Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Long-term displacement analysis of the northeastern slope of the Chadormalu open-pit mine

Roya Masoumipour[1], Saeed Mahdavi [2]✉

1. M.Sc. of Rock Mechanics, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: rmasoumi0020@gmail.com

2. Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: smahdevari@iut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 18 March 2025
Accepted 30 May 2025

Keywords:
Maxwell model, Slope stability analysis, Chadormalou mine, Numerical simulation.

ABSTRACT

The Chador-Malu open-pit mine is faces complex challenges regarding the long-term stability of its slopes. These are directly influenced by time, environmental changes, and stresses induced by mining activities. Considering the existing evidence of potential future instability, displacement changes along the northern to eastern pit walls were analyzed over an 18-month period. Long-term wall displacements were measured using radar. Through back-analysis and three-dimensional numerical simulations, the equivalent creep behavior of the slopes was evaluated using the Maxwell creep model. After assessing the geomechanical parameters, the impact of three scenarios passage of time, bench widening, and pit deepening on slope stability was investigated under three horizontal-to-vertical stress ratios of 0.5, 1, and 1.5. The analysis results indicated that a horizontal-to-vertical stress ratio of 1.5 better matched the field observations. In the first scenario, a 50% increase in time led to over a 100% increase in displacement rates, indicating a rise in instability potential over time. In the second scenario, unloading the first two benches reduces the instability potential, due to an 18% reduction in uplift while unloading up to the eighth bench increased instability potential due to the reduction of weight at the slide's toe and an increase in the average uplift. In the third scenario, pit deepening formed another sliding zone between the tenth and seventeenth benches.

Introduction

In mining engineering, the long-term stability of open-pit mine slopes is crucial because it affects safety, productivity, and environmental preservation. These slopes are susceptible to hazards such as collapse, sliding, and erosion, which can result in substantial damage. Comprehensive analysis is required to understand the influence of factors such as geomechanics, environmental conditions, pressure variations, and long-term mineral extraction on slope stability. Slope stability can be assessed using limit equilibrium methods (LEM), empirical approaches, or numerical simulations. LEM enables static and pseudo-static analyses, while empirical methods employ statistical data and machine learning. Although numerical simulations offer accurate time-dependent analysis, they require calibration with real-world data. Many studies have explored slope stability and stabilization techniques, as well as AI models for prediction. However, long-term, time-dependent assessments remain challenging. This study developed a 3D model to evaluate the stability of the northern and northeastern slopes of the Chadormalu mine. The model used radar-monitored displacement data and was calibrated with the Maxwell creep model. The study evaluated the impact of three scenarios on slope stability: time progression, bench widening, and increased depth.

Materials and Methods

Introduction and Location of Chadormalu Mine

Cite this article: Masoumipour, R., Mahdavi, S. (2025). Long-term displacement analysis of the northeastern slope of the Chadormalu open-pit mine. Journal of Engineering Geology, 19 (1), 84-103. https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.1.101084

© The Author(s).

Publisher: Kharazmi University.

DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.1.101084

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]

Discovered in 1940, the Chadormalu iron ore mine is Iran's largest producer of iron ore. It is located in the Bafq-Saghand iron ore region at an elevation of 1,450 meters. Due to extensive alteration, it is difficult to identify the original rock composition of the mine's geology, which includes a mix of igneous, metasomatic, metamorphic, and sedimentary rocks. Key geological units include schist, limestone, iron ore, diorite, granite, and conglomerate. The primary minerals are hematite and magnetite, with minor amounts of hydrated and carbonate iron and accessory minerals such as apatite, quartz, and biotite.

Due to long-term stability concerns, the displacement of the northern and northeastern pit walls was monitored using radar for 18 months, beginning in December 2018. The maximum recorded displacement was 1,660 mm at an elevation of 1,360 meters. Despite the igneous nature of the rocks, creep behavior was modeled using the Maxwell creep model due to high alteration and the observed displacement pattern.

Numerical Modeling

Due to the inability to precisely differentiate between rock types, numerical modeling using FLAC3D was performed, focusing on the weakest rock units. The model was calibrated using displacement data and three scenarios were considered: time progression, bench widening, and increased depth.

Model Construction and Simulation

To reduce model volume, the simulation geometry covered only a quarter of the pit (the northern and northeastern walls). The stress-strain analysis included a transition from elastic to plastic behavior. The Maxwell creep parameters were calibrated using back-analysis and Taguchi's method. The optimized model closely matched the observed displacement. Stress distribution patterns were then analyzed to assess long-term stability.

Results and Discussion

The mine slope stability was analyzed under three scenarios with three values of the horizontal-to-vertical stress ratio (K0): 0.5, 1, and 1.5. K0 = 1.5 was found to best match field data.

Scenario 1: Time effects showed a sliding zone from the first to the fourteenth bench after 30 and 45 days, with the rotation center at the sixth bench. Increasing K0 moved the rotation center to higher benches, reducing the sliding zone.

Scenario 2: Unloading the first two benches reduced uplift and shifted the rotation center to the fourth and fifth benches, improving stability. Further unloading caused increased uplift and a localized sliding zone at the ninth bench, raising instability.

Scenario 3: Deepening the mine by 45 meters caused minimal displacements up to the tenth bench but suggested possible failure from there to the pit bottom. Increasing depth without changing the pit’s bottom radius increased instability risk.

Overall, deeper excavation and excessive unloading heightened instability, while controlled unloading enhanced stability.

Conclusion

As previously mentioned, time-dependent deformation studies have generally focused on tunnels, with limited research on open-pit mines in this area. Therefore, in this research, considering the displacements recorded by radar on the northern and northeastern walls of the Chadormalu mine and the good agreement of the recorded displacements with the Maxwell model, the parameters of the Mohr-Coulomb failure criterion and Maxwell viscosity were evaluated using back analysis and the Taguchi design of experiments technique. After calibrating the numerical model, the effects of three scenarios—time progression, bench widening, and increasing the mine depth—on the deformation rate and slope stability of the mine wall were examined. Given the uncertainty regarding the horizontal-to-vertical stress ratio (K0), three values of 0.5, 1, and 1.5 were

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]

considered. The results of the numerical simulation indicated that:

- The horizontal stress ratio of 1.5 shows better agreement with field observations and recorded displacements. As the horizontal-to-vertical stress ratio increases, the rotation point of the sliding zone moves to higher benches (second and third benches), aligning with field evidence. Compared to models with K0 = 0.5 and 1, uplift at the pit bottom is significantly decreased in this model.
- Over time, the center of rotation of the sliding zone shifts one bench higher for all values of the horizontal-to-vertical stress ratio. While the time increases by 50%, the displacement rate increases by over 100%. The least increase is observed for K0 = 1.5.
- Widening the benches from the first to the eighth showed that only widening the first and second benches reduces the uplift rate and increases stability. Unloading the other benches increased the uplift rate and raised the potential for instability. This finding was confirmed by the limit equilibrium technique.
- Increasing the mine depth by 45 meters while maintaining the bottom width increases the likelihood of a sliding failure from around the tenth bench to the pit bottom for all considered horizontal-to-vertical stress ratios. In this potential sliding zone, localized sliding of some benches is also observed.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

بررسی جابه‌جایی‌های بلندمدت شیروانی شمال شرقی معدن چادرملو

رویا معصومی‌پور[۱]، سعید مهدوی[۲] ✉

۱. کارشناسی ارشد گروه آموزشی مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران رایانامه: rmasoumi0020@gmail.com
۲. استادیار گروه آموزشی استخراج، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: smahdevari@iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹

کلیدواژه‌ها:
مدل ماکسول، تحلیل پایداری شیروانی، معدن چادرملو، شبیه‌سازی عددی.

چکیده

معدن روباز چادرملو، با چالش‌های پیچیده‌ای در خصوص پایداری بلندمدت شیروانی‌های خود مواجه است که به طور مستقیم تحت تأثیر زمان، تغییرات محیطی و تنش‌های ناشی از عملیات استخراج قرار دارند. با توجه به شواهد موجود مبنی بر پتانسیل ناپایداری در آینده، تغییرات جابه‌جایی دیواره‌های شمالی تا شرق پیت در یک بازه زمانی ۱۸ ماهه مورد تحلیل قرار گرفته است. در این راستا، جابه‌جایی‌های بلندمدت دیواره معدن با استفاده از رادار اندازه‌گیری و با کمک تحلیل‌های برگشتی و شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی، رفتار خزشی معادل شیروانی‌ها با استفاده از مدل خزشی ماکسول مورد ارزیابی قرار گرفته است. بعد از ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی، تاثیر سه سناریوی گذر زمان، تعریض پله‌ها و افزایش عمق بر پایداری شیروانی در سه مقدار تنش افقی به قائم ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل نشان داد که نسبت تنش افقی به قائم ۱/۵ تطابق بهتری با شواهد میدانی دارد. در سناریوی اول با افزایش ۵۰ درصدی زمان، نرخ جابه جایی‌ها بیش از ۱۰۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد که بیانگر افزایش پتانسیل ناپایداری با گذر زمان است. در سناریوی دوم، با باربرداری از دو پله اول به دلیل کاهش ۱۸ درصدی بالاآمدگی، پتاسیل ناپایداری کاهش و باربرداری تا پله‌ی هشتم، به دلیل کاهش وزن در قسمت پاشنه لغزش و افزایش مقدار متوسط بالاآمدگی، پتاسیل ناپایداری را افزایش می‌دهد. افزایش عمق پیت در سناریو سوم، منجر به تشکیل یک زون لغزشی دیگر در محدوده پله‌ی دهم تا هفدهم شده است.

مقدمه

بررسی بلندمدت پایداری شیروانی معادن روباز یکی از مباحث حیاتی و پیچیده در مهندسی معدن است که نقش بسیار مهمی در ایمنی، بهره‌وری و حفظ منابع طبیعی ایفا می‌کند. شیروانی‌ها یا دیواره‌های سنگی معادن روباز، به‌عنوان یکی از اجزای اصلی ساختار معادن، در معرض خطراتی همچون ریزش، لغزش و فرسایش قرار دارند. این مسائل می‌توانند به بروز خسارات جانی، مالی و زیست‌محیطی منجر شوند و در نتیجه مدیریت صحیح و تحلیل‌های دقیق در زمینه پایداری این شیروانی‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پایداری شیروانی معادن روباز نه تنها به عوامل ژئومکانیکی و ویژگی‌های فنی خاک و سنگ بستگی دارد، بلکه باید به صورت دینامیک و در طول زمان بررسی شود. شرایط محیطی، تغییرات فشار و دما، نوسانات رطوبت، بارگذاری‌های مختلف، و همچنین تاثیرات بلندمدت استخراج مواد معدنی می‌توانند به‌طور مستقیم بر پایداری شیروانی‌ها تأثیر بگذارند. از این‌رو، مطالعه طولانی‌مدت و پیوسته وضعیت شیروانی‌ها به شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار آن‌ها در شرایط مختلف کمک می‌کند و ابزارهای نوین مانند

استناد: رویا معصومی‌پور، ر.، مهدوی، س. (۱۴۰۴). بررسی جابه‌جایی‌های بلندمدت شیروانی شمال شرقی معدن چادرملو. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۱)، ۸۴-۱۰۳
https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.1.101084

ناشر: دانشگاه خوارزمی. © نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]

شبیه‌سازی عددی، تجزیه و تحلیل‌های آماری و تکنیک‌های پیشرفته پایش مانند رادار، GPR، پایش آنلاین و آنالیز تصویری، به مهندسان و محققان امکان می‌دهند تا نقاط ضعف را شناسایی کرده و راه‌حل‌های بهینه را پیشنهاد دهند. در ارزیابی پایداری شیروانی‌ها، از سه تکنیک اصلی تعادل حدی، روش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود. تکنیک‌های تعادل حدی بر اساس حفظ تعادل نیروها و گشتاورها طراحی شده‌اند و این امکان را فراهم می‌آورند که تحلیل‌هایی در حالت‌های استاتیکی و شبه دینامیکی انجام شود (Jiang et al., 2017; Deng et al., 2025). روش‌های تجربی که بر داده‌های آماری حاصل شده از شیروانی‌های پایدار و ناپایدار استوار هستند، از مدل‌های ساده‌ی مبتنی بر رگرسیون یا الگوریتم‌های پیچیده یادگیری مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده می‌کنند و تنها در دامنه‌ی اطلاعات موجود در بانک اطلاعاتی معتبر و قابل استفاده هستند (Cao and Go, 2025; Zheng, 2012). از سوی دیگر، روش‌های مبتنی به شبیه‌سازی عددی که می‌توانند به‌صورت دوبعدی یا سه‌بعدی پیاده‌سازی شوند، این قابلیت را دارند که پیچیدگی‌های هندسی و ژئومکانیکی شیروانی‌ها را به‌طور دقیق در نظر بگیرند و تحلیل‌های دینامیکی و زمان‌محور را در محیط‌های پیوسته یا ناپیوسته نیز اجرا کنند. این روش‌ها به‌عنوان ابزارهای پیشرفته و مؤثر در تحلیل پایداری شیروانی‌ها شناخته می‌شوند، اگرچه برای به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر، به کالیبراسیون مدل‌های عددی با داده‌های واقعی برداشت‌شده نیاز دارند (Zhou and Cheng, 2013; Wang et al., 2024).

فنگ و همکاران (Feng et al., 2006) به تحلیل پایداری شیروانی‌ها و بررسی تاثیر تکنیک‌های پایدارسازی مختلف بر پایداری شیروانی‌ها با استفاده از روش تعادل حدی پرداخته‌اند و نتیجه گرفتند زه‌کشی و نگهداری شیب می‌تواند پایداری شیروانی را به طور موثر افزایش دهد. ژو و چنگ (Zhou and Cheng, 2013) با استفاده از روش تعادل حدی پایداری شیروانی‌ها را به صورت سه‌بعدی مورد بررسی قرار داده‌اند و اشاره کردند این روش می‌تواند تحلیل پایداری واقعی‌تری نسبت به روش‌های دوبعدی ارائه دهد، به‌ویژه در شرایط پیچیده هندسی، و نتایج آن برای طراحی ایمن‌تر سازه‌های مهندسی ژئوتکنیکی قابل اعتمادتر است. ژو و چنگ (Zhou and Cheng, 2014) با استفاده از تکنیک تعادل حدی پایداری لرزه‌ای شیروانی‌ها را به صورت سه‌بعدی مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند، مدل توسعه داده شده دقت بهتری در مقایسه با مدل‌های دوبعدی دارد.

احمد و همکارانش (Ahmad et al., 2023) از مدل‌های یادگیری ماشین مانند درخت تصمیم‌گیری برای پیش‌بینی پایداری شیروانی‌ها در شرایط دینامیک و استاتیک استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که این مدل‌ها با دقت بالا قادر به تمییز دادن وضعیت‌های پایدار و ناپایدار شیب‌ها بوده و می‌توانند ابزار مؤثری در مدیریت ریسک زمین‌لغزش باشند. باغبانی و همکارنش (Baghbani et al., 2024) از مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی پایداری شیروانی‌ها در سدهای خاکی استفاده کرده‌اند و با بهره‌گیری از مدل‌های آماری و یادگیری ماشین، به تحلیل پایداری شیروانی‌ها پرداخته‌اند که نتایج آن‌ها نشان‌دهنده دقت بالای این مدل‌ها در پیش‌بینی وضعیت پایداری بوده است. وانگ و همکارانش (Wang et al., 2024a, 2024b) برای پیش‌بینی پایداری شیروانی‌ها از مدل‌های ترکیبی جنگل تصادفی بهینه‌سازی‌شده توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی پرنده Sparrow Search Algorithm (SSA) و شاهین Harris Hawk Optimization (HHO) استفاده کرده‌اند و توانسته‌اند دقت پیش‌بینی را نسبت به روش‌های معمول به طور قابل توجهی افزایش دهند. ژونگ و همکارانش (Zhong et al., 2025) با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]

الگوریتم ژنتیک، به پیش‌بینی احتمال شکست شیروانی‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف پرداخته‌اند که نتایج مطالعه، نشان از افزایش قابلیت اطمینان در پیش‌بینی شکست داشت. پاندی و همکارانش (Pandey et al., 2025) با بهره‌گیری از درخت‌های تصمیم‌گیری جمعی و مدل‌های یادگیری ماشین، پایداری شیروانی‌ها در مناطق مختلف هند را تحلیل کردند و ویژگی‌های کلیدی اثرگذار بر پایداری را استخراج نمودند که می‌تواند در مدیریت ریسک زمین‌لغزش مؤثر باشد.

جین و همکارانش (Jin et al., 2003) با استفاده از مدل‌های خزشی، رفتار شیروانی‌های سنگی را در برابر عملیات حفاری تحلیل کرده و روش‌های عددی برای تحلیل پایداری شیروانی‌ها ارائه دادند که نشان داد این مدل‌ها در پیش‌بینی دقیق رفتار بلندمدت شیروانی‌ها موثرند. کاسه و همکارانش (Causse et al., 2015) به تحلیل پایداری بلندمدت شیروانی‌های تحت تأثیر حفاری تونل پرداخته‌اند و اهمیت تأثیرات زمانی را در پایداری شیب‌ها برجسته کردند. جیانگ و همکارانش (Jiang et al., 2017) به پیش‌بینی ارتعاشات انفجاری در شیروانی‌های معادن روباز پرداختند و از شبیه‌سازی‌های عددی برای تحلیل اثر انفجار بر پایداری استفاده کردند که نشان داد اثرات دینامیکی انفجارها نقش مهمی در کاهش پایداری دارند. رجبیان و واحدی‌فرد (Rajabian and Vahedifard, 2025) با تحلیل عددی به بررسی پایداری شیروانی‌های مقعر مهار شده در برابر بارگذاری‌های لرزه‌ای پرداختند که نتایج آن‌ها نشان‌دهنده بهبود پایداری با استفاده از مهار مناسب بود. هوانگ و همکاران (Huang et al., 2025) با شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی، پایداری شیروانی‌های خاکی و سنگی را در برابر شرایط هیدرولوژیکی و لرزه‌ای بررسی کردند و تحلیل‌های ژئومکانیکی خود را برای پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار شیب‌ها به‌کار بردند. وو و همکاران (Wu et al., 2025) نیز با استفاده از شبیه‌سازی‌های پسا-دینامیکی به تحلیل پایداری شیروانی‌های مهار شده تحت شرایط لرزه‌ای پرداختند و نشان دادند که این روش‌ها در ارزیابی توأم اثرات برش و کشش موثر و دقیق هستند.

با وجود تحقیقات گسترده در زمینه پایداری شیروانی‌ها، بررسی تأثیر رفتار خزشی و تغییرات طولانی‌مدت پایداری شیب‌ها، به ویژه با رویکرد سه‌بعدی و استفاده از داده‌های دقیق میدانی، همچنان محدود است و با توجه به ملاحظات اقتصادی و ایمنی، هنوز هم یکی از چالش برانگیزترین مسائل در مهندسی معدن و ژئوتکنیک است. مطالعه حاضر با ترکیب مدل‌سازی عددی سه‌بعدی و داده‌های راداری زمان‌بندی‌شده، تحلیل پایداری شیروانی‌ها را به صورت تابعی از زمان انجام داده است. این رویکرد جامع، با در نظر گرفتن تأثیر سناریوهای مختلف تغییرات هندسی شیب، نقطه تمایز اصلی تحقیق حاضر با تحقیقات انجام شده در این زمینه است.

لذا در پژوهش حاضر بعد از معرفی معدن چادرملو و بررسی جابه‌جایی‌های برداشت شده توسط رادار، مدل سه بعدی به منظور بررسی پایداری شیروانی شمالی و شمال شرقی پیت توسعه داده شده است. سپس با توجه به گراف جابه‌جایی‌های برداشت شده به عنوان تابعی از زمان و مدل خزشی ماکسول، کالیبرلسیون مدل عددی به اساس تابع خطای تعریف شده بر مبنای جابه‌جایی‌های تابع زمان، انجام شده است و تاثیر سه سناریوی گذر زمان، تعریض پله و افزایش عمق بر پایداری شیروانی مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

زمین‌شناسی و موقعیت معدن چادرملو

معدن سنگ‌آهن چادرملو بزرگترین کانسار آهن در ایران مرکزی است. نام این کانسار ترکیبی مختصر شده از سه لغت چاه، دره و ملون استو، ملون به معنای نوعی گربه وحشی است.کانسار چادرملو در سال ۱۳۱۹ کشف شده و معدن

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]

چادرملو در حال حاضر بزرگ‌ترین تولیدکننده سنگ‌آهن کشور است (CMIC and KKSHEC, 2015). کانسار آهن چادرملو در منطقه آهن‌خیز بافق ساغند در قلب کویر مرکزی ایران، در دامنه‌ی شمالی کوه‌های چاه محمد و در حاشیه‌ی جنوبی نمک‌زار ساغند قراردارد. این کانسار در استان یزد و در فاصله ۱۸۰ کیلومتری شمال شرق شهر یزد و ۶۵ کیلومتری شمال شهرستان بافق و ۵۰ کیلومتری شمال معدن چغارت، در ارتفاع ۱۴۵۰ متری از سطح دریا قرار دارد (Abrishami, 1993). پیت اولیه معدن با پهنای حدود ۹۶۰ متر و با حداکثر عمق ۲۲۵ متری برای مدت ۳۰ سال طراحی شده است. بر مبنای این طرح عرض پله‌ی ایمنی ۱۰ متر، ارتفاع پله‌ها ۱۵ متر، زاویه‌ی شیب پله‌ها ۶۹/۵ درجه و زاویه‌ی شیب معدن برای کلیه‌ی دیواره ها ۵۴/۷۳ درجه است (EBE. M.C.M.P). در شهریور سال ۱۳۷۴ با شروع عملیات استخراج از آنومالی شمالی و با افزایش تعداد پله‌ها، ناپایداری‌هایی در معدن مشاهده شده است (Badagh Abadi, 2003).

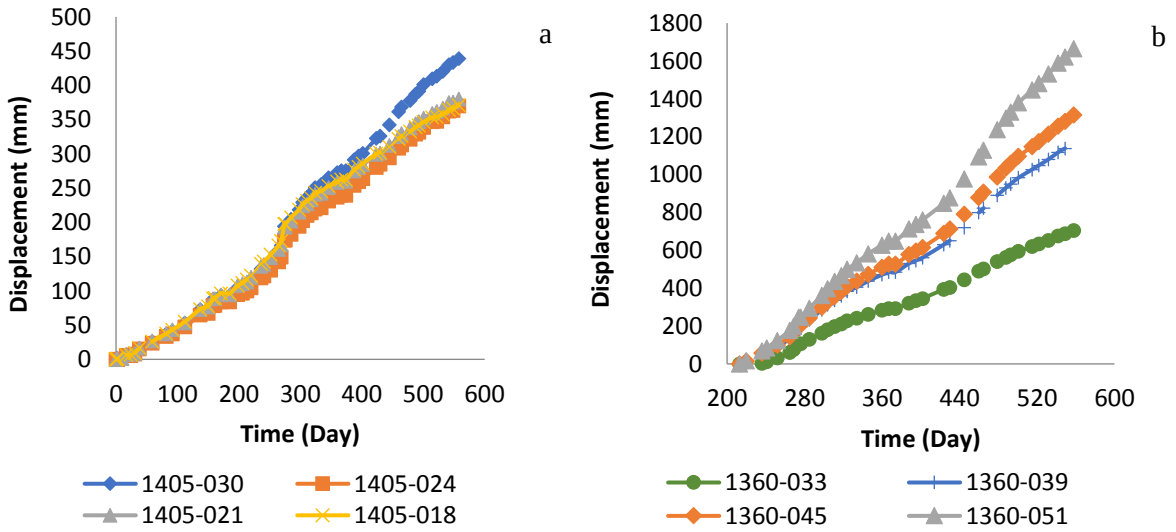
قسمت مرکزی توده‌ی شمالی را سنگ‌های آذرین درونی دربرگرفته‌اند. واحدهای سنگی براساس دوران زمین‌شناسی از قدیم به جدید به شرح زیر می‌باشد، واحد سنگی شیست، آهک، سنگ‌آهن، دیوریت، گرانیت، مگابرش، فانگلومرا و واحد آبرفتی (CMIC and KKSHEC, 2015). انواع سنگ‌های آذرین، متاسوماتیت، دگرگونی و رسوبی در منطقه‌ی چادرملو وجود دارند. سنگ‌های آذرین به‌دلیل وقوع مکرر ماگماتیسم، ترکیب شیمیایی متفاوتی دارند و دامنه‌ی وسیعی از سنگ‌های آذرین بازی، اسیدی و متاسوماتیت را شامل می‌شود. سنگ‌های رسوبی از کنگلومرا، مارن، دولومیت، ماسه سنگ و برش تشکیل می‌شوند و سنگ‌های دگرگونی شامل میکاشیست، گارنت شیست و آندالوزیت-سیلیمانیت شیست، مرمر، آمفیبولیت، کوارتزیت و گنیس هستند. اکثر این سنگ‌ها دگرسانی شدیدی را به علت تحمل پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی، از خود نشان می‌دهند، به‌گونه‌ای‌که این تغییرات در مواردی مانع شناخت ترکیب اولیه و اصلی سنگ‌ها می‌شود. هماتیت و مگنتیت از کانی‌های اصلی معدنی موجود در معدن سنگ آهن چادرملو بوده و آهن هیدراته و کربناته به مقدار اندک حضور دارند. کانی‌های فرعی، نظیر آپاتیت، کوارتز، کربنات‌ها، کلریت، ژیپس و بیوتیت نیز وجود دارند (Middlemost, 1980; Cox et al., 1979).

با توجه به شواهدی از پتانسیل ناپایداری بلند مدت، تغییرات جابه‌جایی دیواره‌های شمالی تا شرق پیت در بازه زمانی ۱۸ ماهه از آذر سال ۹۷ با استفاده از رادار مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور پایش و اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطحی شیروانی‌ها از رادار اینترفرومتری موج میلی‌متری مدل MSR250 ساخت شرکت REUTECH آفریقای جنوبی استفاده شده است. رادار MSR250 قابلیت پایش ناپیوسته و پیوسته شیروانی‌ها را در فواصل تا ۲۵۰۰ متر با دقت زیر میلی‌متر دارد. میدان دید گسترده این دستگاه شامل ۱۸۰ درجه افقی و ۱۲۰ درجه قائم است که امکان پوشش کامل دیواره‌های معدن را فراهم می‌کند. این سیستم راداری، با قابلیت عملکرد در شرایط محیطی سخت نظیر گردوغبار، بارش و گرمای شدید، امکان پایش ایمن و دقیق رفتار شیروانی‌ها در شبانه‌روز را فراهم نموده و به‌صورت موثر در تحلیل پایداری بلندمدت به کار گرفته شده است. شکل ۱ دو نمونه از گراف‌های جابجایی‌های برداشت شده از تراز‌های ۱۳۶۰ و ۱۴۰۵ را نمایش داده شده است که حداکثر جابجایی برداشت شده برابر ۱۶۶۰ میلی‌متر است در تراز ۱۳۶۰ متری است. هر دو گراف افزایش جابه‌جایی‌ها را به صورت تابعی از زمان نمایش می‌دهند که معادل فاز اولیه خزش است و با استفاده از مدل خزشی ماکسول امکان شبیه‌سازی آن وجود دارد. تفاوت در جابه‌جایی‌های ثبت شده در یک پله به دلیل تفاوت در جنس سنگ‌ها است، به دلیل

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]

سطح دگرسانی بالا امکان تفکیک دقیق واحدهای سنگی از یکدیگر مقدور نبود. لذا در تحلیل پایداری به صورت محافظه‌کارانه برای ضعیف‌ترین جنس سنگ که بیشترین تغییرشکل را متحمل شده، انجام شده است.

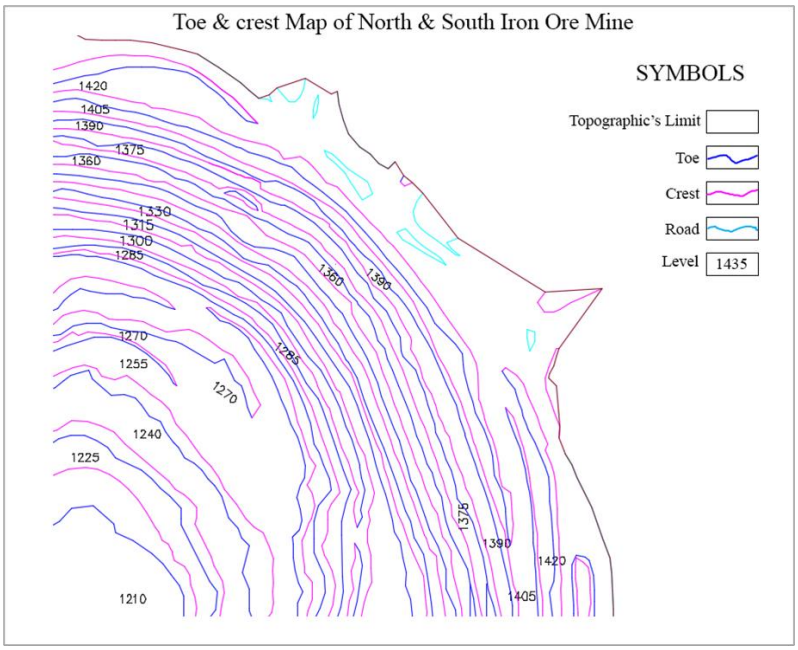
اگرچه با توجه به ماهیت آذرین بودن سنگ‌های میزبان، احتمال بروز پدیده خزش وجود ندارد، ولی با توجه به سطح دگرسانی بالای منطقه، ایجاد ریزترک‌ها و ماهیت گراف‌ها، که جابه‌جایی را به عنوان تابعی از زمان نمایش می‌دهد، می‌توان پارامترهای معادل مدل خزشی که منجر به این روند از جابه‌جایی می‌شود را با استفاده از تحلیل برگشتی استخراج کرد و تاثیر سناریوهای باربرداری را بر روند جابه‌جایی‌ها مورد بررسی قرار داد. شایان ذکر است با توجه به اینکه از هندسه، تراکم درزه‌ها و ریزترک‌ها اطلاعی در دسترس نیست، امکان استفاده از روش‌های تحلیل ناپیوسته و کالیبراسیون آن به گونه‌ای که جابه‌جایی معادل جابه‌جایی‌های ثبت شده توسط ابزار را ارائه دهد وجود نداشته یا منجر به یک پاسخ یکتا نخواهد شد. لذا با توجه به محدودیت‌های ذکر شده، مدل‌سازی عددی در محیط پیوسته انجام شده است. همانگونه که قبلاً ذکر شد با توجه به سطح دگرسانی بالا، امکان تفکیک دقیق واحدهای سنگی وجود نداشت. لذا به صورت محافظه‌کارانه شبیه‌سازی عددی بر اساس ضعیف‌ترین واحد سنگی انجام شده است و از تاثیر دیگر واحدهای سنگی که مقاومت بیشتری دارند بر جابه‌جایی‌ها صرف نظر شده است. شکل ۲، هندسه پیت در دیواره شمال و شمال شرقی که جهت ایجاد هندسه مدل عددی استفاده شده است را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. گراف جابه‌جایی ثبت شده برای دیواره معدن در مقابل روز مطابق با مدل ماکسول، a. تراز ۱۴۰۵ و b. تراز ۱۳۶۰، تاریخ شروع قرائت: ۹۷/۸/۸

Fig. 1. Recorded displacement graph for the mine wall versus days according to the Maxwell model: a. Level 1405 and b. Level 1360, The mesurment starting date: 2018/11/29

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]



شکل ۲. پلان مرکب پیت معدن در دیواره شمال و شمال شرقی

Fig. 2. Composite pit plan of the mine in the north and northeast wall (CMIC and KKSHEC, 2020)

شبیه‌سازی عددی

ساخت هندسه مدل عددی

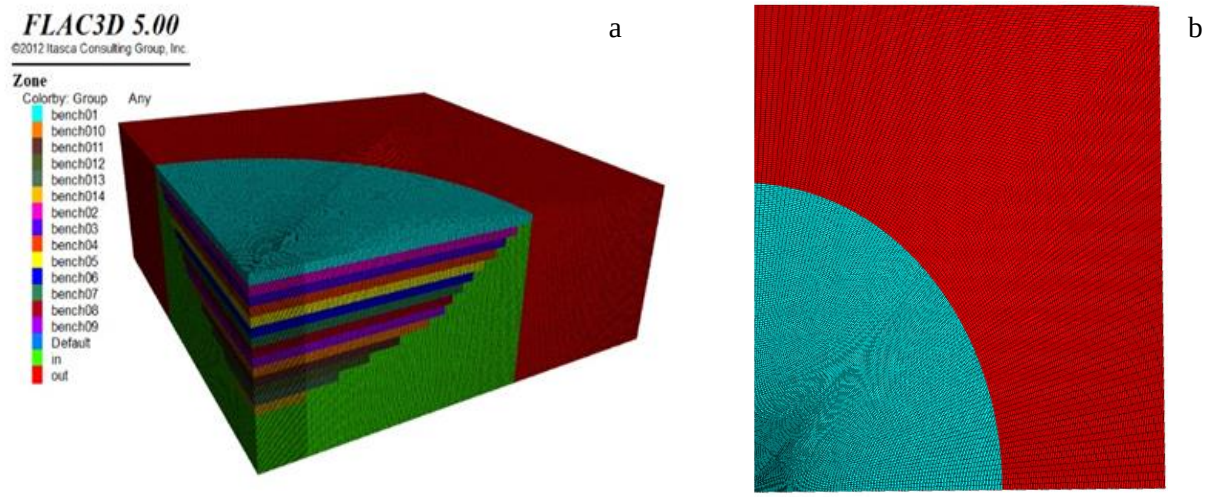
با توجه به تقارن نسبی پیت و جهت کاهش حجم مدل صرفاً یک چهارم پیت که شامل دیوارهی شمالی و شمال شرقی است در شبیه‌سازی عددی مدل شده است (شکل ۲). لذا جهت ساخت هندسه‌ی پیچیده‌ی بیضوی شکل معدن چادرملو، ابتدا برای گودال پیت، یک بلوک ۵۴۳ ×۳۱۰×۵۴۳ متری ایجاد شده است. ۳۱۰ متر نماینده عمق مدل در راستای Z و ۵۴۳ متر گسترش مدل را در راستای X و Y نمایش می‌دهد. جهت اعمال شرایط مرزی مدل و اطمینان از عدم تاثیر شرایط مرزی اعمال شده بر تاریخچه‌ی جابه‌جایی و تنش مدل، ابعاد مدل تا ۹۰۰ ×۹۰۰×۳۱۰ متر متر افزایش داده شده است. شایان ذکر است که با استفاده از تابع Fish توسعه داده شده، موقعیت‌ها گره‌ها به گونه‌ای تغییر داده شده است که از تمرکز مش در قسمت مرکزی مدل کاسته شده، اندازه‌ی مش‌ها با نزدیک شدن به مرزهای مدل به صورت تدریجی افزایش داشته و گره‌های ایجاد شده در مرحله‌ی توسعه مدل بر گره‌های اولیه ایجاد شده منطبق باشند، تا نیازی به استفاده از دستور Attach جهت حفظ پیوستگی میان جابه‌جایی‌های مدل نباشد. شایان ذکر است که نرم‌افزار FLAC به استفاده از دستورهای Attach و Interface حساس بوده و استفاده بیش از حد از این دستورها منجر به خطای عددی می‌شود. لذا در این پژوهش سعی شده است تا از دستور Attach استفاده نشده و پیوستگی جابه‌جایی‌ها و قرار گفتن گره‌ها بر روی هم توسط تابع Fish توسعه داده شده انجام شود.

شرایط مرزی مدل عددی

در نرم افزار Flac3D برای اعمال شرایط مرزی و خواص مش‌ها از دستور Range استفاده می‌شود. یکی از گزینه‌ها برای دستور Range گزینه‌ی سیلندر است که برای ایجاد پله‌ها از آن استفاده می‌شود. با توجه به اینکه هندسه‌ی اصلی پیت حالت بیضوی دارد امکان استفاده از این گزینه بعد از تبدیل هندسه‌ی پیت از حالت دایروی به بیضوی وجود ندارد. لذا ابتدا با استفاده از این دستور محدوده‌ی هر پله مشخص شده و سپس با اصلاح مختصات گره‌ها، مش از حالت دایروی به بیضوی تبدیل شده است، با اصلاح مش‌ها به این ترتیب امکان حفاری پله‌ها بعد از ایجاد تعادل اولیه در مدل وجود دارد. در این مرحله ابعاد مدل به ۹۰۰ ×۱۰۷۷×۳۱۰ متر

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1010084]

تغییر پیدا کرده است. کف مدل در راستای Z ثابت شده و مرزهای عمود بر محور X در راستای X و مرزهای عمود بر محور Y در راستای Y ثابت شده است. در شکل ۳ هندسه معدن بعد از گروه‌بندی پله‌ها و اصلاح هندسه جهت تبدیل به هندسه‌ی بیضوی نمایش داده شده است.



شکل ۳. a. ایجاد پله‌ها مطابق با پلان مرکب، b. اصلاح هندسه پیت از حالت دایروی به حالت بیضوی

Fig. 3. a. Bench formation according to the composite plan, b. Modification of pit geometry from circular to elliptical

شکل‌گیری تنش‌های برجا و اعمال خواص مواد

بعد از ساخت هندسه‌ی مدل و اعمال شرایط مرزی، تنش‌های برجا محاسبه شده و در مدل اعمال شده است. برای اینکه به مدل شوک وارد نشود پله‌ها به صورت تدریجی حفاری شده و بعد از هر مرحله حفاری مدل حل شده است. درصورتیکه پله‌ها به یکباره حفاری شوند، باعث ایجاد بالاآمدگی کاذب در کف مدل خواهد شد. در مرحله‌ی شکل‌گیری تنش‌های برجا، جهت افزایش سرعت حل مدل از مدل رفتاری الاستیک استفاده شده و بعد شکل‌گیری تنش‌های برجا مدل رفتاری به مدل پلاستیک موهر-کلمب تغییر داده شده است و مدل تا تعادل دوباره حل شده است. بعد از این مرحله تمام جابه‌جایی‌های مدل صفر شده و مرحله‌ی کالیبراسیون مدل و استخراج پارامترهای مدل ماکسول با توجه به گراف جابه‌جایی ۱۳۶۰-۰۵۱ آغاز شده است. دامنه‌ی تغییرات پارامترهای مدل رفتاری موهر-کلمب و ویسکوزیته ماکسول که در تحلیل عددی استفاده شده است در جدول ۱ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه از نسبت تنش افقی به قائم در منطقه اطلاعی در دسترس نیست. سه مقدار ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برای این نسبت تعیین شده و محتمل‌ترین مقدار آن بر اساس تحلیل برگشتی تعیین شده است. شکل ۴، توزیع تنش‌های القایی قائم بعد از حفاری پیت معدن را در راستای Z در مدل عددی نمایش می دهد.

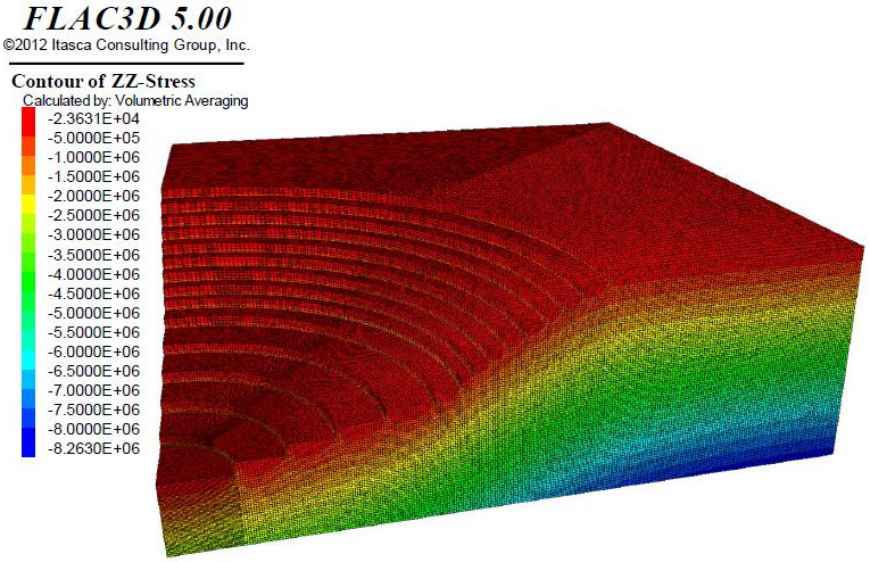
جدول ۱. پارامترهای مدل موهر-کلمب به همراه دامنه تغییرات

Table 1. Mohr-Coulomb model parameters along with their variation range

Cohesion (kPa)	Phi (Degree)	Bulk Modulus (GPa)	Shear Modulus (GPa)	Maxwell Viscosity (Pa.Day)
(450-550)	(25-35)	(1E9-2E9)	(0.6E9-0.8E9)	(5.04E8-9.96E10)

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1010084]



شکل ۴. توزیع تنش‌های القایی قائم در راستای Z، بعد از ایجاد پله‌های معدن
Fig. 4. Distribution of induced vertical stresses along the Z direction after the formation of mine benches

کالیبراسیون مدل و برآورد پارامترهای مدل ماکسول بر اساس تحلیل برگشتی

برای ارزیابی دقیق پارامترهای ملاک شکست موهر کلمب و مدل خزش ماکسول از تحلیل برگشتی استفاده شده است. پارامترهای ملاک شکست موهر شامل زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مدول تغییر شکل و ضریب پوآسون و پارامترهای مدل خزش ماکسول شامل ویسکوزیته ماکسول است. مقدار زاویه اتساع در ملاک شکست موهر کلمب صفر و از تاثیرات آن صرف نظر شده است. به طور کلی ۵ پارامتر در تحلیل برگشتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر پارامتر سه مقدار لحاظ شده است که با توجه به مقدار متوسط هر پارامتر و انحراف از معیار آن ارزیابی شده است. با توجه به ۵ پارامتر یاد شده و دامنه تغییرات آن‌ها در سه رده ۲۴۳ ترکیب به تکنیک فاکتوریل باید مورد بررسی قرار گیرد. با بهره‌گیری از روش طراحی تاگوچی تعداد مدل‌هایی که باید حل شود تا حساسیت تابع خطا مورد بررسی قرار گیرد ۲۷ مدل است که پارامترهای ورودی آن در جدول۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲. ترکیب پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی عددی مطابق با روش پیشنهادی تاگوچی
Table 2. Combination of parameters used in numerical simulation according to the Taguchi proposed method

No.	μ	G	K	Phi	C
01	1	1	1	1	1
02	2	1	1	1	1
03	3	1	1	1	1
04	1	2	2	2	1
05	2	2	2	2	1
06	3	2	2	2	1
07	1	3	3	3	1
08	2	3	3	3	1
09	3	3	3	3	1
10	2	3	3	1	2
11	3	3	3	1	2

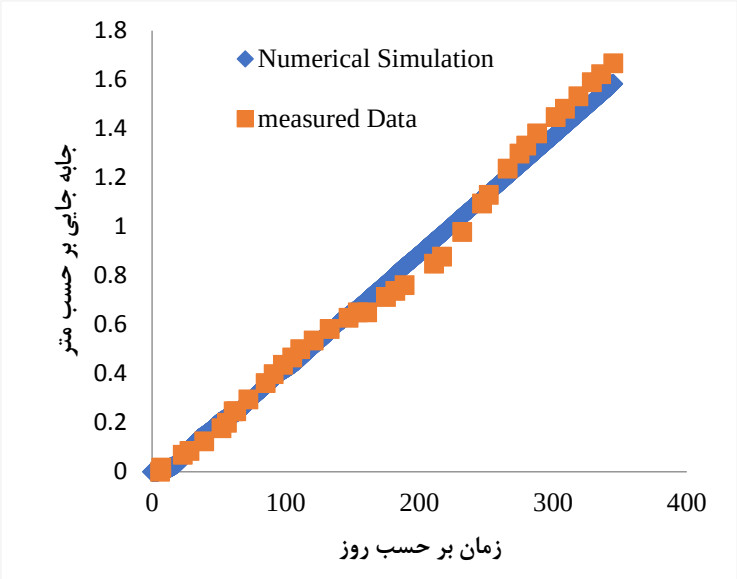
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1010084]

12	1	3	3	1	2
13	2	1	3	2	2
14	3	1	3	2	2
15	1	1	3	2	2
16	2	2	1	3	2
17	3	2	1	3	2
18	1	2	1	3	2
19	3	2	3	1	3
20	1	2	3	1	3
21	2	2	3	1	3
22	3	3	1	2	3
23	1	3	1	2	3
24	2	3	1	2	3
25	3	1	2	3	3
26	1	1	2	3	3
27	2	1	2	3	3

برای هر پارامتر سه سطح تعریف شده است. سطح ۱ برابر با مقدار میانگین منهای انحراف معیار، سطح ۲ برابر با مقدار میانگین و سطح ۳ برابر با مقدار میانگین بعلاوه انحراف معیار است. بعد از مشخص شدن روند تأثیر ۵ پارامتر مذکور بر روی تابع خطا بر اساس روش پیشنهادی تاگوچی دامنه تغییرات متغیرها محدودتر شده و سه سطح دیگر با دامنه تغییرات کوچک‌تر تعریف می‌شود تا در نهایت مناسب‌ترین جواب مطابق با مقدار تابع خطا حاصل شود. جابه‌جایی محاسبه شده توسط روش عددی با جابه‌جایی برداشت شده توسط رادار برای نقطه‌ی ۱۳۶۰-۰۵۱ در شکل ۵ نمایش داده شده است و نتایج تحلیل عددی تطابق خوبی با جابه‌جایی برداشت شده دارد. مقادیر حاصل از تحلیل برگشتی برای ۵ پارامتر مذکور در جدول ۳ نمایش داده شده است. هر سیکل حل معادل ۰/۰۱ روز لحاظ شده و این مقدار بر اساس تحلیل حساسیت بر روی نتایج شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی زمان حل مدل انتخاب شده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]



شکل ۵. مقایسه جابه‌جایی‌های محاسبه شده توسط مدل عددی و اندازه‌گیری‌های برجا برای نقطه شاهد ۰۵۱-۱۳۶۰

Fig. 5. Comparison of displacements calculated by the numerical model and in-situ measurements for reference point 051-1360

جدول ۳. مقادیر حاصل شده از تحلیل برگشتی برای پارامترهای ژئومکانیکی مدل موهر کلمب و ماکسول

Table 3. estimated or calculated values from back analysis for geomechanical parameters of the Mohr-Coulomb and Maxwell model

Cohesion (kPa)	Phi (Degree)	Bulk Modulus (GPa)	Shear Modulus (GPa)	Maxwell Viscosity (Pa.Day)
510	31	1.67E9	0.769E9	7E10

نتایج و بحث

در این بخش پایداری شیروانی معدن تحت تاثیر سه سناریو مورد بررسی قرار گرفته است، با توجه به عدم قطعیتی که در مقدار K0 وجود داشت سه مقدار ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برای آن انتخاب شده و بر اساس نتایج تحلیل برگشتی مقدار نزدیک به واقع آن انتخاب شده است. در سناریوی اول تاثیر گذر زمان بر روند جابه‌جایی‌های شیروانی مورد بررسی قرار گرفته است. در سناریوی دوم تاثیر باربرداری از پله‌ی اول تا هشتم بر پایداری شیروانی و در سناریوی سوم تاثیر عمیق شدن معدن به مقدار ۳۰ متر که معادل دو پله است با ثابت ماندن عرض کف معدن بر پایداری دیواره مورد بررسی قرار گرفته است. در انتخاب سه سناریوی مربوط به تغییرات هندسی شیروانی و گذر زمان، هدف پژوهشگران شبیه‌سازی شرایطی است که معدن چادرملو ممکن است با آن روبرو شود. سناریوی گذر زمان، رفتار خزشی و تغییرات تدریجی در پایداری را مدل می‌کند که نقش مهمی در تحلیل بلندمدت دارد و عملاً تاثیر گذر زمان را بر پایداری و رفتار شیروانی بررسی می‌کند. سناریوی تعریض پله، به منظور بررسی اثرات کاهش شیب شیروانی و باربرداری که به عنوان یک راه حل رایج در معادن روباز به منظور پایدارسازی پذیرفته شده است، انتخاب شده است. سناریوی افزایش عمق نیز نمایانگر تغییرات بارگذاری و اثر افزایش عمق استخراج بر شیب است

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]

که می‌تواند فشارهای وارده و رفتار کلی شیب را دچار تغییر کند. این سناریو با توجه به اینکه ماده‌ی معدنی هنوز در عمق موجود است تاثیر عمیق شدن معدن را بر پایداری مورد بررسی قرار می‌دهد. بنابراین، این سه سناریو به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که همزمان جنبه‌های زمانی، هندسی و بارگذاری، در تحلیل پایداری به صورت جامع پوشش داده شود و نتایج کاربردی و واقع‌گرایانه‌ای برای مدیریت ایمنی معدن ارائه دهند.

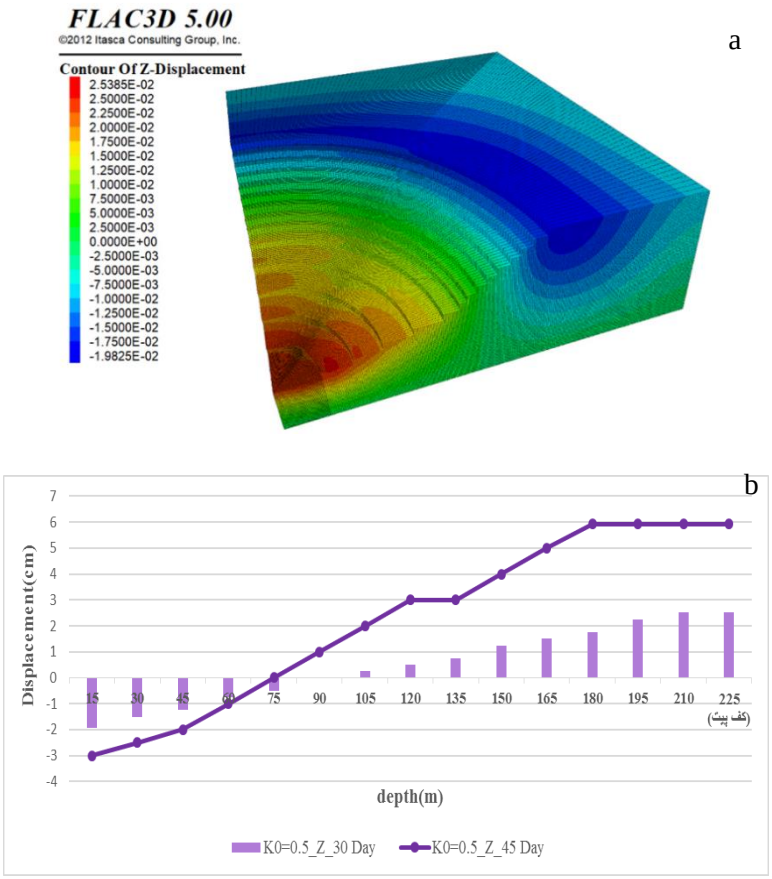
سناریوی اول

میزان جابه جایی در راستای Z، بعد از گذشت ۳۰ و ۴۵ روز هنگامی که نسبت تنش افقی به قائم ۰/۵ است در شکل ۶ نمایش داده شده است. یک محدوده زون لغزشی از پله‌ی اول تا پله‌ی چهاردهم به مرکز چرخش پله‌ی ششم ایجاد شده است. نشست در سطح و در سراسر پله‌ها تا پله‌ی پنجم گسترش یافته است. حداکثر آن در سطح و پله‌ی اول ۲ سانتی‌متر است. با افزایش عمق از مقدار نشست کم شده و در نهایت در پله‌ی پنجم به ۰/۵ سانتی متر می‌رسد (شکل ۶-b). بالاآمدگی‌ها از پله هفتم آغاز و تا کف پیت با روند افزایشی ادامه دارد. حداکثر بالاآمدگی در پله‌ی چهاردهم و کف پیت، ۲/۵ سانتی‌متر است. بالاآمدگی‌ها با افزایش عمق، افزایش می‌یابند. با افزایش زمان حل مدل تا ۴۵ روز، مرکز زون لغزش یک پله جابه‌جا شده و به پله پنجم منتقل می‌شود و محدوده‌ی زون لغزش به پله‌های اول تا دوازدهم محدود می‌شود. تغییرات متوسط بالاآمدگی، نشست و مرکز چرخش زون لغزش برای مقادیر نسبت تنش افقی به قائم ۰/۵، ۱ و ۱/۵ در جدول ۴ نمایش داده شده است. با افزایش مقدار تنش افقی به قائم، مرکز چرخش زون لغزش و محدوده لغزش به سمت پله‌های بالاتر حرکت کرده‌اند و همچنین میزان گسترش آن کوچکتر شده است، به عبارتی پله‌های محدودتری از پیت در زون لغزش درگیر می‌شوند. با توجه به جابه جایی‌های ثبت شده توسط رادار مرکز زون لغزش احتمالی در حوالی پله‌ی دوم قرار دارد. لذا نتایج مربوط به شبیه‌سازی نسبت تنش افقی به قائم ۱/۵ با واقعیت تطابق بهتری دارد. لذا در سناریوهای بعدی نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۱/۵ لحاظ شده است. نکته‌ی دیگر افزایش نرخ جابه‌جایی‌ها با گذر زمان است. یا به عبارت دیگر سرعت جابه‌جایی‌ها با گذر زمان افزایش پیدا کرده است که پتانسیل وقوع ناپایداری را تایید می‌کند.

سناریوی دوم

در این سناریو از پله‌های اول تا هشتم ۲۰ متر تعریض می‌شوند و به این ترتیب دهانه‌ی پیت در این پله‌ها ۲۰ متر افزایش پیدا می‌کند (در شعاع). تعریض در هر مرحله بر روی دو پله انجام می‌شود و از پله‌های اول و دوم تا پله‌های اول تا هشتم ادامه پیدا می‌کند. جابه‌جایی مدل‌های ساخته شده در این سناریو با مدل اولیه که زمان در آن ۴۵ روز و نسبت تنش افقی به قائم ۱/۵ است و از این به بعد مدل مقیاس نامیده می‌شود، مقایسه شده‌اند. جابه‌جایی‌ها در هر سه راستای X، Y و Z ارزیابی شده‌اند. جابه‌جایی‌ها در راستای X و Y تابع مقطعی هستند که جابه‌جایی بر روی آن بررسی می‌شود. به عنوان مثال اگر مقطع در راستای محور X زده شود، جابه‌جایی در راستای محور X بیشینه و در راستای محور Y تقریباً برابر با صفر خواهد بود. این شرایط برای مقطعی که در راستای محور Y زده می‌شود نیز وجود دارد، یعنی جابه‌جایی‌ها در راستای محور Y بیشینه و در راستای محور X تقریباً برابر با صفر خواهد بود. برای اینکه جابه‌جایی برداشت شده مستقل از مقطع باشد، جابه‌جایی برآیند با توجه به مقادیر جابه‌جایی در راستای X و Y محاسبه شده و تحت عنوان جابه‌جایی X-Y در گراف‌ها نمایش داده شده که جهت مثبت آن به سمت مرکز پیت است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1010084]



شکل ۶. a. کنتور جابه جایی ها در راستای Z به صورت سه بعدی بعد از ۳۰ روز برای نسبت تنش افقی به قائم ۰/۵، b. مقدار جابه‌جایی در راستای Z به تفکیک پله بعد از گذر زمان ۳۰ و ۴۵ روز

Fig 6. a. 3D displacement contour in the Z direction after 30 days for a horizontal-to-vertical stress ratio of 0.5, b. Displacement magnitude in the Z direction for each bench after 30 and 45 days

جدول ۴. مقادی متوسط نشست و بالاآمدگی در شیروانی با توجه به گذر زمان و تغییرات مقدار K0

Table 4. Average subsidence and heave in the slope considering time progression and variations in K0 value

K0	مقدار متوسط نشست (cm)			مقدار متوسط بالاآمدگی (cm)			زون چرخش (پله)	
	۳۰ روز	۴۵ روز	میزان تغییرات ٪	۳۰ روز	۴۵ روز	میزان تغییرات ٪	۳۰ روز	۴۵ روز
0.5	۱	۲	۱۰۰	۱/۴	۴	۱۸۵	ششم	پنجم
1	۰/۹	۲/۵	۱۷۷	۲/۱	۵	۱۳۸	چهارم	بین سوم و چهارم
1.5	۰/۹	۲/۵	۱۴۴	۲	۴/۵	۱۲۵	بین دوم و سوم	دوم

پله‌ی اول و دوم

در شکل a-۷ کنتور جابه‌جایی‌ها در راستای Z و X-Y تحت تاثیر عقب‌نشینی پله‌های اول و دوم نمایش داده شده است.

با باربرداری از پله‌های اول و دوم شاهد بالاآمدگی در پله‌ها هستیم. بالاآمدگی از پله‌ی اول آغاز شده و پله‌های دوم و سوم بالاآمدگی ۷/۵ سانتی‌متر را تجربه می‌کنند، سپس در پله‌ی چهارم با کاهش آنی میزان بالاآمدگی روبرو هستیم.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]

اگرچه میزان بالاآمدگی کف پیت تغییر محسوسی نداشته، ولی به طور متوسط با کاهش بالاآمدگی ۱۸ درصدی مواجه هستیم. با توجه به کاهش آنی بالاآمدگی در پله‌ی سوم، و ثابت ماندن بالاآمدگی در پله‌های چهارم و پنجم انتظار می‌رود نقطه چرخش زون لغزش به حوالی پله‌های چهارم تا پنجم منتقل شده باشد. میزان جابه‌جایی با افزایش عمق افزایش یافته و در پله‌ی دهم به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

پله‌ی اول تا چهارم

در این مدل پله‌های سوم تا پنجم بیشترین بالاآمدگی تا میزان ۱۳ سانتی‌متر را تجربه می‌کنند و هیچ یک از پله‌های این مدل دچار چرخش یا لغزش موضعی نشده‌اند (شکل ۷-b) چرخش یا لغزش موضعی با منفی شدن جابه‌جایی محاسبه شده در راستای X-Y مشخص می‌شود. مقدار متوسط بالاآمدگی در پله‌های بالایی پیت به ۸/۴ سانتی‌متر و در مقدار متوسط آن در پله‌های پایینی به ۴/۵ سانتی‌متر رسیده است که به ترتیب نسبت به مدل با عقب‌نشینی دو پله ۱۰۰ و ۸ درصد افزایش یافته است. میزان متوسط بالاآمدگی کل پیت نسبت به مدل با عقب‌نشینی دو پله ۳۷ درصد و نسبت به مدل مقیاس، ۱۶ درصد افزایش داشته است. میزان بالاآمدگی در کف ۵ سانتی‌متر و برابر با مقدار مدل مقیاس شده است. مشاهده می‌شود که با عقب‌نشینی چهار پله‌ی نخست پیت، میزان بالاآمدگی در پله‌ها افزایش یافته است.

پله‌ی اول تا ششم

با عقب نشینی شش پله‌ی نخست، پیت به دو قسمت، از پله اول تا هفتم و از پله هشتم تاکف پیت تقسیم می‌شود و همانطور که در شکل ۷-c مشاهده می‌شود، با وجود اینکه میزان بالاآمدگی‌ها در پله‌های پایینی پیت، از متوسط بالاآمدگی پله‌های پایینی در مدل با عقب‌نشینی دو و چهار پله کمتر است اما میزان متوسط بالاآمدگی در پله‌های بالایی با افزایش ۱۵۰ درصدی نسبت به پله‌های پایینی روبرو شده‌اند.

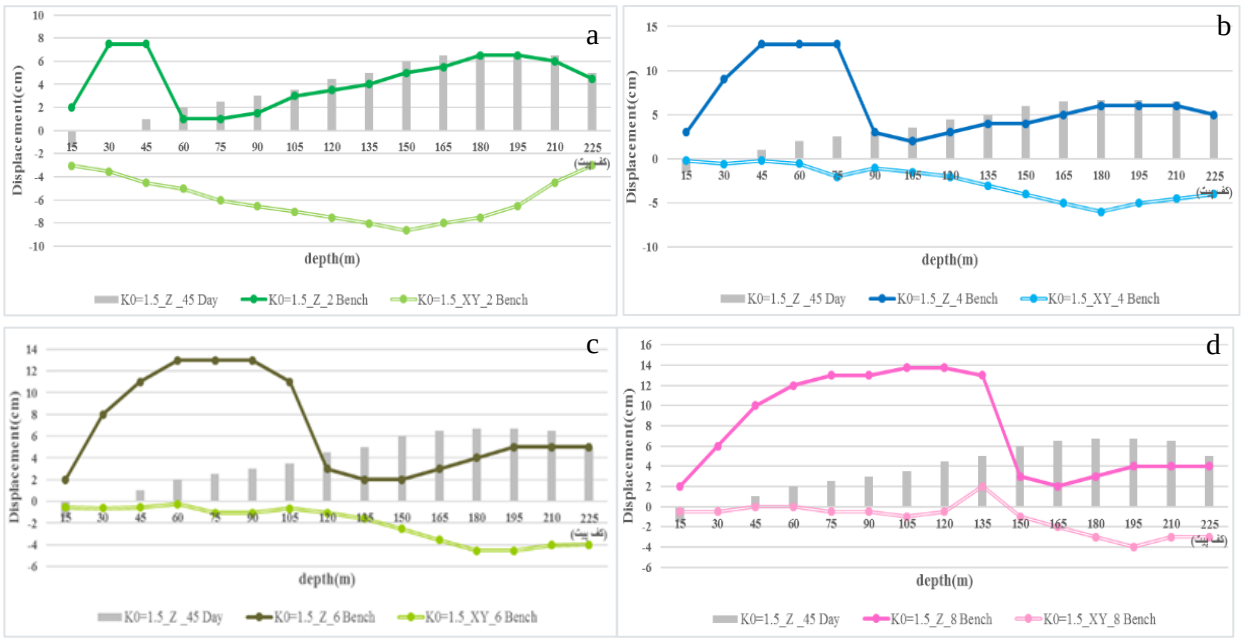
پله‌ی اول تا هشتم

با باربرداری از هشت پله‌ی نخست (شکل ۷-d)، میزان بالاآمدگی در نه پله‌ی اول به شدت افزایش پیدا کرده است و نرخ جابه‌جایی‌ها به تبع آن افزایش داشته است که منجر به افزایش پتانسیل ناپایداری می‌شود. در پله‌ی نهم با توجه منفی شدن جابه‌جایی در راستای X-Y یک زون لغزش موضعی مشاهده می‌شود.

لذا صرفاً در باربرداری از پله‌های اول و دوم متوسط نرخ بالاآمدگی نسبت به مدل مقیاس کاهش داشته و در سایر سناریوهای باربرداری متوسط نرخ بالاآمدگی افزایش داشته و مقدار آن با افزایش تعداد پله‌ها به صورت تصاعدی افزایش پیدا کرده است. هنگام استفاده از مدل‌های خزشی امکان محاسبه فاکتور پایداری وجود ندارد و صرفاً امکان بررسی تاثیر باربرداری بر آهنگ جابه‌جایی‌ها وجود دارد. که با توجه به نرخ بالاآمدگی متوسط، باربرداری از پله‌ی اول و دوم صرفاً منجر به افزایش پتانسیل پایداری شده و باربرداری از سایر پله‌ها پتانسیل ناپایداری را افزایش می‌دهد. البته این فرضیه توسط تکنیک تعادل حدی نیز راستی آزمایی شد و تکنیک تحلیل تعادل حدی نیز نشان داد که، باربرداری در پله‌های اول و دوم می‌تواند منجر به افزایش ضریب ایمنی شود و باربرداری در پله‌های سوم تا هشتم به دلیل کاهش وزن پاشنه لغزش منجر به افزایش پتانسیل ناپایداری می‌شود.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]



شکل ۷.گراف تغییرات جابه‌جایی‌ها با عقب نشینی پله‌ها a: پله‌ی اول تا دوم، b: پله‌ی اول تا چهارم، c: پله‌ی اول تا ششم، d: پله‌ی اول تا هشتم

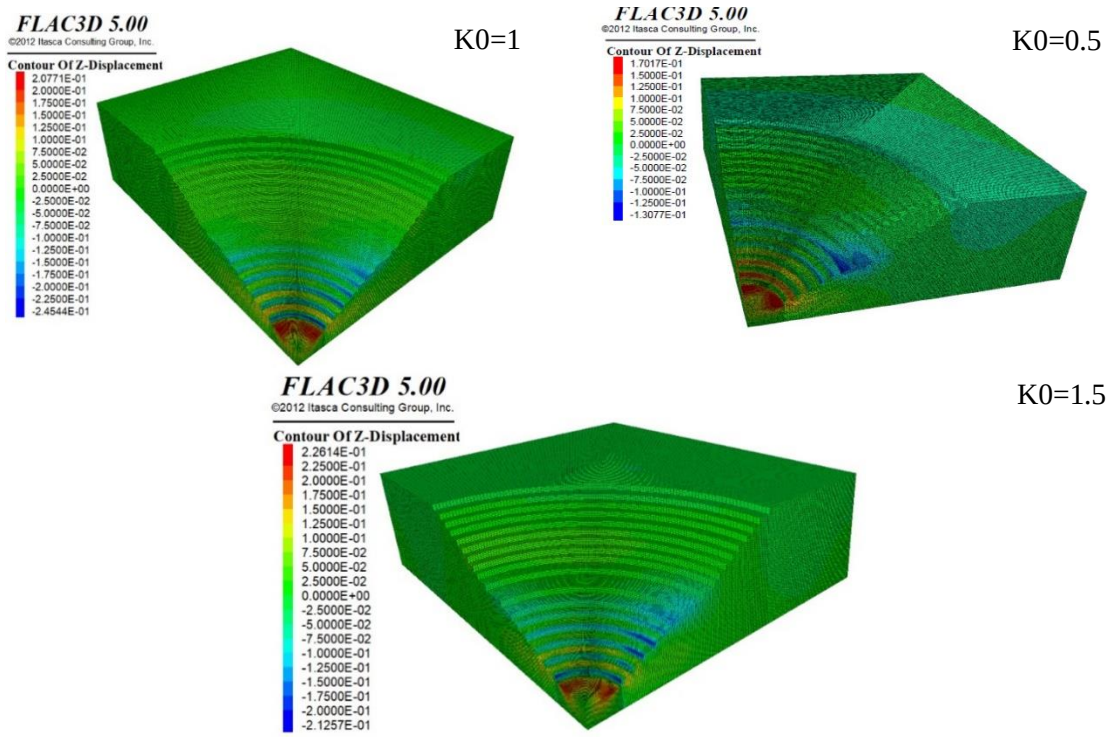
Fig. 7. Graph of displacement changes with bench retreat: (a) First to second bench, (b) First to fourth bench, (c) First to sixth bench, (d) First to eighth bench

سناریوی سوم

برای دستیابی به ماده معدنی باقی‌مانده در اعماق ۴۵ متری کف پیت، لازم است پیت عمیق‌تر شود. در این راستا جهت بررسی پایداری و یا عدم پایداری پیت با افزایش عمق، بدون تغییر در شعاع کف پیت، سه پله با ارتفاع ۱۵ متری به عمق اضافه می‌شود. بدین منظور لازم است با کمتر کردن عرض پله‌های قبلی به عمق مورد نظر بدون تغییر در شعاع کف پیت رسید. با توجه به عریض بودن پله‌های پایینی پیت (شکل ۴)، کاهش عرض پله بر روی پله‌های پایینی پیت انجام شده است. کنتور جابه جایی‌ها در راستای Z برای سه مقدار K0، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ در شکل ۸ نمایش داده شده است. مشاهده هم‌زمان بالاآمدگی و نشست در یک پله بیانگر لغزش موضعی در آن پله است. در هر سه مدل تا حوالی پله‌ی دهم میزان جابه‌جایی‌ها محدود است. از این پله به بعد با نشست روبرو هستیم که با رفتن به سمت کف پیت مقدار آن کاسته شده و به بالاآمدگی تبدیل می‌شود و بیانگر وقوع یک لغزش احتمالی از حوالی پله دهم تا کف پیت است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]



شکل ۸. کنتور جابه‌جایی‌ها در راستای Z در سناریوی سوم برای نسبت‌های تنش افقی به قائم ۰/۵، ۱ و ۱/۵

Fig. 8. Displacement contours in the Z direction in Scenario 3 for horizontal-to-vertical stress ratios of 0.5, 1, and 1.5

نتیجه گیری

همانگونه که قبلاً ذکر شد مطالعات مربوط به تغییرشکل‌های تابع زمان به طور کلی بر روی تونل‌ها متمرکز بوده و مطالعات اندکی بر روی معادن روباز در این زمینه انجام شده است. لذا در این پژوهش با توجه به جابه‌جایی‌های برداشت شده توسط رادار در دیواره‌ی شمالی و شمال شرقی معدن چادرملو و تطابق خوب جابه‌جایی‌های برداشت شده با مدل ماکسول، با استفاده از تحلیل برگشتی و تکنیک طراحی آزمایش تاگوچی، پارامترهای ملاک شکست موهر کلمب و ویسکوزیته ماکسول ارزیابی شده است. بعد از کالیبراسیون مدل عددی تاثیر سه سناریوی گذر زمان، تعریض پله‌ها و افزایش عمق معدن و نرخ تغییرشکل‌ها و پایداری دیواره معدن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به عدم قطعیتی که در ارتباط با نسبت تنش افقی به قائم وجود داشت، سه مقدار ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برای نسبت تنش افقی به قائم فرض شد. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که:

- نسبت تنش افقی ۱/۵ تطابق بهتری با شواهد میدانی و جابه‌جایی‌های برداشت شده دارد و با افزایش نسبت تنش افقی به قائم نقطه چرخش زون لغزش به سمت پله‌های بالاتر (پله‌ی دوم و سوم) جابه‌جا می‌شود که مطابق با شواهد میدانی است. در این مدل بالاآمدگی کف نیز کاهش چشم‌گیری در مقایسه با مدل‌های با نسبت تنش افقی به قائم ۰/۵ و ۱ داشته است.
- با گذر زمان در تمام مقادیر نسبت تنش افقی به قائم، مرکز چرخش زون لغزش یک پله به سمت بالا جابه‌جا شده است. اگر چه مقدار زمان ۵۰ درصد افزایش داشته است، ولی نرخ جابه‌جایی‌ها افزایش بیش از ۱۰۰ درصدی را تجربه می‌کند و

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]

کمترین افزایش نرخ جابه جایی مربوط به نسبت تنش افقی به قائم ۱/۵ است.

- افرایش عرض پله از پله‌ی اول تا هشتم نشان داد که تنها افزایش عرض پله‌ی اول و دوم منجر به کاهش نرخ بالاآمدگی و به تبع آن افزایش پتانسیل پایداری می‌شود و بابرداری از سایر پله‌ها منجر به افزایش نرخ بالاآمدگی شده و پتانسیل ناپایداری را افزایش می‌دهد. این موضوع توسط تکینک تعادل حدی نیز تایید شد.
- عمیق شدن معدن به مقدار ۴۵ متر با حفظ عرض کف، احتمال وقوع یک لغزش از حوالی پله‌ی دهم تا کف پیت را در تمام مقادیر نسبت تنش افقی به قائم لحاظ شده افزایش می‌دهد. در این زون لغزش احتمالی، پله‌هایی با لغزش موضعی نیز مشاهده می‌شود.

References

Abrishami, M. (1993). Investigation of geology and technical-economic justification of Chador-Malu iron ore. Chador-Malu Mining and Industrial Complex. (In Persian)

Ahmad, F., Tang, X., Hu, J., Ahmad, M., & Gordan, B. (2023). Improved prediction of slope stability under static and dynamic conditions using tree-based models. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 137(1), 455–487.

Badagh Abadi, S. (2003). Stability analysis of Chador-Malu mine walls and determination of stable slopes. Bachelor's thesis, Shahroud University of Technology. (In Persian)

Baghbani, A., Faradonbeh, R. S., Lu, Y., Soltani, A., Kiany, K., Baghbani, H., Abuel-Naga, H., & Samui, P. (2024). Enhancing earth dam slope stability prediction with integrated AI and statistical models. Applied Soft Computing, 164, 111999.

Cao, V. H., & Go, G. H. (2025). Stability analysis of random soil–rock mixture slope using an energy-based failure criterion and Monte Carlo simulation. Engineering Failure Analysis, 109346.

Causse, L., Cojean, R., & Fleurisson, J. A. (2015). Interaction between tunnel and unstable slope–Influence of time-dependent behavior of a tunnel excavation in a deep-seated gravitational slope deformation. Tunnelling and Underground Space Technology, 50, 270-281.

Chador-Malu Mining and Industrial Company, & Kani-Kavan Shargh Engineering Company. (2020). Revised exploitation plan of Chador-Malu iron ore mine. 885 p. (CMIC and KKSHEC, 2015) ,(In Persian)

Cox, K. G., Bell, J. D., & Pandhurst, R. G. (1979). The Interpretation of Igneous Rocks. George Allen & Unwin, London, 450 p.

Deng, Z., Lan, H., Li, L., & Sun, W. (2025). Vegetation-induced modifications in hydrological processes and the consequential dynamic effects of slope stability. CATENA, 251, 108793.

EBE. (2005). Detail engineering services; Section II; Volume 1, 2, 3. Ministry of Mines & Metals (Chador-Malu Iron Ore Project M.C.M.P). (EBE. M.C.M.P), (In Persian)

Feng, J. F., Yin, G. Z., Dai, G. F., & Yan, B. S. (2006). Stability analysis and comprehensive treatment for Xiangjiashan landslide. Soil Engineering and Foundation, 20(4), 12-16.

Huang, A., Zhu, Y., Ye, S., Wang, L., & Fang, G. (2025). Three-dimensional seismic stability of unsaturated soil slopes with cracks reinforced by frame beam anchor plates. Structures, 73, 108430.

Jiang, N., Zhou, C., Lu, S., & Zhang, Z. (2017). Propagation and prediction of blasting vibration on slope in an open pit during underground mining. Tunnelling and Underground Space Technology, 70, 409-421.

Jin, F., Zhang, C. H., Wang, G., & Wang, G. L. (2003). Creep modeling in excavation analysis of a high rock slope. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(9), 849-857.

Lan, P., Huang, J., Su, J., Zhu, S., Chen, J., Zhang, S., & Jiang, S. H. (2025). A rapid unsaturated infiltration prediction method for slope stability

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]

analysis considering uncertainties: Deep operator networks. Engineering Geology, 347, 107886.

Middlemost, D. E. (1980). A contribution to the nomenclature and classification of volcanic rocks. Geological Magazine, 117, 51-57.

Pandey, N. K., Gupta, K., & Satyam, N. (2025). Rock slope stability analysis using ensemble decision tree approaches and feature importance along an economic corridor in central India. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 138, 103868.

Rajabian, A., & Vahedifard, F. (2025). Seismic stability analysis of anchored concave slopes. Transportation Geotechnics, 101505.

Wang, M., Zhao, G., & Wang, S. (2024a). Hybrid random forest models optimized by Sparrow search algorithm (SSA) and Harris hawk optimization algorithm (HHO) for slope stability prediction. Transportation Geotechnics, 48, 101305.

Wang, X., Wu, S., Han, L., Wang, J., Cui, J., & Shen, Y. (2024b). Slope stability prediction based on GSOEM-SV: A mobile application practicably deploy in engineering verification. Advances in Engineering Software, 192, 103648.

Wu, X., Cui, Z., Yang, B., & Lian, B. (2025). Seismic stability of anchored slopes considering tension-shear coupling effect by modified pseudo-dynamic approach. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 190, 109206.

Zheng, H. (2012). A three-dimensional rigorous method for stability analysis of landslides. Engineering Geology, 145, 30-40.

Zhong, K., Tan, X., Liu, S., Lu, Z., Hou, X., & Wang, Q. (2025). Prediction of slope failure probability based on machine learning with genetic-ADASYN algorithm. Engineering Geology, 346, 107885.

Zhou, X. P., & Cheng, H. (2013). Analysis of stability of three-dimensional slopes using the rigorous limit equilibrium method. Engineering Geology, 160, 21-33.

Zhou, X. P., & Cheng, H. (2014). Stability analysis of three-dimensional seismic landslides using the rigorous limit equilibrium method. Engineering Geology, 174, 87-102.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.101084]