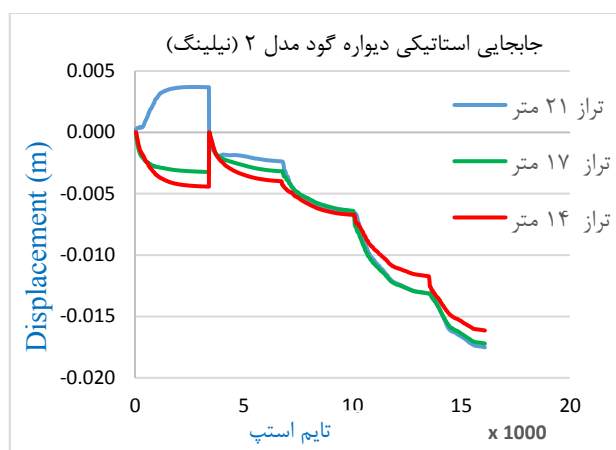
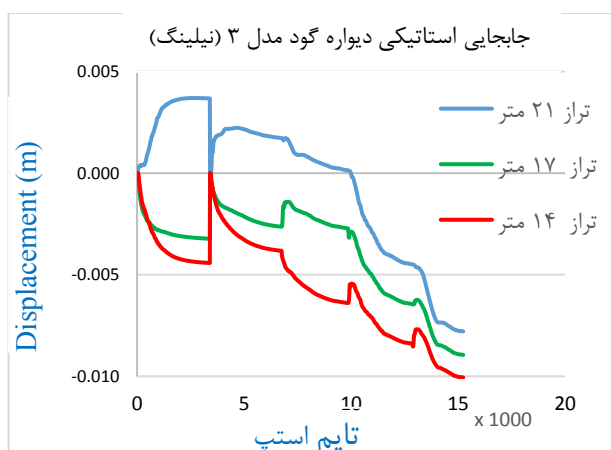
در این مدل بیشترین تغییر مکان در سطح بالای گود در جهت Z برابر با ۳/۵- میلیمتر و در سطح کف گود برابر ۴۷ میلیمتر است.



شکل ۱۰: مقادیر جابجایی دیواره گود مدل ۴ در امتداد محور Y

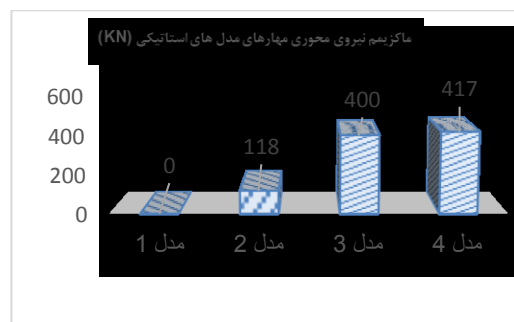
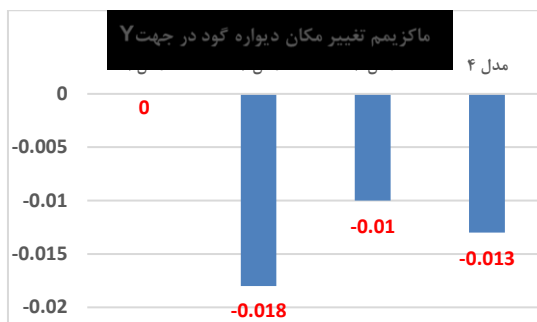
۸- نمودارهای جابه جایی دیواره گود تحت بار استاتیکی

در نمودارهای صفحه بعد که مربوط به مدل های استاتیکی می باشند مقدار چابجایی افقی دیواره گود را در ترازهای ۲۱ و ۱۷ و ۱۴ متری را نشان می دهد. که در آن محور عمودی نمودار، مقدار جابجایی و محور افقی گام زمانی (Time Step) می باشد. که نتایج مدل های استاتیکی که شامل حداکثر جابجایی ها در جهت افق و عمود، ضریب ایمنی، حداکثر نیروی محوری میخ ها در جدول ۶ بیان شده است.



نمودار ۲: جابه‌جایی دیواره گود مدل‌های تحت بار استاتیکی

جدول ۶: نتایج مدل‌ها						
نوع مدل	ضریب ایمنی FOS	ماکزیمم نیروی محوری مهارها	ماکزیمم تغییر مکان کف گود در جهت Z	ماکزیمم تغییر مکان سطح بالای گود در جهت Z	ماکزیمم تغییر مکان دیواره گود در جهت Y	ماکزیمم تغییر مکان دیواره گود در جهت X
		N	m	m	m	m
مدل ۱	مدل ۱ استاتیکی مهار شده فقط با نیلینگ بدون شلترکیت = دچار گسیختگی شده					
مدل ۲	1.86	1.18E+05	0.047	-0.0033	-0.018	1.3-E5
مدل ۳	2	4.0E+05	0.047	-0.0031	-0.010	1.44E-05
مدل ۴	1.92	4.17E+05	0.047	-0.0035	-0.013	9E-06



۹- نتیجه گیری

۹-۱- مقدمه

بررسی پایداری دیواره‌های گودبرداری، به‌ویژه در پروژه‌های عمرانی حساس، امری حیاتی برای جلوگیری از گسیختگی و نشست‌های نامطلوب است. در این پژوهش، پایداری دیواره گودبرداری به ارتفاع ۷ متر با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این مطالعه، تحلیل تأثیر انواع سیستم‌های مهار بر پایداری دیواره خاکی در شرایط استاتیکی بوده است. بدین منظور، مجموعه‌ای از مدل‌های مختلف مهار شامل نیلینگ، انکراژ، ترکیب دو سیستم مهار و تحلیل دیواره بدون مهار مورد ارزیابی قرار گرفتند.

در بررسی مدل‌ها مشخص شد که استفاده از نیلینگ بدون شاتکریت، پایداری کافی را فراهم نمی‌کند و در مواردی منجر به گسیختگی دیواره می‌شود. در مقابل، افزایش چسبندگی خاک و اجرای روکش بتنی موجب کاهش جابه‌جایی دیواره و افزایش ضریب ایمنی شده است. بهترین عملکرد در مدل انکراژ با شاتکریت مشاهده شد، جایی که ضریب ایمنی برابر با ۲ به دست آمد و مقدار جابه‌جایی به حداقل مقدار خود رسید.

۹-۲- تأثیر چسبندگی خاک بر پایداری دیواره

چسبندگی خاک نقش بسیار مهمی در مقاومت دیواره در برابر نیروهای نامتعادل کننده دارد: مدل اول (نیلینگ بدون شاتکریت) با چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال دچار گسیختگی کامل شد. مدل دوم (نیلینگ بدون شاتکریت) با افزایش چسبندگی خاک به ۲۵ کیلوپاسکال نشان داد که پایداری بهبود یافته و ضریب ایمنی به ۱,۳۶ رسید. مدل‌های دیگر که دارای چسبندگی ۱۵ کیلوپاسکال بودند، نشان دادند که این مقدار چسبندگی، در ترکیب با روش‌های مهار مختلف، تأثیر بسزایی در کاهش جابه‌جایی دارد.

۹-۲- تأثیر سیستم‌های مهار بر پایداری دیواره

الف) نیلینگ بدون شاتکریت

مدل اول نشان داد که استفاده از نیلینگ بدون روکش بتنی کارایی لازم را ندارد و باعث شکست دیواره شد.

ب) نیلینگ با شاتکریت

مدل دوم نشان داد که استفاده از شاتکریت باعث کاهش جابه‌جایی از ۲۵ میلی‌متر به ۱۸ میلی‌متر شد. ضریب ایمنی این مدل به ۱,۸۶ رسید.

ج) انکراژ با شاتکریت

مدل سوم نشان داد که انکراژ تأثیر چشمگیری در افزایش پایداری دارد:

جابه‌جایی دیواره به ۱۰ میلی‌متر کاهش یافت.

ضریب ایمنی به مقدار ۲ رسید که بالاترین مقدار ایمنی در بین مدل‌ها بود.

نیروی محوری انکراژ به ۴۰۰ کیلو نیوتن افزایش یافت که بیانگر قدرت مهار بیشتر نسبت به نیلینگ است.

د) ترکیب انکراژ و نیلینگ با شاتکریت

مدل ۴ نشان داد که ترکیب انکراژ و نیلینگ باعث افزایش جابه‌جایی نسبت به مدل سوم شد (۱۳ میلی‌متر). ضریب ایمنی به ۱٫۹۲ کاهش یافت، اما همچنان از مدل‌های نیلینگ بهتر بود.

جدول ۵-۱. مقایسه عملکرد مدل‌های استاتیکی از نظر جابه‌جایی دیواره و ضریب ایمنی						
مدل	روش مهار	شاتکریت	چسبندگی خاک (کیلوپاسکال)	حداکثر جابه‌جایی (میلی‌متر)	ضریب ایمنی	نتیجه‌گیری
۱	نیلینگ (بدون شات)	×	۱۰	گسیخته شده	-	عدم پایداری
۳	نیلینگ	✓	۱۵	۱۸	۱٫۸۶	بهبود پایداری
۴	انکراژ	✓	۱۵	۱۰	۲	بهترین عملکرد
۵	ترکیبی	✓	۱۵	۱۳	۱٫۹۲	عملکرد متوسط

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نهایی

مدل‌های فاقد شاتکریت عملکرد مطلوبی نداشتند و بطوریکه مدل اول دچار گسیختگی شد. افزایش چسبندگی خاک در مدل دوم باعث بهبود شرایط پایداری شد. اجرای شاتکریت در مدل دوم تأثیر قابل‌توجهی در کاهش جابه‌جایی و افزایش ضریب ایمنی داشت. بهترین عملکرد مربوط به مدل سوم (انکراژ با شاتکریت) بود که بیشترین کاهش جابه‌جایی و بالاترین ضریب ایمنی را ارائه داد. مدل چهارم که از ترکیب دو سیستم مهار استفاده شده بود، تعادل مناسبی را نشان داد اما نسبت به انکراژ منفرد پایداری کمتری داشت.

مراجع

- [۱] چ. خزایی و . ع. گرایلی، تدوین‌کنندگان "تأثیر مدل رفتاری در تحلیل تغییر شکل دیواره در گودبرداری عمیق"، مجله پژوهش های عمران و محیط زیست، 1396، 69-76، pp.
- [۲] لاجوردی و همکاران، "مطالعه عددی پایداری گودهای عمیق به روش میخکوبی با ارائه جداول و نمودارهای کمک طراحی"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، 1397، 18، p.
- [۳] م. عبدالحی و ج. بلوری بزاز، "مطالعه آزمایشگاهی گودبرداری به روش سیستم ترکیبی شمع و انکراژ"، نشریه مهندسی عمران فردوسی، 1397، 79-96، pp.
- [۴] ا. رحمانی و ا. نجاتی، "تغییر مکان، تعیین عملکرد رفتار دینامیکی دیوارهای خاکی میخ گذاری شده تحت بارگذاری های لرزه ای بر اساس"، علوم و مهندسی زلزله، 1398، 12، p.
- [5] F. Farrokhzad, . S. MotahariTabari , H. Tavakoli and H. Abdolghafoorkashar, Eds. "Seismic Behaviour of Excavations Reinforced with Soil-Nailing Method," *Geotechnical and geological engineering article*, 2021.
- [6] Amrita, . B. Jayalekshmi , R. Shivashankar and Shivashankar, "Numerical investigation on performance of nail stabilised vertical cuts," *Materials Today: Proceedings*, p. 10, 2023.

- [7] Wang, . Z. Tong, S. Rui , S. Zhiliang , X. Zhinan and S. Zhendong , "Influence of the anchor angle on the seismic response of anchored," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, p. 11, 2024.
- [8] S. K. Singh, M. S. Negi and J. Singh, "Strengthening of Slope by Soil Nailing Using Finite Difference and Limit Equilibrium Methods," p. 13, 2021.
- [۹] ه. حسینی و ع. فاخر, "مدلسازی عددی رفتار خزشی گودبرداریهای پایدارسازی شده با میلپهار همراه با مطالعه موردی در تهران," *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*, pp. 1081-1102, 1402.
- [10] S. Ghareh, "Parametric assessment of soil-nailing retaining structures in cohesive and cohesionless soils," *Department of Civil Engineering, Payame Noor University*, p. 11, 2015.
- [11] T. Yang, J.-F. Zou and Q.-J. Pan, "Three-dimensional seismic stability of slopes reinforced by soil nails," *Computers and Geotechnics*, p. 15, 2020.
- [12] S. Muthukumar, S. Kolathayar, . A. Vall and D. Sathyan, Eds."Pseudostatic analysis of soil nailed vertical wall for composite failure," *Geomechanics and Geoengineering*, p. 15, 2020.
- [۱۳] س. کوهستانی, ج. بلوری بزاز و م. عبدالمهی, "مطالعه آزمایشگاهی تغییر شکل تابع زمان دیواره میخکوبی شده در حین عملیات گودبرداری," *مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران*, p. 20, 1399.