

Original Research Paper

Stability analysis and support system design for the lower headrace tunnel bifurcation at the Rudbar pumped storage power plant

Masoud Heidari¹, Mohammad Hossein Jowkar¹, Mashallah Khamehchiyan^{*1}, and Mohsen Sharifi Boroujerdi²

¹ Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Mahab Ghods Consulting Engineers Company, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2025 July 26

Accepted: 2026 May 13

Available online: 2026 June 22

Keywords:

Tunnel Bifurcation

Support system

Rudbar Lorestan

Capacity Diagram

FLAC 3D

ABSTRACT

Pumped storage power plants play a crucial role in balancing electricity supply and demand during peak periods. Given the structural complexity of underground facilities and the potential risks of design oversights, this study evaluates the structural stability of the lower headrace tunnel bifurcation at the Rudbar Pumped Storage Power Plant in Lorestan, Iran. A multi-method approach was employed, integrating empirical classification systems (Q, RMR, R_{Mi}, GSI, and Protodiakonov coefficient) with 3D numerical modeling using FLAC3D software. Initial results indicated that the underground opening is marginally stable with a low factor of safety (FOS), necessitating the installation of a support system. Upon implementing the designed support system comprising 10 cm of reinforced shotcrete (steel grid) and 2 meter long fully grouted anchors in a 2×2 m pattern the internal forces were analyzed. The efficiency of the system was verified using capacity diagrams and Sakurai's hazard level criteria, ensuring an FOS of over 1.5. Furthermore, the Ground Reaction Curve (GRC) and Longitudinal Deformation Profile (LDP) confirmed the elastoplastic behavior of the rock mass. Based on these analyses, an optimal excavation step of 2 meters (full-face) is recommended for ensuring the long-term stability of the tunnel bifurcation.

1. Introduction

The Rudbar Pumped-Storage Power Plant, located in Lorestan province, is a significant hydroelectric facility designed to balance the national electricity grid. These plants serve as a critical solution for load management, primarily by reinforcing the electrical network during peak demand periods and compensating for production deficits (Mousavi Kani, 2024). Given the vital role of


these facilities, ensuring the structural stability of their underground components is a paramount concern in engineering geology and rock mechanics. The stability analysis of such structures becomes particularly complex at tunnel bifurcations and junctions. At these locations, abrupt changes in tunnel geometry and dimensions lead to significant stress concentration and redistribution, which directly

* Corresponding author: Mashallah Khamehchiyan; E-mail: khamechm@modares.ac.ir

Citation:

Heidari, M., Jowkar, M.H., Khamehchiyan, M., and Sharifi Boroujerdi, M., 2026. Stability analysis and support system design for the lower headrace tunnel bifurcation at the Rudbar pumped storage power plant. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 36(2), 140, 123-148. <https://doi.org/10.22071/gsj.2026.537222.2213>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2026.537222.2213



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

impact the overall stability of the underground opening and the performance of the support system. Despite its importance, the behavior of rock masses at complex junctions requires rigorous investigation through both empirical and numerical methods. Therefore, this study aims to evaluate the stability and analyze the internal forces generated within the support system at the bifurcation point of the lower headrace tunnels of the Rudbar Pumped-Storage Power Plant.

The Rudbar Lorestan Pumped Storage Power Plant is designed to harness hydroelectric energy by connecting the lower Rudbar Dam reservoir to an upper artificial reservoir. The facility has a total capacity of 1000 MW, distributed across four 250 MW units. The project site is located at approximately 32.9° N latitude and 49.68° E longitude in Lorestan Province, situated 150 km west of Isfahan and 100 km south of Aligudarz.

From a geological perspective, the study area lies within the “High Zagros” (Northern Zagros) zone. This region is characterized as a highly fractured zone, stretching 70 to 100 km in width, bounded by the Zagros Folded Belt to the southwest and the Main Zagros Reverse Fault and Sanandaj-Sirjan Zone to the northeast. Tectonically, the area is predominantly influenced by the Dalan Formation, exhibiting a northwest-southeast structural grain (N130°E). The structural evolution of this region has been significantly shaped by tectonic movements during the Late Cretaceous and Pliocene periods, resulting in a complex geological environment with high fracture density

2. Research methodology

This study adopts a comprehensive multi-disciplinary approach to assess rock mass classification, evaluate structural stability, and design the support system for the tunnel bifurcation. The research methodology is organized into the following stages:

2.1. Empirical classification and support design

Initially, the rock mass was characterized using five widely recognized empirical systems: 1) Rock Mass Rating (RMR) (Bieniawski, 1989), 2) Rock Mass Quality Index (Q) (Barton et al., 1974), 3) Protodyakonov’s Method (Protodyakonov and Koifman, 1964), 4) Geological Strength Index (GSI) (Hoek and Brown, 1997), and 5) Rock Mass Index (RMi) (Palmstrom, 1995). These systems provided the baseline for preliminary support design and geomechanical parameter estimation.

2.2. Numerical modeling and stability analysis

To simulate the complex 3D geometry of the bifurcation, numerical modeling was performed using the finite difference method via FLAC3D software. The simulation captured three critical phases: geostatic equilibrium (pre-excavation), immediate post-excavation,

and post-installation of the support system. Stability was evaluated by comparing the resulting strain values with Sakurai’s critical strain thresholds. Furthermore, the structural integrity of the support system was verified using capacity diagrams (Axial Force-Bending Moment and Axial Force-Shear Force). The safety factors for the steel components and grout within the anchors were also calculated based on the axial forces and stresses extracted from the model. Finally, a sensitivity analysis was conducted to determine the influence of the rock mass mechanical properties on the predicted displacements, ensuring the robustness of the numerical results.

2.3. Wedge stability and squeezing analysis

Given the presence of structural discontinuities, the potential for unstable wedge formation was assessed using Unwedge software, incorporating parameters such as joint orientation (dip/dip direction), cohesion, and friction angle. Additionally, due to the tunnel’s considerable depth and the region’s tectonic activity, the potential for squeezing was analyzed using the criteria proposed by Jethwa et al. (1982), Goel et al. (1995), and Singh and Goel (1999).

3. Results and discussions

The study area is located in a region characterized by significant folding and tectonic activity, which substantially influences the stability of underground openings. According to the RMR classification, the rock mass is good categorized based on its geomechanical properties, while the Q-system places it within the ‘fair to poor’ range. Although stability analyses from both empirical methods show a strong correlation, the support measures prescribed by the RMR system are notably more conservative and robust.

In this study, the rock mass was modeled as a homogeneous and isotropic quasi-continuum using the Mohr-Coulomb constitutive model within the FLAC3D finite difference framework. The model geometry was developed in Rhino software, meshed using Kubrix software, and subsequently imported into FLAC3D. An excavation step of 2 meters was adopted, consistent with the Longitudinal Deformation Profile (LDP), the Ground Response Curve (GRC), and Sakurai’s hazard warning levels.

The rock mass exhibits elasto-plastic behavior, with approximately 80% of the total displacement occurring within the elastic range and the remaining 20% in the plastic zone. Numerical simulations across various sections indicate that critical strain values remain below the Sakurai threshold. Nevertheless, a primary support system is required to enhance the factor of safety and mitigate potential risks. The proposed support designs, integrating both empirical and numerical findings, are summarized in Table 13.

Sensitivity analysis of the Mohr-Coulomb parameters indicates that the rock mass deformation modulus, friction angle, and

cohesion are the primary drivers of the observed displacement fields. Furthermore, three-dimensional wedge stability modeling (Unwedge) conducted at the pre-junction, junction, and post-junction segments revealed localized instabilities; however, the integration of the proposed reinforcement system effectively enhances their factor of safety. In addition, both empirical and semi-empirical evaluations confirmed that the tunnel alignment is subject to negligible squeezing ground conditions.

4. Conclusion

Given that engineering geological assessments and structural stability are critical for the successful operation of water conveyance systems in pumped-storage power plants, this research evaluates the stability and internal forces of the lower waterway bifurcations

at the Rudbar Lorestan Pumped Storage Power Plant, utilizing empirical methods, structural analysis, and numerical modeling.

The results indicate that a temporary support system consisting of 10 cm of steel-mesh-reinforced shotcrete combined with fully injected reinforcement anchors is suitable for supporting tunnel stability. Numerical simulations and capacity diagrams demonstrate that the proposed support system provides a factor of safety (FOS) exceeding 1.5, ensuring the long-term stability of the rock mass along the alignment. A comparison between numerical and empirical findings shows that the support measures derived from the RMR classification are in good agreement with the numerical results. Furthermore, sensitivity analysis reveals that the deformation modulus and in-situ stress state are the most influential parameters affecting the magnitude of displacements.

تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری محل انشعاب تونل‌های آبراهه پایین نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار

مسعود حدیدی^۱، محمدحسین جوکار^۱، ماشاءالله خامه‌چیان^{۱*} و محسن شریفی بروجردی^۲

^۱ گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، تهران، ایران

چکیده

نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای روشی برای ذخیره برق و تولید برق به منظور تامین بیشینه تقاضای مصرف می‌باشند. با توجه به اهمیت این سامانه‌ها و آگاهی از این که بیشتر ناپایداری‌های متداول در فضاهای زیرزمینی پس از اجرا و نپرداختن به برخی مسائل مهندسی رخ می‌دهد، اقدام به تحلیل پایداری محل انشعاب تونل‌های آبراهه پایین نیروگاه تلمبه‌ای رودبار لرستان به روش‌های طبقه‌بندی‌های تجربی (GSI، RMR، RMI، Q، و ضریب پروتودیاکونوف) و روش عددی (نرم‌افزار FLAC3D) گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند فضای زیرزمینی با ضریب اطمینان پایین پایدار می‌باشد. بنابراین به منظور افزایش ضریب اطمینان، نصب سیستم نگهداری ضروری است. پس از نصب سیستم نگهداری نیروهای داخلی ایجاد شده در سیستم نگهداری به‌دست‌آمده و با استفاده از نمودارهای ظرفیت و تراز هشدار خطر ساکورایی ضریب اطمینان سیستم نگهداری تعیین گردید، که با توجه به نتایج حاصل از روش‌های یاد شده با نصب ۱۰ سانتی‌متر شاکرتیت همراه با یک‌لایه شبکه فولادی و میل مهارهای تمام تزریقی با طول و فاصله ۲ متر از یکدیگر می‌توان به ضریب اطمینان ۱/۵ رسید. همچنین با توجه منحنی عکس‌العمل زمین و پروفیل تغییر شکل طولی رفتار توده سنگ اطراف تونل الاستوپلاستیک است و گام حفاری ۲ متر به صورت تمام مقطع جهت حفاری حاصل گردید.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:

انشعاب تونل

سیستم نگهداری

رودبار لرستان

دیگرام ظرفیت

FLAC 3D

۱- پیش‌نوشتار

برطرف نمود (Katsprakis et al., 2013). نیروگاه سد رودبار لرستان، یک نوع خاص از نیروگاه‌های برق - آبی بوده، که نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای نامیده می‌شود. این نیروگاه‌ها به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین انتخاب‌ها جهت تنظیم بار شبکه برق به کار می‌روند که وظیفه آن‌ها پشتیبانی از شبکه الکتریکی در ساعات اوج مصرف و جبران کسری تولید است (موسوی کانی، ۱۴۰۳). در واقع، انتقال انرژی از ساعت‌های کم‌مصرف به ساعت‌های پر مصرف با استفاده از نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای با تلمبه کردن آب از یک مخزن پایین‌دست به مخزن بالادست انجام می‌شود که در نتیجه آن مازاد نیروی برق تولیدی و غیرقابل مصرف شبکه در ساعات غیر پیک به انرژی پتانسیل تبدیل می‌گردد و در ساعتی که نیاز به مصرف بیش از ظرفیت تولید می‌باشد آب ذخیره‌شده در مخزن بالادست توربین نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای را مانند نیروگاه‌های برق‌آبی معمولی به گردش درآورده و تولید برق می‌نماید و

در سدهای با مخازن بزرگ و حجم آب بالا که دبی سالانه و حجم مخزن برای توجیه فنی و اقتصادی یک نیروگاه کافی باشد، نیروگاه‌های برق‌آبی با هدف تولید نیروی برق از آب در کنار سدها احداث می‌شوند. در این نیروگاه‌ها تولید برق بر اساس هدایت آب به محل توربین‌ها و با چرخش آن‌ها صورت می‌گیرد. از مزیت‌های نیروگاه‌های برق‌آبی می‌توان به خروج آن‌ها در کمترین زمان ممکن از مدار، و از معایب آن نیز می‌توان به محدود بودن مکان‌های مناسب برای احداث آن‌ها اشاره کرد (Yang and Jackson, 2011). بیشتر نیروگاه‌های آبی از مراکز جمعیتی دور هستند و باید برای انتقال انرژی آن‌ها نیز هزینه صرف کرد و از دیگر ضعف‌های این نیروگاه‌ها وابستگی شدید به میزان آب ورودی است چنانچه اگر میزان بارش برف و باران کاهش یابد میزان تولید انرژی الکتریکی نیز کاهش می‌یابد، هر چند می‌توان با قرار دادن منبع پایین‌دست، در مناطق کوهستانی نزدیک دریا این مشکل را

* نویسنده مسئول: ماشاءالله خامه‌چیان؛ E-mail: khamechm@modares.ac.ir

ماخذنگاری:

حدیدی، م.، جوکار، م.ح.، خامه‌چیان، م. و شریفی بروجردی، م.، ۱۴۰۵، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری محل انشعاب تونل‌های آبراهه پایین نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۶(۲)، ۱۴۰، ۱۲۳-۱۴۸. <https://doi.org/10.22071/gsj.2026.537222.2213>

doi: 10.22071/gsj.2026.537222.2213



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

از روش المان محدود به بررسی تأثیر ساخت یک تونل انشعاب، بر روی یک تونل با در نظر گرفتن عوامل مختلف مانند قطر تونل انشعاب، ژرفای تقاطع، نسبت تنش‌ها، مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ بر روی نیروی محوری قائمی در محل تقاطع پرداخته و نتایج را به صورت نمودارهای طراحی بهنجار شده نیروهای محوری، در مقابل پارامترهای هندسه کلیدی برای تسهیل بر آورد اولیه الزامات پشتیبانی در تقاطع تونل ارائه کردند. لی و همکاران (Li et al., 2022) به بررسی واکنش و عوامل موثر بر سپر حفاری تونل‌های تک و دوقلو تحت بار لرزه‌ای و دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D پرداخته و گزارش دادند که تحت تأثیر یک زلزله قوی، ظرفیت باربری تونل به شدت کاهش می‌یابد، پوشش تونل (لاینینگ) تخریب می‌شود و نیروی داخلی باقی‌مانده زیادی ظاهر می‌شود. هنگامی که ژرفای مدفون تونل کم باشد، اثر غیرخطی شایان توجه‌تر است. افزون بر این، برهمکنش تونل‌های موازی بر توزیع نیروی داخلی و میزان شتاب سطح مجاور تأثیر می‌گذارد. چن و همکاران (Chen et al., 2022) مدل‌های پشتیبانی نرم‌افزار FLAC3D را جهت نشان دادن مستقیم نتایج محاسبات عددی تونل‌ها را توسعه و گزارش دادند که اثرات مرزی باید در محاسبات مدل تونل سه‌بعدی در نظر گرفته شود، که در آن محدوده تأثیر اثر مرزی مدل تقریباً ۱/۵ برابر دهانه تونل است. سان و همکاران (Sun et al., 2023) با ترکیب شبیه‌سازی عددی، تحلیل نظری و آزمایش میدانی، تحلیل پایداری و سازوکار تغییر شکل سنگ اطراف در تقاطع Y شکل را در زوایای تقاطع مختلف مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند با افزایش زاویه تقاطع، جابه‌جایی عمودی سقف در محل تقاطع کاهش می‌یابد و افزایش زاویه تقاطع سبب کاهش شعاع ناحیه پلاستیک می‌شود و جهت پشتیبانی برای کنترل ایمنی و تثبیت سنگ اطراف تقاطع نیز کابل لنگر فولادی میکرو NPR را پیشنهاد کردند. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2024) نهشته‌های یخچالی در بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای کاواپایکینگ (Kawabaiqing) در جنوب خاوری تبت را بر اساس ویژگی‌های ظاهری، تاریخچه رسوبی، تصاویر ماهواره‌ای تاریخی و غیره مورد ارزیابی و مدل‌سازی قرار داده و گزارش دادند که در شرایط طبیعی، بارندگی و لرزه‌ای محدوده مورد مطالعه این نهشته‌ها به صورت محلی پایدار می‌مانند. لی و همکاران (Li et al., 2024b) استفاده از معادن متروک را جهت احداث نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای پیشنهاد کرده و با تحلیل پایداری و تجزیه و تحلیل مقدار نشست فضای زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D گزارش کردند روش مدل‌سازی عددی از صحت و دقت بسیار خوبی برای تعیین نرخ نشست برخوردار است.

در ایران نیز، معینی‌رودبالی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی فرار آب از مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد کردستان با روش‌های عددی المان مجزا و المان محدود با نرم‌افزارهای UDEC، Seep/w و Seep/3D پرداخته و گزارش کردند برای جلوگیری از فرار آب احداث المان آب‌بند به کمک ژئوممبرین ضروری است. تلخابلو و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل آب بر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد کردستان با نرم‌افزار Rockwork (2008) و طبقه‌بندی‌های توده‌های سنگ مسیر تونل به روش‌های IRMR و GSI پرداخته و مشخص کردند که محدوده‌های ورودی و خروجی مسیر تونل در شرایط نامساعد قرار داشته و با در نظر گرفتن احتمال مجاله شونددگی و انفجار سنگ با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D پیشینه گام مجاز پیش‌روی برای مناطق بحرانی را پیشنهاد کردند. قارونی‌نیک و فرمهنی‌فراهانی (۱۳۹۵) با مدل‌سازی سه‌بعدی محل انشعاب تونل پنستاک سد، رودبار لرستان در نرم‌افزار FLAC3D تأثیر زاویه برخورد تونل‌ها بر طول نگهداری اضافی در تقاطع Y شکل را مورد بررسی قرار داده و نتایج تحلیل‌ها برای سه زاویه ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نشان داد که با کاهش زاویه برخورد، طول نگهداری اضافی لازم در محل گوه میانی و تاج تونل‌ها افزایش می‌یابد. همچنین کمالی‌بندی و همکاران (۱۳۹۵) به منظور تولید مدل شبکه گسسته شکستگی ویژگی‌های ۶۳۹ ناپیوستگی را به روش‌های نمونه‌برداری خطی و سطحی از مغار نیروگاه تلمبه

با این کار در حقیقت آب ذخیره‌شده از حالت انرژی پتانسیل به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد (خداپرست‌مشهدی و قزلباش، ۱۳۹۵؛ اصلاتی و موحد، ۱۳۸۲). اولین نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای جهان در سال ۱۸۹۰ در کشورهای ایتالیا و سوئیس مورد بهره‌برداری قرار گرفت و پس از آن بیش از ۲۰۰ نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، مانند شیسان لینگ (Shisanling) و فوشین (Fuxin) در چین (Li and Han, 2004)، براتینگ فوس (Brattingfoss) در نروژ (Pitorac et al., 2020)، مارتلانژ (Martelange) در بلژیک (Morabito et al., 2020) و ملوتی (Mloty) در لهستان (Kulpa et al., 2024) در جهان و نیروگاه سیاه‌بیشه و پروژه‌های نیروگاه سد آزاد کردستان (معینی‌رودبالی و همکاران، ۱۳۹۰) و سد رودبار لرستان (بهرزادی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۶) در ایران احداث شدند.

از آنجا که هرگونه اجرای فضای زیرزمینی مستلزم ارزیابی شرایط زمین‌شناسی مهندسی و مکانیک سنگ است، و شرایط پیچیده زمین‌شناسی (همچون وجود درزه‌ها، شکستگی‌ها و گسل‌ها، آب زیرزمینی، ناهمگنی توزیع تنش‌ها در اعماق) پارامترهای مکانیکی توده سنگ را تغییر می‌دهد، بنابراین در این شرایط نمی‌توان موضوع تحلیل پایداری تونل‌های آب بر تعبیه‌شده برای کمک به انتقال آب بین این مخازن را تنها به مدل‌های تجربی معطوف دانسته و ضروری است مدل‌های عددی پیچیده (مانند FEM یا FDM) جهت پیش‌بینی رفتار غیرخطی سنگ و کنترل تغییر شکل (برقراری تعادل بین صلیبیت برای جلوگیری از ریزش و انعطاف‌پذیری برای تحمل تغییر شکل‌های زمین‌شناختی) همچون پژوهش‌های موردی زیر انجام پذیرد. لیو و همکاران (Liu et al., 2008, 2009) با مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار ABAQUS به بررسی اثرات حفاری تونل جدید بر روی سیستم نگه‌دارنده (یعنی پوشش شاتکریت و بولت‌های سنگی) تونل متقاطع غیرهمسطح عمود بر آن در منطقه سیدنی با رژیم تنش منطقه‌ای افقی بالا پرداخته و گزارش کردند آثار اندرکنش بین تونل‌های متقاطع غیرهمسطح عمود بر هم در حین حفاری تونل جدید بیشتر از زمان اتمام ساخت است همچنین عبور تونل متعام جدید از بالای تونل موجود، به افزایش شایان توجه نیروهای کششی در سنگ دوزهای موجود پیرامون تاج می‌شود. بنابراین پوشش شاتکریت موجود در تاج باید پیش از عبور تونل جدید سترتر شود. هسیانو و همکاران (Hsiao et al., 2009) برای درک رفتار مکانیکی توده‌های سنگی در ناحیه تقاطع، ۷۵ مورد تحلیل عددی سه‌بعدی، تحت شرایط مختلف تونل‌زنی از جمله استحکام سنگ، رتبه‌بندی توده سنگ، ژرفای روباره و زاویه تقاطع انجام دادند و پس از تجزیه و تحلیل نتایج، معیاری برای ارزیابی اثر زوایای تقاطع بر رفتار تونل به همراه ۳ دسته پیشنهاد برای طراحی پشتیبانی در شرایط مختلف زمین‌شناسی ارائه کردند. لی و همکاران (Li et al., 2010) با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D به شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل عددی ویژگی‌های جابجایی، تنش و توزیع ناحیه پلاستیک یک تقاطع دهانه بزرگ پرداخته و گزارش کردند زاویه بین تنش افقی و جهت محوری جاده و زاویه تقاطع بر پایداری فضای زیرزمینی تأثیر دارد و جهت افزایش پایداری سیستم نگهداری بولت دو سر درگیر را برای تقویت پایداری ستون میانی پیشنهاد کردند. تان و همکاران (Tan et al., 2021) گزارش کردند اگرچه تونل‌های دوشاخه دارای تقاضاهای بالاتری در طراحی و فناوری ساخت می‌باشند، ولی روش ساخت‌وساز موجود نمی‌تواند این تقاضاها را برآورده کند. بنابراین آن‌ها یک روش حفاری توسعه و بسط معکوس (Reverse expanding excavation method) و یک روش حفاری انفجاری کنترل‌شده مرحله‌ای (گام‌به‌گام) (stepwise controlled blasting excavation method) را بدین منظور پیشنهاد کردند. به گونه‌ای که در روش حفاری انفجاری کنترل‌شده مرحله‌ای، ابتدا با تزریق و تقویت سنگ درگیر و مشترک دو تونل و سپس انفجار کنترل‌شده تونل بعدی به صورت مرحله‌ای، پایداری سنگ را تضمین می‌کند و تأثیر ساخت تونل بعدی را بر تونل موجود کاهش می‌دهند. کورتیس و کاواداس (Chortis and Kavvadas, 2021) با استفاده

با ظرفیت ۱۰۰۰ مگاوات (۴ واحد ۲۵۰ مگاواتی) می‌باشد. ساختگاه نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای رودبار لرستان در عرض جغرافیایی ۳۲/۹ شمالی و طول جغرافیایی ۴۹/۶۸ خاوری بر روی رودخانه رودبار، در کوه‌های زاگرس استان لرستان در حدود ۱۵۰ کیلومتری باختر اصفهان و ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز واقع شده است (شکل‌های A-1, B). با توجه به اختلاف ارتفاع در حدود ۳۱۰ متری بین سد و محل نیروگاه، احداث نیروگاه در پای سد موردنظر نبوده، بلکه محل نیروگاه به صورت سطحی در فاصله حدود ۳/۵ کیلومتر از محور سد طراحی شده است. این مجموعه شامل یک بدنه خاکی با هسته رسی، نیروگاه، تونل انحراف آب، سیستم انتقال آب شامل یک تونل آب بر و دو تونل پستناک و دو مخزن ضربه‌گیر با ارتفاع ۱۳۰ متر خواهد بود. سیستم آب‌بر این مجموعه شامل دو آبراهه مستقل است که آب را از مخزن بالا به توربین‌های نیروگاه منتقل می‌کنند (شکل ۱- C). تونل‌های آب بر شامل دو تونل موازی با طول ۳۵ و قطر ۹ متر است که آب را از مخزن بالا به توربین‌های نیروگاه منتقل می‌کنند. پیش از اتصال تونل‌های آب بر به نیروگاه، هر تونل به دو تونل با طول ۲۴ متر و قطر ۶/۵ متر انشعاب می‌یابند. مجموعه یاد شده در واحدهای آهکی سازند دالان قرار دارند که به علت عملکرد فعالیت‌های زمین‌ساختی منطقه در گذشته، درزه‌ها و گسل‌های فراوانی به وجود آمده است (شکل ۱- D). در شکل ۱-E تصاویری از سامانه آبی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان متشکل از رودخانه رودبار، سد و نیروگاه قابل مشاهده است.

محدوده مورد مطالعه، در پهنه زاگرس شمالی یا زاگرس مرتفع واقع شده که این پهنه در واقع یک نوار به شدت خرد شده به پهنای بین ۷۰ تا ۱۰۰ کیلومتر است که از جنوب باختری به نوار چین خورده زاگرس و از شمال خاوری به گسله اصلی معکوس زاگرس و پهنه سندانج- سیرجان محدود شده است. این پهنه دارای روند شمال باختری- جنوب خاوری N130 E بوده و تحت تاثیر حرکات کرتاسه پسین و پلیوسن قرار گرفته است. بر اساس شکل ۲ نمبرخ زمین‌شناسی ساختگاه، واحدهای سنگی مورد مطالعه از نظر چینه‌شناسی متعلق به دوران پالئوزویک و جدیدتر است و از نظر ساختاری نیز ۳ گسل در محدود طرح قرار دارند که هیچ کدام از این گسل‌ها تونل‌های مورد مطالعه را قطع نمی‌کنند. همچنین ۳ دسته ناپیوستگی با ویژگی‌های مشخص (جدول ۱) و فاصله‌داری کم (۶/۲-۰/۶ متر) توده سنگ را به یک محیط شبه پیوسته تبدیل کرده که می‌توان با فرض پیوستگی محیط از تئوری مکانیک محیط‌های پیوسته برای تحلیل آن استفاده کرد. چنانچه وضعیت ۳ دسته ناپیوستگی و لایه‌بندی نسبت به محور تونل در شکل ۳ ارائه شده است. همچنین تونل‌های مورد مطالعه در واحدهای آهکی سازند دالان با پارامترهای مکانیکی به شرح جدول ۲ قرار دارند که به علت عملکرد فعالیت‌های زمین‌ساختی منطقه در گذشته، درزه‌ها و گسل‌های فراوانی در این سازند به وجود آمده است (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۹۳).

۲- روش پژوهش

در این پژوهش، از یک رویکرد چندلایه مبتنی بر تلفیق داده‌های صحرایی (بر اساس ناپیوستگی‌های موجود در ساختگاه پروژه رودبار لرستان (جدول ۱))، روش‌های تجربی و مدل‌سازی‌های عددی برای تحلیل پایداری توده سنگ در مسیر اجرای تونل با توجه به هندسه پیچیده آن به‌ویژه در محل انشعاب استفاده شده است. با توجه به استانداردهای طراحی تونل‌های انتقال آب، فرض اصلی بر این استوار است که پایداری میان‌مدت و بلندمدت توده سنگ باید صرفاً توسط سیستم نگهداری اولیه تامین گردد و پوشش نهایی تنها نقش هیدرولیکی و سازه‌ای مکمل را ایفا کند. در گام نخست، به منظور به دست آوردن یک تخمین اولیه از رفتار پایداری زمین، اعتبارسنجی پارامترهای ورودی مدل‌های عددی و مقایسه تطبیقی نتایج تحلیل پایداری تونل در نقطه انشعاب، با استفاده از ۵ سیستم رده‌بندی مهندسی سنگ شامل: ۱- طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR) (Bieniawski, 1976, 1989)،

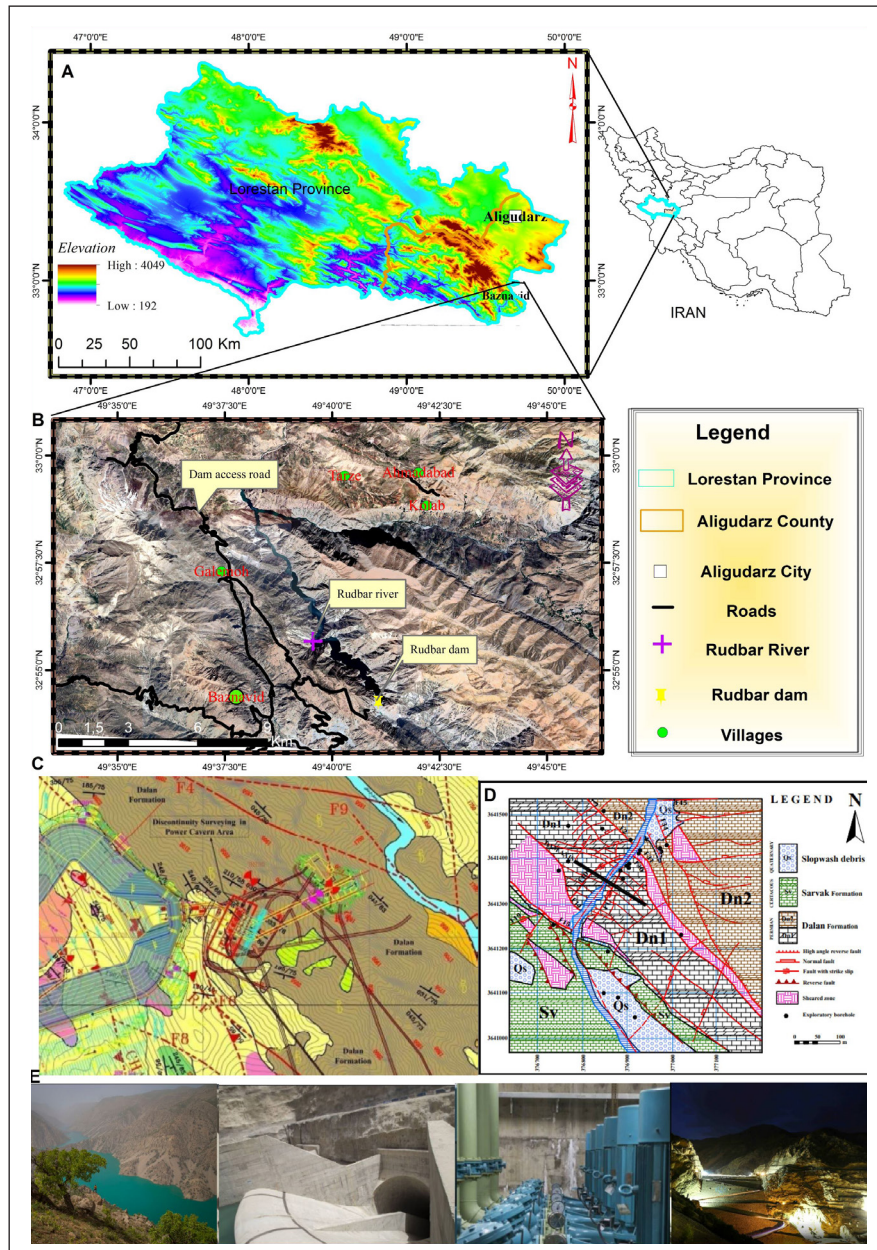
ذخیره‌ای رودبار لرستان، برداشت کرده و اظهار داشتند که بر اساس تحلیل‌های انجام شده، فعالیت‌های زمین‌ساختی و راستای تنش‌های اصلی در منطقه سبب شده است که برای هر یک از ویژگی‌های طول اثر و فاصله‌داری، تابع چگالی احتمال آن‌ها با توجه به ژئوتیک دسته‌درزه‌ها با یکدیگر متفاوت باشند. بهزادی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۶) با تحلیل پایداری و مدل‌سازی محل انشعاب تونل انتقال آب سد رودبار لرستان با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D، سیستم نگهداری موقت به صورت ترکیبی از شاکریت و شبکه پیچ سنگ با طول مناسب را برای محدوده مورد مطالعه پیشنهاد کردند. علیزاده کاکلر و دولتی ارده جانی (۱۳۹۷) به ارزیابی هدایت هیدرولیکی با استفاده از شبکه شکستگی‌ها در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان با برداشت صحرایی و شبیه‌سازی آن‌ها با روش المان مجزا (نرم‌افزار 3DEC) پرداخته که در نهایت، صحت سنجی آن‌ها با داده‌های حاصل از آزمایش لوزان انطباق بالایی از خود نشان داد. همچنین احمدی و همکاران (۱۴۰۱) با مدل‌سازی عملکرد سامانه چتری در تونل البرز با نرم‌افزار FLAC3D، نتیجه گرفتند که افزایش زاویه و کاهش فاصله بین لوله‌ها سبب افزایش پایداری تونل شده و با استفاده از سامانه چتری فوریلینگ، نشست تاج تونل به میزان ۷۰٪ نسبت به حالت بدون پیش تحکیم کاهش یافته است. صبور و همکاران (۱۴۰۳) با مدل‌سازی عددی اندرکنش تونل و زمین درگیر با رویکردهای مختلف دریکی از مجموعه تونل‌های پروژه آزادراه تهران شمال با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D پرداخته و اظهار داشتند در محدوده مورد مطالعه با توجه به اختلاف نسبتاً اندک نتایج حاصل از مدل‌های عددی با رویکردهای مختلف اعمال سامانه پیش نگهداری به صورت المان سازه‌ای و مدل‌های مبتنی بر پهنه معادل، استفاده از هر یک از این دیدگاه‌ها برای مقاصد مدل‌سازی امکان‌پذیر خواهد بود.

بنابراین، تحلیل پایداری در نقاط انشعاب تونل‌ها به دلیل تغییرات ناگهانی در مقطع و هندسه آن‌ها، از پیچیده‌ترین چالش‌های مکانیک سنگ و زمین‌شناسی مهندسی به‌شمار می‌رود. پدیده دوشاخه شدن تونل، افزون بر ایجاد تداخل و تمرکز تنش، به توزیع نامتقارن بار و شکل‌گیری گشتاورهای پیچشی در سیستم نگهداری می‌انجامد. همچنین، افزایش ابعاد جبهه کار در محل انشعاب، با کاهش زمان خود نگهداری توده سنگ، پتانسیل ریزش‌های ناگهانی را به شدت افزایش می‌دهد. بر این اساس در پژوهش حاضر، با هدف عبور از محدودیت‌های گزارش‌های فنی متداول، رویکردی تلفیقی و ترکیبی در پیش گرفته شده است. در گام نخست، کارایی سیستم‌های رده‌بندی تجربی رایج (GSI, RMR, RMI, Q) و ضریب پروتودیا کونوف) در تخمین نیروهای داخلی انشعاب تونل‌های آبراهه پایین نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای رودبار لرستان مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس با در نظر گرفتن محدودیت ذاتی روش‌های تجربی در مدل‌سازی هندسه‌های غیرساده و توده سنگ‌های ناهمسان، از روش تفاضل محدود (نرم‌افزار FLAC3D) نه صرفاً به عنوان ابزار محاسباتی، بلکه به عنوان بستری برای واکاوی رفتار تنش- کرنش بسته به شرایط زمین‌شناسی منطقه مورد پژوهش استفاده شد. در این راستا، با به کارگیری معیار تراز هشدار خطر ساکورایی و روش همگرایی- هم‌جواری، رفتار غیرخطی توده سنگ در مراحل مختلف حفاری مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین با انجام آنالیز حساسیت بر پارامترهای ژئومکانیکی معیار موهر- کولمب، عدم قطعیت‌های ذاتی در ویژگی‌های توده سنگ و تاثیرگذارترین عوامل ژئوتکنیکی بر پاسخ سازه‌ای انشعاب تونل مورد بررسی قرار گرفت تا در نهایت، بتوان با تجزیه و تحلیل و مقایسه تطبیقی نتایج تمامی آن‌ها در کنار ارزیابی سایر مخاطرات زمین‌شناسی مهندسی تونل، همچون پتانسیل لهیدگی و تاثیر تقاطع ناپیوستگی‌های سامانه‌مند (سیستماتیک) بر پایداری بلوک‌های سنگی (با استفاده از نرم‌افزار Unwedged)، یک سیستم نگهداری بهینه، ایمن و اقتصادی را برای محل انشعاب تونل‌های آبراهه پایین نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان ارائه کرد.

نیروگاه تلمبه- ذخیره‌ای رودبار لرستان، با هدف بهره‌گیری از پتانسیل انرژی برقابی بین مخزن سد رودبار لرستان در تراز پایین و یک مخزن مصنوعی در تراز بالا

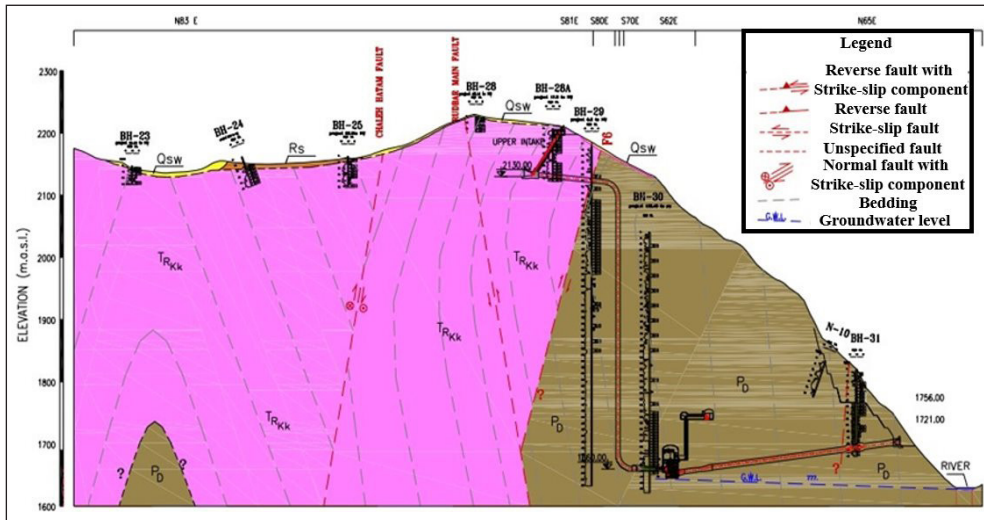
۵- شاخص توده سنگ (RMI) (Palmstrom, 1995) به طبقه‌بندی مهندسی سنگ و ارزیابی پایداری فضاهای زیرزمینی پرداخته و سیستم نگهداری مناسبی با توجه به امتیاز سنگ پیشنهاد می‌گردد.

۲- شاخص کیفی توده سنگ (Q) (Barton et al., 1974, 1980)، جدول نگهداری پروتویاکونوف (رحمان‌نژاد، ۱۳۹۱؛ Protodyakonov and Koifman, 1964)؛ ۴- اندیس مقاومت زمین‌شناسی (GSI) (Hoek and Brown, 1997) (Ji et al., 2023)



شکل ۱- (A) موقعیت اجرای پروژه در نقشه ارتفاعی (DEM) استان لرستان، (B) موقعیت سد رودبار لرستان، (C) پلان طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان به همراه عوارض ساختاری، نیروگاه، گالری تزریق و ناپوستگی‌ها (شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۳)، (D) نقشه زمین‌شناسی محدوده ساختگاه سد رودبار لرستان (شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۳)، (E) تصاویری از سامانه آبی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان.

Figure 1-A) Project location on the Digital Elevation Model (DEM) map of Lorestan province, B) Geographical location of the Rudbar-Lorestan Dam, C) Layout of the Rudbar-Lorestan Pumped Storage Power Plant including structural features, power station, injection gallery, and discontinuities (Mahab Ghods Consulting Engineering Co, 2014), D) Geological map of the dam site (Mahab Ghods Consulting Engineering Co, 2014), and E) Views of the water conveyance system of the power plant.



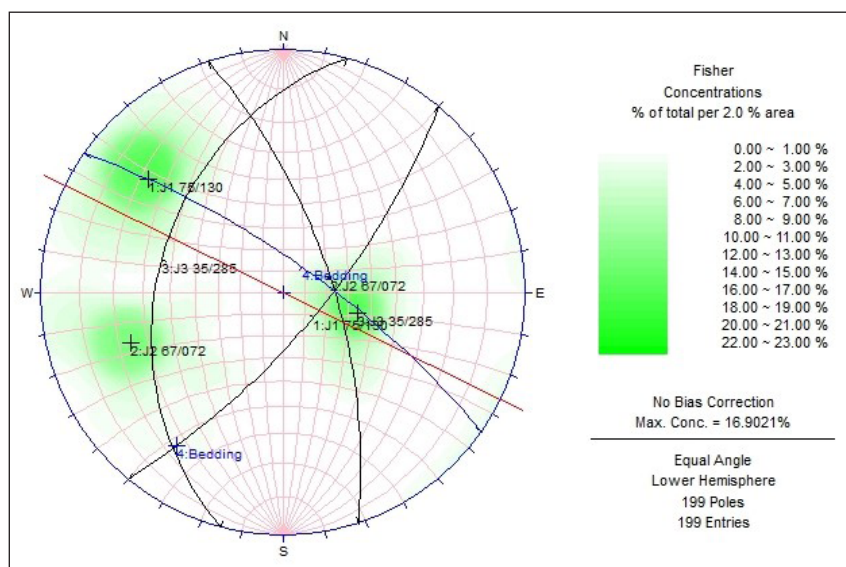
شکل ۲- نیمرخ زمین‌شناسی و زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه (شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۳).

Figure 2. Geological profile and tectonic features of the study area (Mahab Ghods Consulting Engineering Co, 2014).

جدول ۱- ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها در محدوده مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان (شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۳).

Table 1. Characteristics of discontinuities in the powerhouse cavern area of the Rudbar-Lorestan Pumped Storage Power Plant (Mahab Ghods Consulting Engineering Co, 2014).

Position	Discontinuity	Slope direction (deg)	Slope (deg)	Spacing (m)	Continuity (m)	Opening (mm)	Roughness	Filling	Water condition
Cavern Exploration Gallery and Surrounding Spaces	Bedding	35	72	6-60	> 20	0.25 -2.5	Smooth and flat	Calcite and Bitumen	Dry to Moist
	J1	285	36	20-60	1-3				
	J2	130	75						
	J3	73	68						



شکل ۳- موقعیت و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل.

Figure 3. Orientation and position of discontinuities relative to the tunnel axis.

جدول ۲- ویژگی‌های توده سنگ سازند دالان در مسیر تونل (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۹۳).

Table 2. Rock mass properties of the Dalan Formation along the tunnel route (Mahab Ghods Consulting Engineering Co, 2014).

Characteristics of the rock mass	Symbole	Value
The geological formation's type	-	Lime and dolomitic lime
Dry unit weight	γ_d (kN/m ³)	25.87
Saturated unit weight	γ_{sat} (kN/m ³)	26.26
Angle of internal friction	ϕ (degree)	42
Modulus of Elasticity	E (GPa)	9.8
Cohesion	C (MPa)	1.6
Poisson's ratio	ν	0.29
Uniaxial compressive strength	σ_c (MPa)	88
Hydraulic fracture test	Minimum horizontal to vertical stress ratio	0.1 - 0.4
	Maximum horizontal to vertical stress ratio	0.5 - 0.9

که در این رابطه، γ_c کرنش برشی بحرانی برحسب درصد، ϵ_c کرنش بهنجار بحرانی برحسب درصد و ν نسبت پواسون است.

سپس از نمودارهای ظرفیت (نیروی محوری در برابر لنگر خمشی و برش) جهت تحلیل اندرکنش سنگ و سازه استفاده گردید. زیرا این رویکرد ترکیبی اجازه می‌دهد تا نه تنها پایداری توده سنگ، بلکه کفایت سیستم نگهداری (از جمله طول، قطر و فاصله‌داری میل مهارها بر اساس پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی) در بهینه‌ترین حالت اقتصادی و فنی تعیین گردد.

بدین منظور نیروها و تنش‌های ایجادشده در میل مهارها، مانند طول میل مهار، فاصله‌داری آن‌ها و قطر پیچ سنگ با کمک پارامترهایی مانند عرض تونل برحسب متر، ارتفاع بار سنگ برحسب متر و وزن واحد حجم سنگ برحسب تن بر مترمکعب (مدنی، ۱۳۹۳)، با نرم‌افزار FLAC3D مورد تحلیل قرار گرفت. در این مرحله برای تضمین پایداری و در نظر گرفتن ایمنی کافی در طراحی، معیارهای پذیرش بر اساس تنش‌های مجاز تعریف گردید؛ به طوری که تنش مجاز فولاد (Fs) معادل ۶۰ درصد تنش تسلیم نهایی (0.6 Fsy) و تنش مجاز دوغاب تزریق (Fc) معادل ۸۵ درصد مقاومت نهایی آن (0.85 Fdc)، برای فولاد معمولی (37 St) با $\phi = 32\text{mm}$ در نظر گرفته شد (اورعی، ۱۳۹۰). سپس از طریق تقسیم تنش مجاز به تنش وارده ضریب اطمینان برای دوغاب و فولاد به دست آمد تا کفایت طراحی به‌ویژه در نقطه انشعاب تونل اثبات شود.

در نهایت نیز با توجه به زمین‌ساخت فعال منطقه، ماهیت ساختاری توده سنگ در مسیر تونل و نقش کلیدی ناپیوستگی‌ها در پایداری فضاها زیرزمینی، تحلیل‌های این پژوهش به مدل‌سازی پیوسته محدود نگردید. بر این اساس، با استفاده از نرم‌افزار Unwedge و با تکیه بر داده‌های دقیق برداشت‌های درزه‌نگاری (شامل شیب، جهت شیب، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی درزه‌ها)، گوه‌های بالقوه ناپایدار در مسیر تونل مورد شناسایی قرار گرفت. افزون بر این، جهت بررسی اثر پارامترهای مکانیکی توده سنگ اطراف تونل بر روی میزان جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی آنالیز حساسیت انجام گرفت. همچنین به دلیل ژرفای زیاد تونل، انشعاب و زمین‌ساخت فعال منطقه با بهره‌گیری از روش تجربی و نیمه تجربی جتو و همکاران (Jethwa et al., 1982)، گوئل و همکاران (Goel et al., 1995) و سینگ و همکاران (Singh and Goel, 1999) به بررسی مخاطره لهیدگی تونل پرداخته شد.

در گام دوم، با توجه به این که تغییرات مقطع و دوشاخه شدن تونل به باز توزیع سه‌بعدی و غیرخطی تنش‌ها می‌انجامد، از روش تفاضل محدود (نرم‌افزار FLAC3D) استفاده و کلیه محاسبات در ۳ مرحله پیش از حفر سازه، بلافاصله پس از حفر سازه و در نهایت پس از نصب سیستم نگهداری انجام شده و در هر مرحله کلیه تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در اطراف سازه محاسبه گردید. به‌منظور چیرگی بر چالش‌های مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده که از محدودیت‌های متداول در نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی است، از نرم‌افزار Rhino جهت ساخت دقیق هندسه انشعاب و از Kubrix برای ایجاد شبکه‌بندی بهینه و سازمان‌یافته استفاده شد تا دقت محاسبات در زون‌های تمرکز تنش افزایش یابد. بدین منظور در مجموع، فرایند مدل‌سازی در ۶ مرحله شامل: ۱. انتخاب محدوده مناسبی از توده سنگ، ۲. انتخاب مدل رفتاری مناسب و تعیین پارامترهای آن، ۳. اعمال شرایط مرزی و تنش‌های اولیه، ۴. حل مدل تا رسیدن به تعادل، ۵. ایجاد تغییر در مدل و ۶. حل مجدد مدل، انجام شد تا بتوان شرایط اولیه و مرزی مدل را به واقعیت زمین‌شناسی منطقه نزدیک و توزیع تنش را جهت تحلیل پایداری تونل به‌دقت واکاوی کرد. پس از آن با محاسبه مقادیر کرنش بحرانی ساکورایی (Sakurai, 1981, 1993) حاصل از رابطه‌های (۱) تا (۳)، ترازهای هشدار خطر I، II و III ساکورایی مورد تحلیل و نتایج آن با بررسی‌های حاصل از مدل‌سازی عددی (نرم‌افزار FLAC3D) مورد مقایسه قرار گرفت. چنانچه در معیار ساکورایی در شرایط تراز هشدار خطر I تونل مشکل ناپایداری ندارد. کرنش بحرانی حاصل از تراز هشدار خطر II به‌عنوان مبنای طراحی نگهداری تونل‌های مهندسی پیشنهادشده است و تراز هشدار خطر III پایداری کوتاه‌مدت را نشان می‌دهد. افزون بر آن، با توجه به ماهیت سه محوری تنش‌های وارده بر توده سنگ اطراف تونل، برای تحلیل پایداری مکانیکی از کرنش برشی بحرانی مطابق رابطه ۴ استفاده شد (Itasca Consulting Group, 2009).

$$\text{Log } \epsilon = -0.25 \text{ log } E - 0.85 \quad (1)$$

$$\text{Log } \epsilon = -0.25 \text{ log } E - 1.2 \quad (2)$$

$$\text{Log } \epsilon = -0.25 \text{ lg } E - 1.59 \quad (3)$$

که در این روابط، E مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ (کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع) و ϵ کرنش بحرانی برحسب درصد می‌باشد.

$$\gamma_c = (1 + \nu) \epsilon_c \quad (4)$$

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- سیستم نگهداری پیشنهادی تونل بر اساس روش‌های تجربی

طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ شامل فرایند جمع‌آوری و تحلیل داده‌های کیفی و کمی می‌باشد که در نهایت به‌عنوان یک ابزار سریع جهت تخمین ملزومات اولیه سیستم نگه‌دارنده، ارزیابی پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد (جمالی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۰). بر اساس شاخص‌های معیارهای RMR و Q امتیاز توده سنگ مسیر تونل در محدوده مورد مطالعه (برای پیش و پس از انشعاب تونل یکسان) و به ترتیب برابر با ۶۳ (خوب) و ۳/۵ (متوسط تا

ضعیف) می‌باشد. همان‌گونه که در جدول‌های ۳ و ۴ قابل مشاهده است، نگه‌دارنده حاصل از روش RMR سنگین‌تر و محافظه‌کارانه‌تر است. که این نتایج با پژوهش ابره و همکاران (۱۳۹۱) همخوانی دارد. چنانچه آن‌ها با ارزیابی طبقه‌بندی Q در مسیر تونل در محدوده سد رودبار لرستان در ۵ مقطع و سازند زمین‌شناسی به ترتیب دالان گسله، دالان خوب، میلا، هرمز (پنستاک بلند) و هرمز (پنستاک کوتاه) به ترتیب محدوده مقادیر ۰/۱۶-۰/۱۸، ۱۱/۵-۲/۹، ۰/۰۵-۰/۰۱، ۰/۰۵-۰/۰۱ و ۲/۳-۵/۵ را گزارش کردند.

جدول ۳- نگه‌دارنده پیشنهادی بر اساس سیستم طبقه‌بندی سنگ RMR (Bieniawski, 1989).

Table 3. Proposed support system based on the RMR classification (Bieniawski, 1989).

RMR Classification	Drilling system	Rock bolts with a diameter of 20 mm and reinforced by cement mortar	concrete spraying (shotcrete)
60-80	The tunnel excavation should be done in stages, with each stage being 1.5-3 meters ahead of the previous one. Following each blasting operation, a temporary support system should be put in place, and the support system should be installed at a distance of 10 meters from the work face.	Regular Rock bolts with a length of 2 and spaced 1-1.5 meters apart should be installed in the crown part and the walls in the crown part of the metal network	50-100 mm thickness in the crown and 30 mm in the walls

جدول ۴- نگه‌دارنده پیشنهادی بر اساس سیستم طبقه‌بندی سنگ Q (Barton et al., 1974, 1980).

Table 4. Proposed support system based on the Q-system classification (Barton et al., 1974, 1980).

Tunnel	Before the bifurcation	After the bifurcation
Diameter	9	6.5
ESR	1.6	1.6
De	5.62	4.06
Q	3.5	3.5
Support system	The shotcrete is 40-50 mm thick, and rock bolts s are 1.5-2.5 m long, spaced 1-1.5 m apart.	

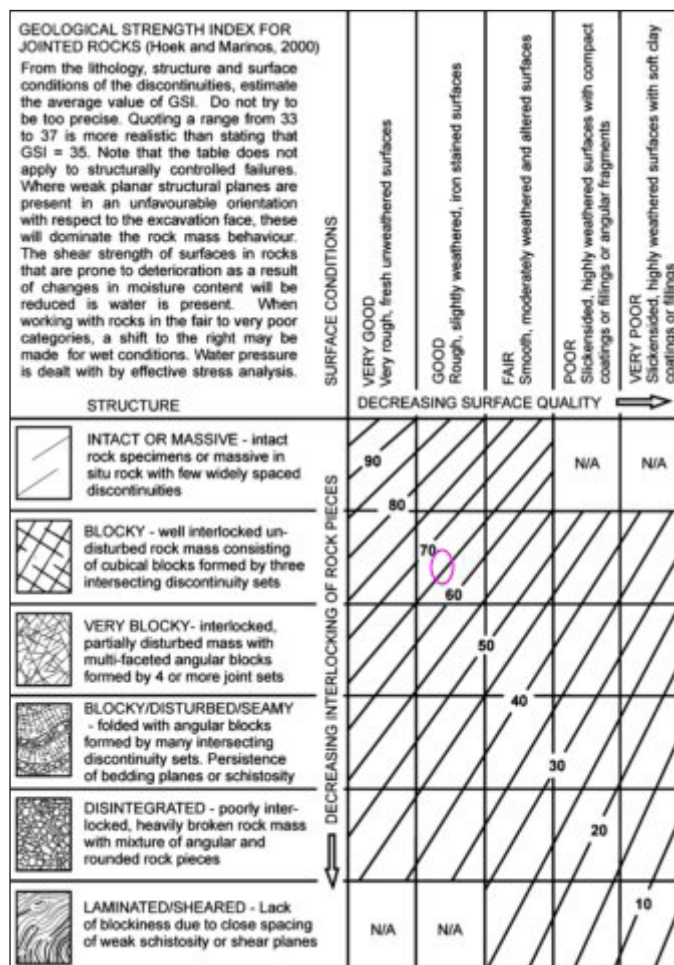
تونل، فاکتور تعدیل جهت دسته‌درزه‌های اصلی و فاکتورهای تعدیل تعداد درزه‌ها) می‌باشد که نتایج حاصل از محاسبات طبقه‌بندی RMI برای تحلیل پایداری تونل، پیش و پس از انشعاب در جدول ۶ قابل مشاهده است. بر این اساس، در مجموع، امتیاز سیستم طبقه‌بندی RMI، ۱۰/۵۶ - ۳/۵۲ و رده توده سنگ مقاوم بوده (شکل ۵) و بنابراین شاکریت با ستبرای ۱۰۰-۶۰ میلی‌متر و پیچ سنگ به فاصله ۱/۵ متر از یکدیگر به منظور سیستم نگهداری تونل پیشنهاد می‌گردد.

در مجموع، نتایج گویای آن بود که محدوده مورد مطالعه در یک پهنه چین‌خورده و فعال زمین‌ساختی قرار دارد که بر پایداری فضای زیرزمینی تاثیر بسزایی دارد. چنانچه تحلیل جامع توده سنگ بر مبنای ۵ معیار رده‌بندی تجربی (RMI، Q، GSI، RMR) و پروتودیاکونوف (تصویری چندگانه از رفتار ژئومکانیکی ساختگاه ناشی از وزن‌دهی متفاوت پارامترها ارائه می‌دهند. نتایج حاصل از شاخص

در ادامه، مقدار شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) بین ۷۰-۶۰ تعیین گردید که در این وضعیت، شرایط درزه‌ها در رده خوب (سطوح زیر با اندکی هوازدگی) و اندازه بلوک در رده بلوکی بوده، که در این شرایط توده سنگ کاملاً قفل شده و دست‌نخورده، متشکل از بلوک‌های مکعبی حاصل از ۳ دسته‌درزه عمود بر هم که فاصله‌داری درزه‌ها بین ۱۰۰-۳۰ میلی‌متر واقع شده است (شکل ۴). همچنین با توجه به مقاومت فشاری تک‌محوری و RQD محیط، ضریب پروتودیاکونوف ۸/۹۷ محاسبه شد و سیستم نگهداری پیشنهادی مطابق جدول شماره ۵ ارائه گردید. روش RMI متکی به ۲ فاکتور اصلی شامل کیفیت زمین (GC) (شامل ۹ پارامتر: مقاومت فشاری تک‌محوری، پارامتر درزه‌داری، حجم بلوک، زبری درزه، هوازدگی درزه، فاکتور شرایط درزه، ضریب تداوم درزه، فاکتور تعدیل سطح تنش و فاکتور تعدیل نیروی ثقل) و فاکتور اندازه (Str) (شامل ۴ پارامتر: ستبرای یا بُعد بلوک، قطر یا عرض

و روش Q به دلیل وارد کردن پارامتر هندسی قطر معادل سیستم نگهداری را بر اساس ابعاد واقعی تونل بهینه می‌کند. این ناهمسانی در نتایج تجربی، ضرورت استفاده از مدل‌سازی عددی FLAC3D را بیش از پیش نمایان می‌سازد. زیرا روش‌های تجربی به دلیل ماهیت تک‌مقطعی، قادر به درک پدیده تمرکز تنش در محل انشعاب و اندرکنش دو فضای زیرزمینی مجاور نیستند. از این رو، در این پژوهش، از تحلیل عددی به‌عنوان مرجع نهایی استفاده شد تا با عبور از محافظه‌کاری‌های رده‌بندی‌های RMR و RMI و همچنین تخمین‌های محتاطانه سیستم Q، به یک طراحی بهینه و مبتنی بر واقعیت زمین‌شناسی مهندسی برای جلوگیری از هزینه‌های اضافی در منطقه رودبار لرستان دست‌یافت.

مقاومت زمین‌شناسی (GSI) بین ۶۰ تا ۷۰ و شاخص RMI بین ۳/۵۲ تا ۱۰/۵۶، نشان‌دهنده توده سنگی بلوکی، قفل‌شده و دست‌نخورده با مقاومت بالاست که با ارزیابی سیستم RMR (سنگ خوب - کلاس II) همخوانی کامل دارد. همچنین ضریب پروتودیاکونوف (۸/۹۷) تاییدی بر سختی نسبی توده سنگ در برابر تنش‌های فشاری است. در بخش طراحی سیستم نگهداری، مشاهده می‌شود که روش‌های RMR و RMI به‌صورت همگرا، شاکرتیتی با ستبرای ۶۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر را پیشنهاد می‌دهند که نسبت به پیشنهاد روش Q (۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر) سنگین‌تر و محافظه‌کارانه‌تر است. در واقع این تناقض نشان می‌دهد که روش RMR در کلاس‌های بالای سنگی (سنگ خوب) تمایل به بیش طراحی (Over-Design) دارد



شکل ۴- برآورد شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) در محدوده مورد مطالعه.

Figure 4. Estimation of the Geological Strength Index (GSI) in the study area.

جدول ۵- سیستم نگهداری پیشنهادی روش پرتودیاکونوف (رحمان‌نژاد، ۱۳۹۱، Ji et al., 2023; Protodyakonov and Koifman, 1964).

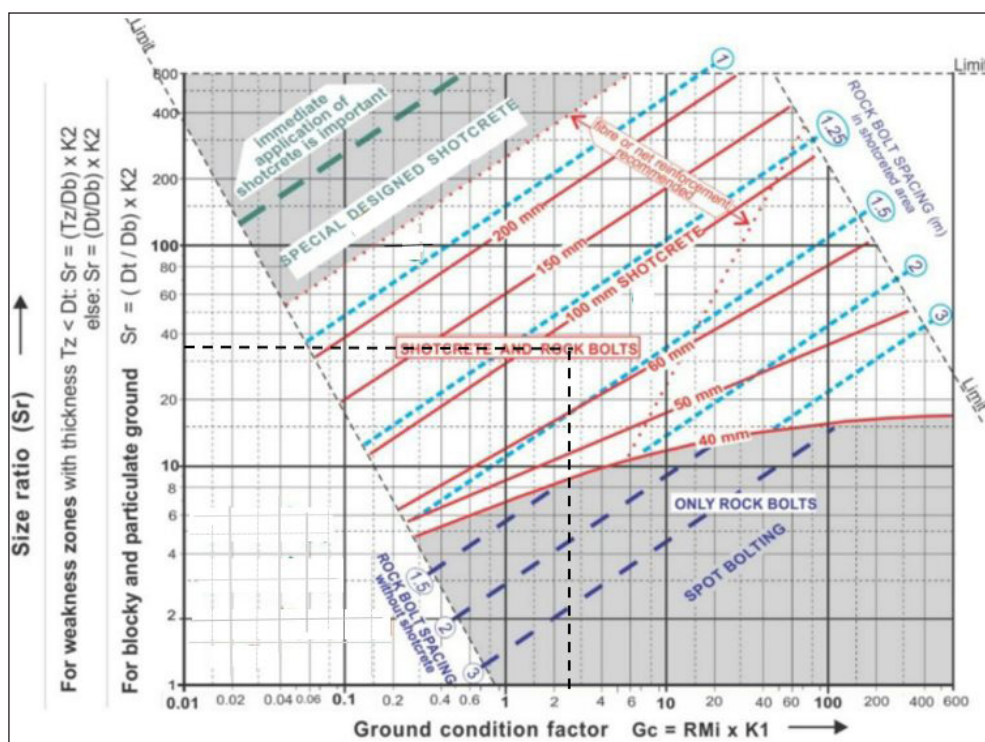
Table 5. Proposed support system based on Protodyakonov's theory (Protodyakonov and Koifman, 1964; Rahmnejad, 2012; Ji et al., 2023).

Type of support system		k _v	Protodyakonov coefficient
Walls	Crown		
Local rock bolts, shotcrete 10-15 cm thick on wire mesh	Rock bolts, shotcrete 10-15 cm thick on SFRS wire mesh 5-8 cm thick	1.5 – 5	8.97

جدول ۶- نتایج محاسبات پارامترهای RMI برای تحلیل پایداری تونل.

Table 6. Evaluation of tunnel stability status based on the RMI classification.

Dalan Formation	q_c	J_p	S_L	C	G_c	D_t	N_j	C_o	S_f
Befor Bifurcation	88	0.089	1	2.75	7	0.44	0.85	2	37.5
After Bifurcation	88	0.089	1	2.75	5.5	0.44	0.85	2	37.5



شکل ۵- ارزیابی وضعیت پایداری توده سنگ تونل بر اساس طبقه‌بندی RMI.

Figure 5. Evaluation of tunnel stability status based on the RMI classification.

اجرای این تحلیل، نرم‌افزار FLAC3D بر مبنای روش تفاضل محدود انتخاب گردید. انتخاب این روش عددی به دلیل توانمندی بالا در: ۱- پیاده‌سازی مدل‌های رفتاری پیچیده در محیط‌های پیوسته معادل، ۲- شبیه‌سازی دقیق حفاری‌های چندمرحله‌ای در محل انشعاب، ۳- مدل‌سازی اندرکنش سیستم‌های نگهداری متنوع و ۴- کارایی محاسباتی بالا در حل مسائل با حجم المان‌های زیاد، صورت گرفت تا بتوان امکان تحلیل دقیق زون‌های پلاستیک و جابه‌جایی‌های بازگشتی را در یک ساختار منسجم فراهم کرد.

۳-۳- ویژگی‌های تغییر شکل‌پذیری و مقاومتی مصالح نگهدارنده مدل

از آنجا که ژرفای قرارگیری تونل مورد مطالعه در ۴۹۰ متری از سطح زمین بوده و در سازه‌هایی که در ژرفای زیاد حفر می‌شوند تنش برجا بیش از هر پارامتر دیگر تاثیرگذار می‌باشند. بنابراین در مدل ایجاد شده برای اعمال شرایط مرزی، جابه‌جایی

۳-۲- مدل‌سازی تونل

یکی از چالش‌های بنیادین در مدل‌سازی فضاهای زیرزمینی، تعیین ماهیت محیط از نظر پیوستگی یا ناپیوستگی است. در این پژوهش، از معیار شاخص توده سنگ (RMI) به عنوان جامع‌ترین شاخص برای تشخیص رفتار مکانیکی محیط در مقاطع بزرگ استفاده شد. بر اساس مبانی نظری (Palmstrom, 1995; Sakurai, 1999)، نسبت قطر فضای حفاری به ابعاد بلوک‌های سنگی تعیین‌کننده نوع مدل رفتاری است. در محدوده مورد مطالعه توده سنگ اطراف تونل افزون بر لایه‌بندی دربرگیرنده ۳ دسته‌درزه است و با توجه به ناپیوستگی‌های متقاطع، مقدار فاکتور پیوستگی بیشتر از ۳۰ می‌باشد. همچنین با توجه به تمرکز تنش‌های برجا در ژرفا، توده سنگ به صورت یک محیط همگن و ایزوتروپ فرض شد. این فرض اجازه می‌دهد تا برای برآورد مقاومت و تحلیل پایداری، از معیار شکست غیرخطی هوک-بروان استفاده گردد که انحطاط مقاومت سنگ بکر به توده سنگ درزه‌دار را به خوبی پوشش می‌دهد. جهت

تغییر شکل پذیری و ویژگی‌های مقاومتی مصالح مانند چگالی (دانسیته)، مدول تغییر شکل پذیری، ویژگی‌های توده سنگ به همراه شاتکریت مسلح با مش فولادی و میل مهار جهت تقویت توده سنگ و پایدارسازی فضای زیرزمینی می‌شود که مطابق جدول‌های ۷ تا ۹ در مدل به کار گرفته شدند (Itasca Consulting Group, 2009) قابل مشاهده است. بدین منظور المان شاتکریت با استفاده از فرمان Shell و المان میل مهار با استفاده از فرمان Cable به مدل وارد گردید.

افقی در طرفین بلوک و جابجایی قائم در کف مدل صفر فرض گردید و در تحلیل‌ها با توجه به نتایج آزمایش شکست هیدرولیکی، تنش‌های افقی در راستای عمود بر محور تونل برابر ۰/۳ و در راستای محور تونل برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شد. همچنین برای تحلیل پایداری تونل با توجه به اطلاعات و شرایط موجود در محیط موردنظر مدل رفتاری موهر-کلمب به عنوان مدل رفتاری مناسب برای مدل‌سازی به کار گرفته شد. در ادامه، ویژگی‌های مورد استفاده در نرم‌افزار شامل ویژگی‌های

جدول ۷- پارامترهای ورودی توده سنگ در مدل‌سازی عددی.

Table 7. Input parameters of the rock mass used in the numerical model.

Young's modulus (Gpa)	Cohesion (MPa)	Internal friction angle (deg)	Shear Modulus (GPa)	Bulk modulus (GPa)
9.8	1.6	42	3.8	7.77

جدول ۸- ویژگی‌های فنی شاتکریت مسلح به مش فولادی در مدل.

Table 8. Technical properties of the steel mesh reinforced shotcrete in the model.

Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Thickness (cm)
20	0.25	10 and 15

جدول ۹- ویژگی‌های میل مهارهای به کار گرفته شده در مدل.

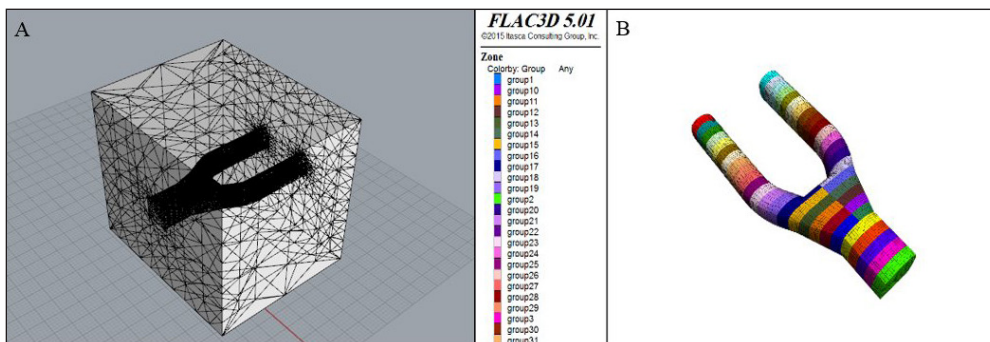
Table 9. Anchor Properties Utilized in the Model.

Slurry hardness (MPa)	Angle of internal friction of the slurry (deg)	A (Diameter 32mm) (m ²)	Density(kg/m ³)	Elastic modulus (GPa)
7	25	0.00080	7000	200

۳-۴- ایجاد تعادل اولیه در مدل پیش از حفاری

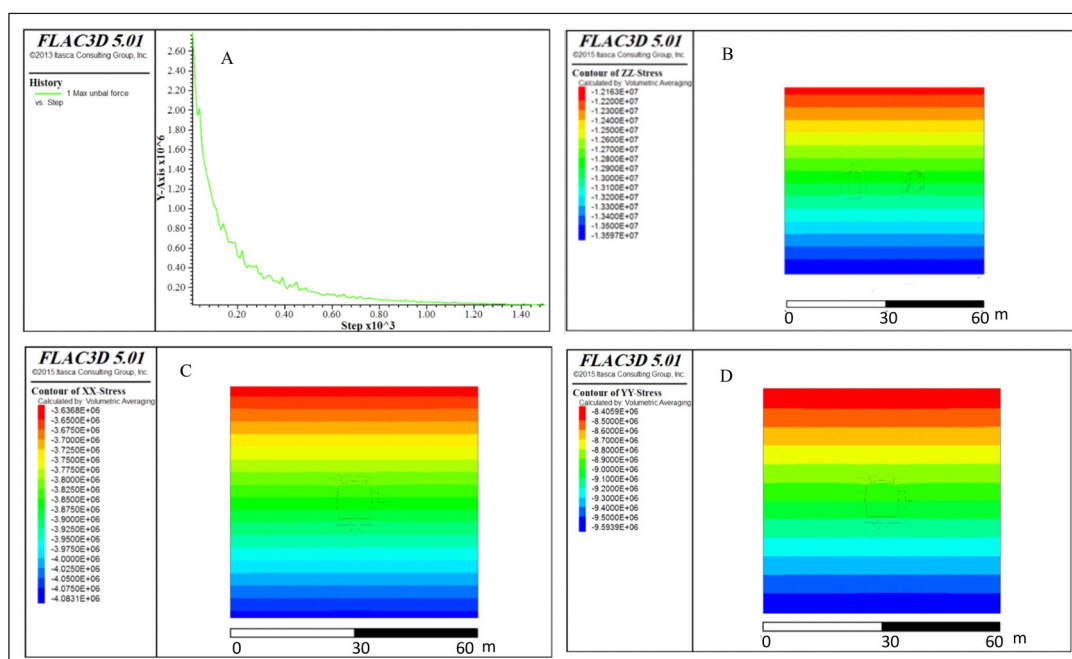
شود تا تنش‌های اولیه ایجاد شوند. ولی پیش از ایجاد حفاری لازم است جابه‌جایی‌ها صفر شوند تا شرایط واقعی پیش از حفر تونل منظور گردد. این مرحله از مدل‌سازی عددی در ژئومکانیک اهمیت بسیاری دارد، چراکه به مدل این اجازه داده می‌شود تا نیروهای نامتعادل کننده که به مدل وارد می‌گردد را حذف نماید (Carranza-Torres and Fairhurst, 2000). همان‌گونه که در شکل A-۷ قابل مشاهده است، نیروی نامتعادل کننده مدل پیش از انجام حفر به عدد صفر همگرا شده است. همچنین شیوه توزیع تنش‌ها پیش از عملیات حفر در شکل B-۷ و مقدار تنش‌های برجا در جهت‌های عمود و موازی با محور تونل به ترتیب در شکل‌های C, D-۷ قابل مشاهده است.

برای ساخت هندسه مدل مطابق شکل A-۶ از نرم‌افزار Rhino استفاده شده و توسط نرم‌افزار Kubrix مش‌بندی و وارد نرم‌افزار FLAC3D گردید (شکل B-۶). در ادامه، با الگو گرفتن از آن چه که در واقعیت اتفاق می‌افتد، سعی گردید شرایط مدل هر چه بیشتر با واقعیت تطبیق داشته باشد. واقعیت این است که پیش از حفر تونل، زمین در تعادل است و حفر تونل سبب به وجود آمدن یک سری از اغتشاشات در وضعیت تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها خواهد شد با توجه به این که تا این مرحله شرایط مرزی و تنش‌های برجا در مدل اعمال شده‌اند، لازم است مدل عددی (پیش از حفر تونل) حل



شکل ۶- (A) هندسه تونل ساخته شده در نرم‌افزار Rhino و (B) مدل عددی انتقال یافته به نرم‌افزار FLAC3D.

Figure 6-A) Tunnel geometry generated in Rhino and B) the finalized numerical model in FLAC3D.

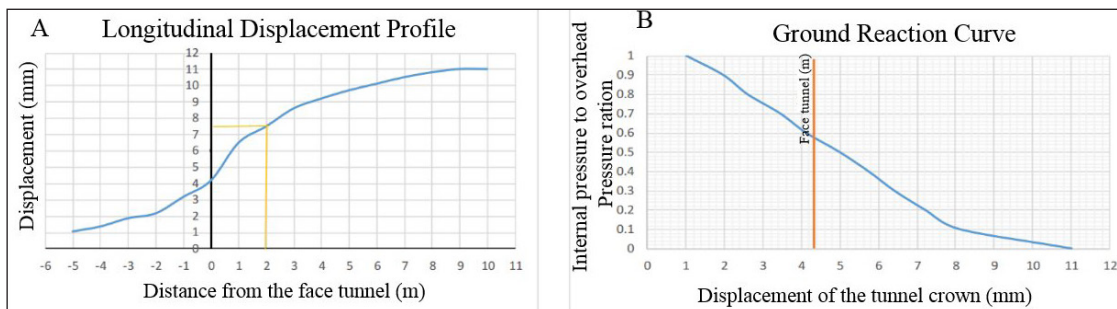


شکل ۷- (A) روند همگرایی نیروهای نامتعادل، (B) کنتورهای تنش قائم (برحسب پاسکال) پیش از حفاری، (C) کنتورهای تنش (برحسب پاسکال) در جهت عمود بر محور تونل و (D) کنتورهای تنش (برحسب پاسکال) در جهت موازی با محور تونل.

Figure 7-A) Unbalanced force history, B) vertical stress (in Pascals) before excavation, C) Stress contours perpendicular to the tunnel axis, and D) Stress contours parallel to the tunnel axis.

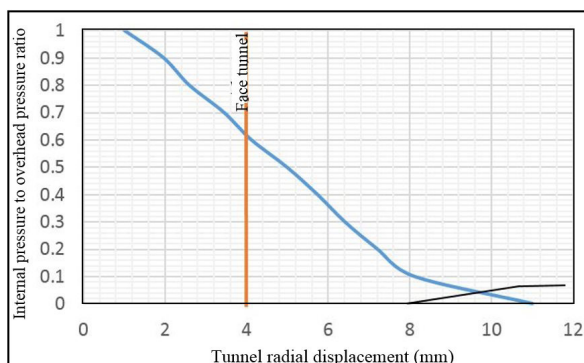
بیانگر پتانسیل بالای خود نگهداری توده سنگ پیش از رسیدن به حد گسیختگی است. در نهایت، با تلیف منحنی واکنش زمین و منحنی ویژگی نگهداری (شامل ۱۰ سانتی متر شاکریت و شبکه ۲×۲ میل‌مهارهای ۳۲ میلی‌متری) (Carranza-Torres and Fairhurst, 2000; Carranza-Torres and Diederichs 2009; Barczak, 2017)، ضریب اطمینان عملیاتی سیستم نگهداری محاسبه گردید (شکل ۹ و جدول ۱۰). این رویکرد، نه تنها کفایت سیستم نگهداری پیشنهادی را از منظر ظرفیت باربری تضمین می‌کند، بلکه بهینه بودن ستبرای پوشش را در برابر فشار تغییرشکل‌های پلاستیک سنگ در ژرفای زیاد اعتبارسنجی می‌نماید. چنانچه در شکل ۱۰ جابه‌جایی‌های ایجادشده در تونل در حالت بدون نگهداری در جهات مختلف قابل مشاهده است.

به‌منظور تعیین گام بهینه حفاری و زمان‌بندی نصب سیستم نگهداری، تحلیل‌های اندرکنش سنگ و سازه با استفاده از منحنی پاسخ زمین (GRC) و پروفیل تغییرشکل طولی (LDP) در محیط نرم‌افزار FLAC3D انجام شد (شکل ۸). این فرایند بر مبنای روش همگرایی-هم‌جواری صورت گرفت تا باز توزیع تنش‌ها در جبهه کار تونل به‌دقت پایش شود. با انطباق نتایج مدل‌سازی عددی بر ترازهای هشدار خطر ساکورایی، گام حفاری ۲ متر به‌عنوان محدوده ایمن جهت پایداری جبهه کار برگزیده شد. تحلیل رفتاری توده سنگ نشان داد که ناحیه اطراف تونل در یک رژیم الاستوپلاستیک قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که حدود ۸۰ درصد از جابه‌جایی‌های کل در محدوده رفتار الاستیک و ۲۰ درصد باقی‌مانده ناشی از گسترش زون پلاستیک در اطراف گالری انشعاب است. این نسبت جابه‌جایی،



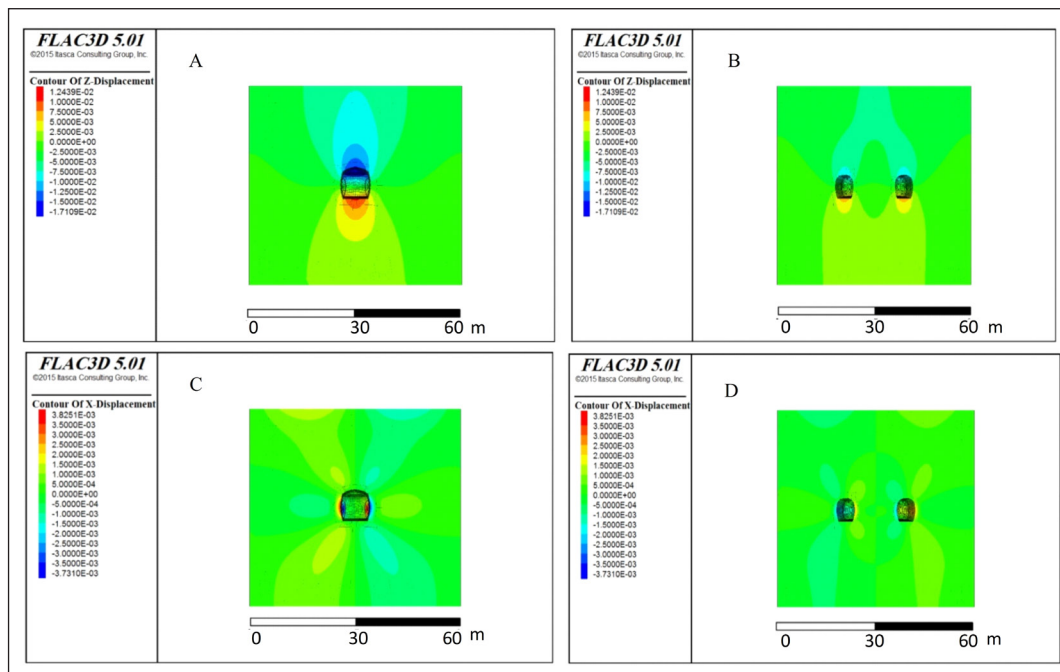
شکل ۸- A) تحلیل پروفیل تغییر شکل طولی تونل و B) منحنی واکنش زمین.

Figure 8-A) Analysis Longitudinal Deformation Profile (LDP), and B) Ground Reaction Curve (GRC).



شکل ۹- منحنی واکنش زمین و منحنی ویژگی سیستم نگهداری.

Figure 9. Ground Reaction Curve (GRC) and Support Characteristic Curve (SCC).



شکل ۱۰- بیشینه جابه‌جایی ایجادشده (برحسب متر) در شرایط بدون نگهداری در جهت: A) قائم پیش از انشعاب، B) قائم پس از انشعاب، C) جهت افقی پیش از انشعاب و D) افقی پس از انشعاب.

Figure 10. Maximum displacements (m) in unsupported conditions: A) Vertical displacement before the bifurcation, B) Vertical displacement after the bifurcation, C) Horizontal displacement before the bifurcation, and D) Horizontal displacement after the bifurcation.

جدول ۱۰- تعیین ضریب اطمینان بر اساس تلاقی منحنی‌های ویژگی زمین و سیستم نگهداری.

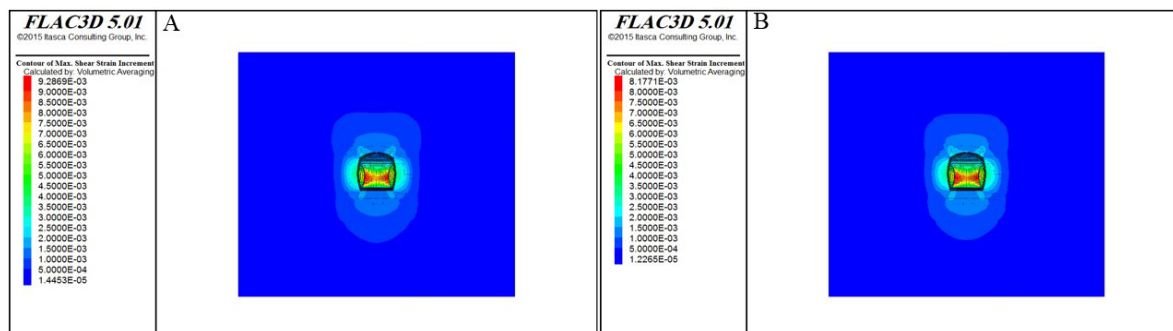
Table 10. Determination of the Safety Factor based on the Ground-Support Interaction.

Equilibrium Pressure (MPa)	Maximum Holding Pressure (Mpa)	Safety Factor
0.65	0.95	1.46

نتایج مدل‌سازی مشخص کرد که تمرکز تنش و بیشینه میزان جابه‌جایی در مرکز هندسی انشعاب رخ می‌دهد؛ نقطه‌ای که تداخل جبهه کارهای حفاری سبب بیشترین آشفتگی در میدان تنش‌های برجا می‌گردد. این روند کاهش جابه‌جایی‌ها با فاصله گرفتن از مرکز انشعاب و حرکت به سمت تونل اصلی در خروجی‌های نرم‌افزار آشکارا قابل مشاهده است. چنانچه همان‌گونه که در جدول ۱۲ مشاهده می‌شود، ضریب اطمینان در حالت بدون نگهداری برای مقاطع پیش و حین انشعاب برابر با ۱/۰۷ است. این مقدار بسیار نزدیک به مرز ناپایداری بوده و تایید می‌کند که توده سنگ در این نواحی پتانسیل بالایی برای گسیختگی دارد. حال آن‌که پس از انشعاب، به دلیل کاهش قطر تونل، ضریب اطمینان حتی در حالت بدون نگهداری (۱/۳۲) در وضعیت مناسب‌تری قرار دارد. این یافته که نتایج پژوهش فارونی نیک و فراهانی (۱۳۹۵) همخوانی دارد، ضرورت تقویت ویژه سیستم نگهداری را در محدوده دماغه انشعاب دوچندان می‌سازد و می‌تواند به بهینه‌سازی اقتصادی پروژه و کاهش سستی برای نگهداری در مقاطع دورتر از مرکز انشعاب کمک کند.

۳-۵- مقایسه کرنش بحرانی تونل با مقادیر تراز هشدار خطر ساکورایی

به‌منظور ارزیابی پایداری توده سنگ اطراف فضا‌های زیرزمینی، مقادیر کرنش‌های استخراج‌شده از مدل‌سازی عددی (شکل ۱۰) با کرنش‌های بحرانی حاصل از روابط تجربی ساکورایی مقایسه گردید. تحلیل کرنش‌ها از طریق ثبت تاریخچه جابه‌جایی در نقاط کلیدی شامل تاج، دیواره چپ و دیواره راست انجام شد. فرایند شبیه‌سازی برای حفاری تمام مقطع با گام ۲ متر، در دو سناریوی بدون سیستم نگهداری و پس از نصب سیستم نگهداری صورت گرفت (شکل ۱۱). مطابق با نتایج مندرج در جدول ۱۱، کرنش‌های القایی ناشی از حفاری در شرایط بدون نگهداری، در برخی مقاطع به کرنش بحرانی ساکورایی نزدیک شده و ضریب اطمینان (نسبت کرنش بحرانی به کرنش ایجادشده) مقادیر نزدیکی به عدد ۱ را نشان می‌دهد (جدول ۱۲). این وضعیت بیانگر آن است که اگرچه توده سنگ ممکن است در لحظات اولیه حفاری پایدار به نظر برسد، اما ایمنی آن برای پایداری درازمدت کافی نبوده و احتمال وقوع ناپایداری‌های وابسته به زمان (خزش) و ریزش‌های ساختاری بالاست. همچنین



شکل ۱۱- کرنش برشی بحرانی ایجادشده در اطراف تونل، (A) در شرایط بدون سیستم نگهداری و (B) پس از نصب سیستم نگهداری.

Figure 11. Contours of induced shear strain around the tunnel: A) unsupported condition, and B) after installation of the proposed support system.

جدول ۱۱- مقادیر کرنش برشی بحرانی بر اساس سطوح هشدار خطر ساکورایی.

Table 11. Critical shear strain thresholds based on Sakurai's hazard warning levels.

Sakurai Danger Alert Level	I	II	III
Critical shear strain	0.08	0.0034	0.0015

جدول ۱۲- مقایسه کرنش‌های ایجادشده و ضرایب اطمینان در سناریوهای مختلف نگهداری.

Table 12. Comparison of induced strains and Factors of Safety for different support scenarios.

Analysis parameter in different tunnel conditions	Tunnel leading up to the bifurcation	Tunnel at the bifurcation	Tunnel following the bifurcation
Induced strain (unsupported)	0.00275	0.00275	0.002
Induced Shear strain (unsupported)	0.004	0.004	0.00325
Induced strain (10 cm shotcrete)	0.002	0.002	0.0015
Induced shear strain (10 cm shotcrete)	0.00325	0.00325	0.00275
Induced strain (15 cm shotcrete)	0.00175	0.00175	0.0015
Induced shear strain (15 cm shotcrete)	0.003	0.003	0.0025
Factor of safety (unsupported)	1.07	1.07	1.32
Factor of safety (10 cm shotcrete)	1.32	1.32	1.56
Factor of safety (15 cm shotcrete)	1.43	1.43	1.72

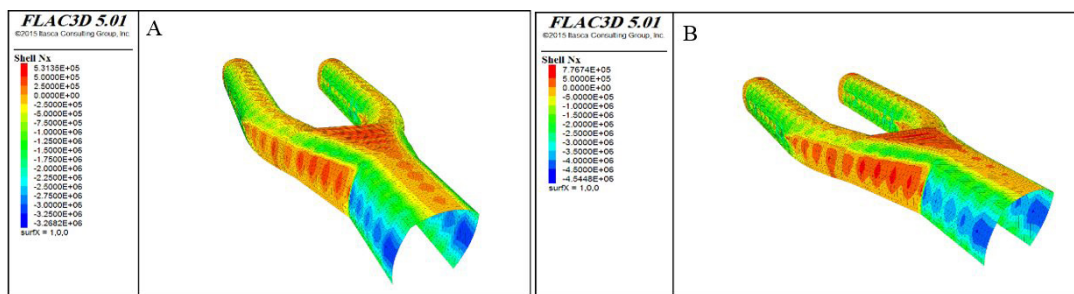
۴- بحث

۴-۱- تحلیل پایداری تونل پس از نصب سیستم نگهداری

برای بررسی نیروهای داخلی ایجادشده در شاتکریت‌های با سترای ۱۵ cm و ۱۰ cm، نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی ایجادشده در پوشش بتنی با نرم‌افزار Flac3D مدل‌سازی شده و به همراه نمودار ظرفیت رسم شد که نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در شکل‌های ۱۴ تا ۱۲ قابل مشاهده است. همچنین با فرض این که رفتار پوشش بتنی الاستیک می‌باشد، و نتایج مدل‌سازی برای شاتکریت‌های با سترای ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متر، نتایج بحرانی‌ترین شرایط بر روی نمودارهای ظرفیت با ضرایب اطمینان ۱ و ۱/۵ برحسب نیروی محوری - لنگر خمشی و نیروی محوری - نیروی برشی مطابق شکل‌های ۱۵ و ۱۶ رسم شده است.

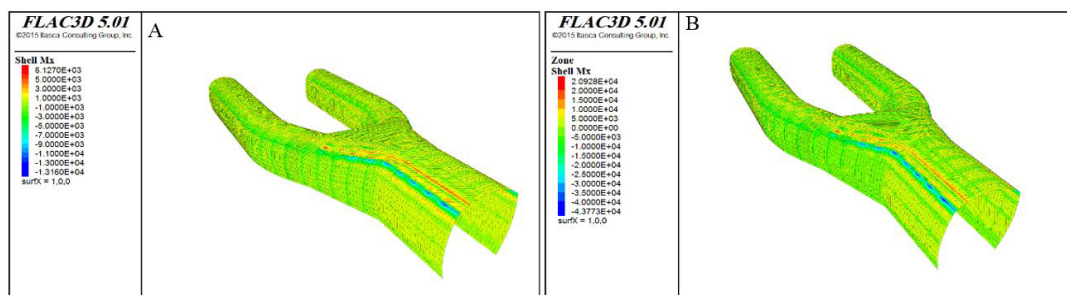
۴-۲- تحلیل نیروها و تنش‌های ایجادشده در میل مهارها

در این مرحله، عملکرد میل مهارهای تمام تزریقی با آرایش شبکه ۲×۲ متر و طول ۲ متر در محیط نرم‌افزار FLAC3D با استفاده از المان‌های ساختاری مورد ارزیابی قرار گرفت. توزیع نیروهای محوری و تنش‌های القایی در بدنه میل‌مهارها در شکل ۱۷ و همچنین بیشینه تنش ایجادشده در دوغاب تزریق‌شده در میل‌مهارها در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. بر اساس خروجی‌های مدل عددی، بیشینه نیرو و تنش وارده بر میل‌مهارها به ترتیب برابر با ۴۳/۳۳ کیلونیوتن و ۵۴ مگاپاسکال محاسبه گردید. همچنین بیشینه تنش برشی ایجادشده در دوغاب تزریق معادل ۲ مگاپاسکال حاصل شد.



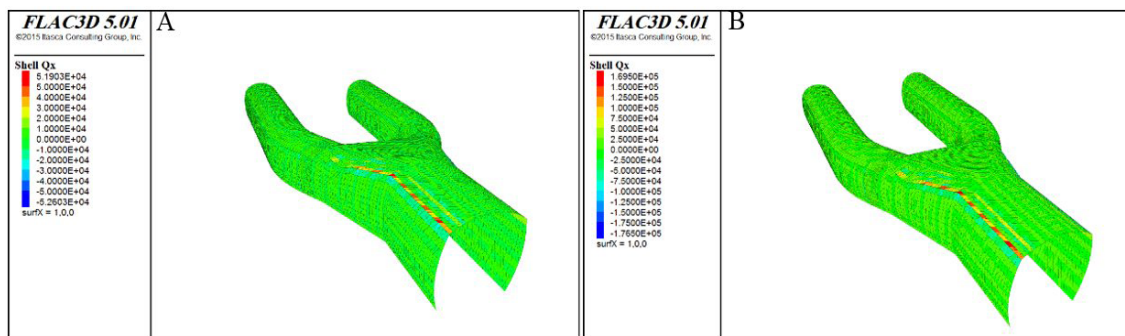
شکل ۱۲ - توزیع مقادیر نیروهای محوری (برحسب نیوتون) در المان شاتکریت با سترای (A) ۱۰ cm و (B) ۱۵ cm.

Figure 12. Axial force distribution (N) in the shotcrete lining with thicknesses of: A) 10 cm, and B) 15 cm.



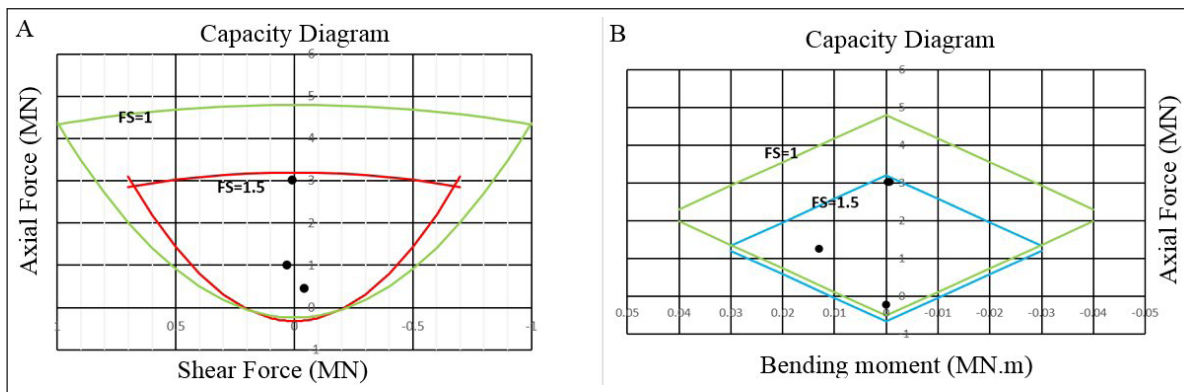
شکل ۱۳ - توزیع مقادیر لنگر خمشی (برحسب نیوتون متر) در المان شاتکریت با سترای (A) ۱۰ cm و (B) ۱۵ cm.

Figure 13. Bending moment distribution (N.m) in the shotcrete lining with thicknesses of: A) 10 cm, and B) 15 cm.



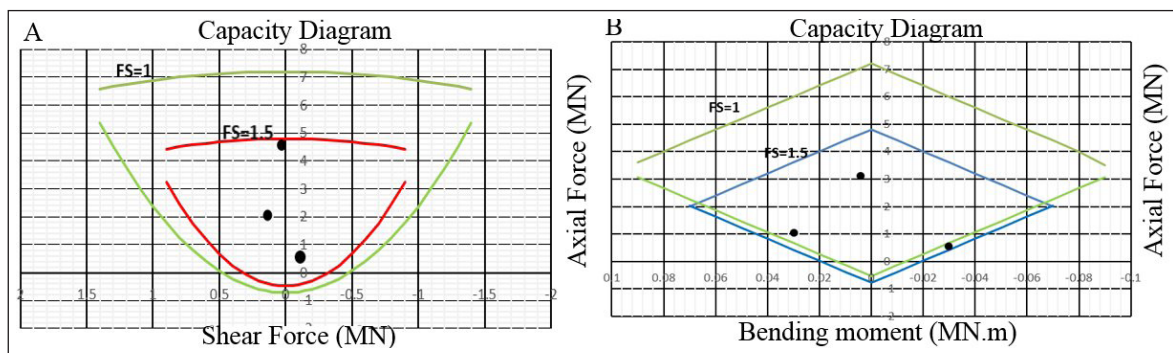
شکل ۱۴- توزیع مقادیر نیروهای برشی (برحسب نیوتون) در المان شاتکریت با ستریای (A) ۱۰ cm و (B) ۱۵ cm.

Figure 14. Shear force distribution (N) in the shotcrete lining with thicknesses of: A) 10 cm, and B) 15 cm.



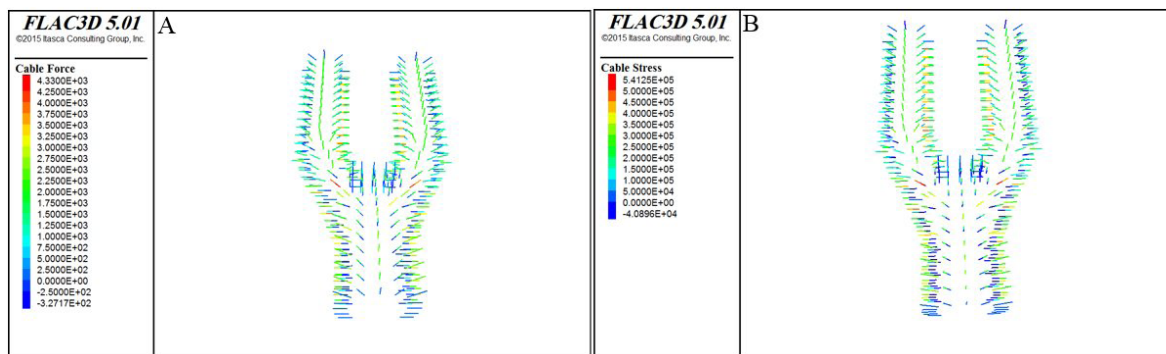
شکل ۱۵- نمودارهای ظرفیت شاتکریت (ستبرای ۱۰ سانتی‌متر): (A) اندرکنش نیروی محوری-برشی، (B) اندرکنش نیروی محوری-لنگر خمشی.

Figure 15. Shotcrete capacity diagrams (10 cm thickness): A) Axial force vs. Shear force interaction, B) Axial force vs. bending moment interaction.



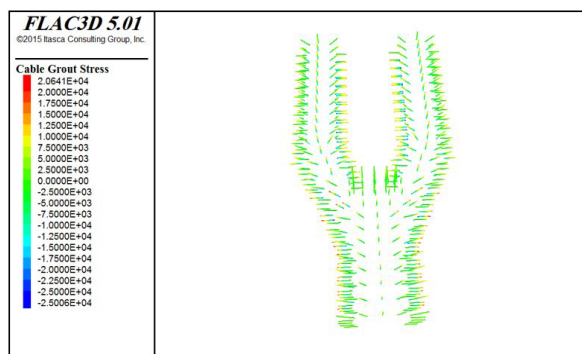
شکل ۱۶- نمودارهای ظرفیت شاتکریت (ستبرای ۱۵ سانتی‌متر): (A) اندرکنش نیروی محوری-برشی، (B) اندرکنش نیروی محوری-لنگر خمشی.

Figure 16. Shotcrete capacity diagrams (15 cm thickness): A) Axial force vs. Shear force interaction, B) Axial force vs. bending moment interaction.



شکل ۱۷- (A) بیشینه نیروی محوری ایجاد شده در میل مهارها، (B) بیشینه تنش محوری ایجاد شده در میل مهارها.

Figure 17-A) Maximum axial force induced in the anchors, B) Maximum axial stress in the anchors.



شکل ۱۸- بیشینه تنش ایجاد شده در دوغاب میل مهارها.

Figure 18. Maximum stress induced in the anchors- grout.

سازه‌ای اجزا نیز کاملاً ایمن و بهینه است. از این رو، این طرح به‌عنوان سیستم نگهداری موقت استاندارد جهت تضمین پایداری تونل در محدوده انشعاب پیشنهاد می‌گردد، که این نتایج با پژوهش بهزادی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۶) همخوانی دارد. چنانچه آن‌ها نیز سیستم نگهداری موقت شامل پیچ سنگ و شاتکریت را برای توده سنگ در محل انشعاب تونل‌های پنستاک از تونل اصلی انتقال آب پیشنهاد کردند. در مجموع، سیستم‌های نگهداری پیشنهادی با استفاده از روش‌های تجربی و عددی را می‌توان در جدول ۱۳ خلاصه کرد.

۴-۳- آنالیز حساسیت

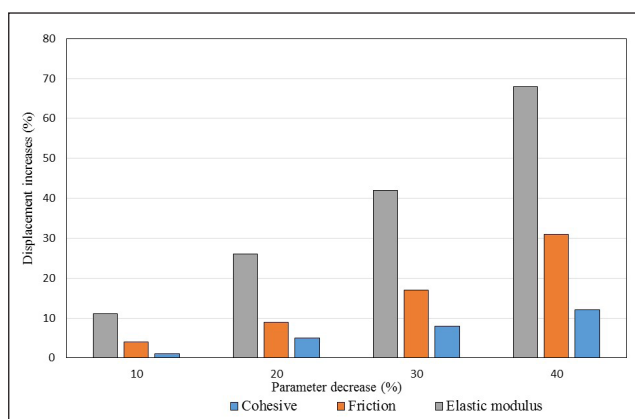
به‌منظور ارزیابی تاثیر پارامترهای مکانیکی توده سنگ بر میزان جابه‌جایی‌های حاصل از مدل‌سازی عددی، آنالیز حساسیت انجام شد. در این تحلیل، پارامترهای کلیدی معیار شکست موهر-کولمب شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول تغییر شکل‌پذیری مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌گونه که در شکل ۱۹ دیده می‌شود، نتایج نشان می‌دهند که مدول تغییر شکل‌پذیری بیشترین تاثیر را بر جابه‌جایی‌های تونل داشته (چون جابه‌جایی رابطه مستقیمی با کرنش و در نتیجه با سختی دارد) و پس از آن به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

در ادامه، جهت ارزیابی کیفیت طراحی، ظرفیت باربری مجاز فولاد و دوغاب بر اساس استانداردهای طراحی در نظر گرفته شد. با فرض تنش مجاز فولاد معادل ۶۰ درصد تنش تسلیم نهایی و تنش مجاز دوغاب معادل ۸۵ درصد مقاومت نهایی آن، مقاومت‌های طراحی برای میل‌مهار (قطر ۳۲ میلی‌متر) و دوغاب به ترتیب برابر با ۲۴۰ مگاپاسکال و ۸/۵ مگاپاسکال تعیین گردید. همچنین با مقایسه مقاومت‌های مجاز و تنش‌های وارده، ضریب اطمینان برای بخش فولادی ۲/۶۷ و برای دوغاب ۳/۶۱ محاسبه شد. این ضرایب اطمینان بالا نشان‌دهنده آن است که میل‌مهارها هنوز در فاز الاستیک هستند و فاصله زیادی تا گسیختگی دارند. زیرا وظیفه اصلی میل‌مهار در اینجا نه فقط تحمل بار، بلکه بهبود پارامترهای مقاومتی توده سنگ (مثل افزایش چسبندگی معادل) است تا از گسترش زون پلاستیک و تغییر شکل‌های سنگ پیرامون انشعاب جلوگیری کند. بنابراین بالا بودن این ضریب اطمینان در محیط‌های سنگی کلاس II و III طبیعی است و در نهایت، این نتایج تایید می‌کند که سیستم نگهداری ترکیبی شامل ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت مسلح به شبکه فولادی و میل‌مهارهای ۲ متری (درحالی‌که روش‌های تجربی فواصل نزدیک‌تری (۱ تا ۱/۵ متر) را پیشنهاد داده و این نشان‌دهنده بهینه‌سازی سیستم نگهداری در مدل‌سازی عددی است)، نه تنها از نظر کنترل جابه‌جایی‌های توده سنگ (رسیدن به ضریب اطمینان کلی ۱/۵ در سازه)، بلکه از نظر ظرفیت

جدول ۱۳- سیستم‌های نگهداری پیشنهادی با استفاده از روش‌های تجربی و عددی.

Table 13. Comparison of proposed support systems based on empirical classifications and numerical modeling.

RMR	Q	RMi	Numerical
Grid of regular rock bolts, measuring 2 meters in length and spaced 1.5 to 1 meter apart, should be installed on the crown and walls, accompanied by a metal grid on the crown. Additionally, shotcrete with a thickness of 50-100 mm should be applied to the crown and 30 mm to the walls.	Shotcrete should be 30-50 mm thick, and rock bolts should be 1.5-2.5 meters long, spaced 1-1.5 meter apart.	Shotcrete has a thickness of 60-100 mm and is reinforced with rock bolts spaced 1.5 m apart.	Shotcrete has a thickness of 100 mm and includes steel mesh reinforcement, anchored with that are 2 meters rock bolts apart and 2 meters long.



شکل ۱۹- مقایسه تاثیر پارامترهای مورد استفاده در معیار موهر - کلمب بر مقدار جابه‌جایی‌ها.

Figure 19. Comparison of the Displacement variation influenced by the parameters in the Mohr-Coulomb criterion.

و احتمال ریزش این بلوک‌ها تحت نیروی وزن است. گوه شماره ۵ با وزن ۰/۹۳ مگانیوتن، بحرانی‌ترین شرایط را از نظر پایداری داراست (چون هم وزن بالایی دارد و هم کمترین ضریب اطمینان را پس از نگهداری دارد. این نشان‌دهنده تمرکز فشار در این ناحیه است). پس از اعمال سیستم نگهداری طراحی شده، ضریب اطمینان در تمامی گوه‌ها به‌طور شایان‌توجهی افزایش یافته و به فراتر از مقادیر استاندارد (FOS > 1.5) رسیده است. کمترین ضریب اطمینان پس از نگهداری مربوط به گوه شماره ۵ (FOS=9) می‌باشد که همچنان در محدوده کاملاً ایمن قرار دارد. این جهش در مقادیر ضریب اطمینان نشان‌دهنده عملکرد عالی میل‌مهاریها و شاکریت در مهار جابه‌جایی‌های بلوکی و تثبیت ساختاری توده سنگ اطراف تونل است.

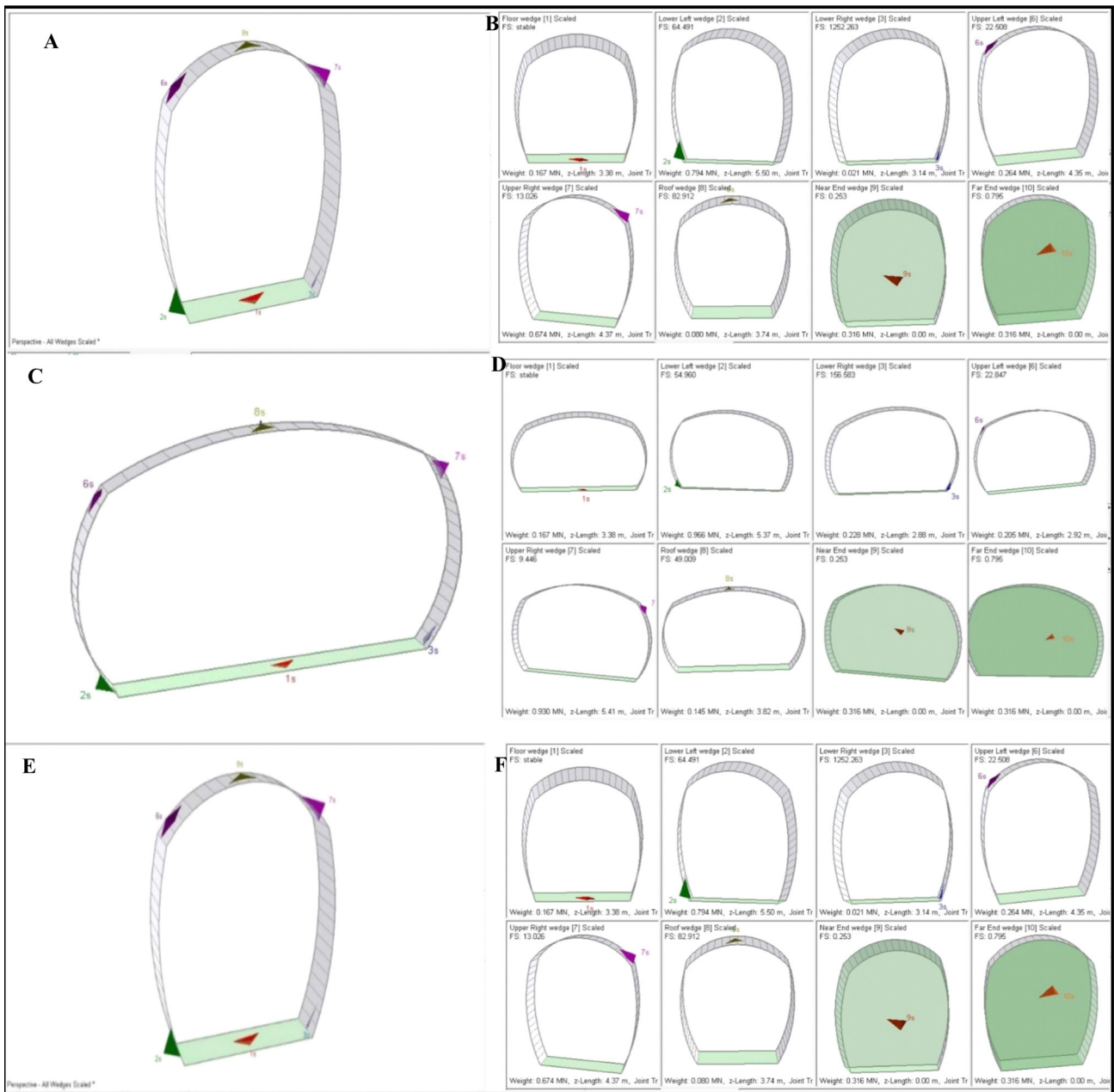
۴-۴- بررسی پایداری گوه‌های تشکیل شده در تونل

به دلیل وجود ۳ دسته ناپوستگی به همراه لایه‌بندی در مسیر تونل احتمال تشکیل گوه در تونل وجود دارد، بنابراین با توجه به تغییر مقطع تونل، تونل به ۳ بخش پیش از انشعاب، محل انشعاب و پس از انشعاب تقسیم شده و با استفاده از نرم‌افزار Unwedge تشکیل گوه‌ها مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت که اطلاعات کلی گوه‌ها و نتایج تحلیل‌های صورت گرفته به ترتیب در شکل ۲۰ و جدول ۱۴ قابل مشاهده است. بر اساس این نتایج، پیش از نصب سیستم نگهداری، گوه‌های شماره ۴، ۵ و ۶ که به ترتیب در موقعیت‌های سقف و دیواره‌های بالایی قرار دارند، دارای ضریب اطمینان کمتر از ۱ (بین ۰/۱۵ تا ۰/۶۸) می‌باشند که نشان‌دهنده ناپایداری قطعی

جدول ۱۴- نتایج تحلیل‌های صورت گرفته از نرم‌افزار Unwedge.

Table 14. Analysis Outcomes from Unwedge Software.

Wedge number	wedge position	Wedge weight (MN)	Safety factor before installing the support system	Safety factor after installing the support system
1	Floor	0.167	Stable	Stable
2	Lower left	0.966	3.5	54
3	Lower Right	0.228	2.9	156
4	Upper left	0.205	0.15	22
5	Upper right	0.930	0.32	9
6	Roof	0.145	0.68	43



شکل ۲۰- A) گوه‌های تشکیل شده در تونل پیش از انشعاب، B) ویژگی‌های عمومی گوه‌ها پس از نصب سیستم نگهداری در مقطع پیش از انشعاب، C) گوه‌های تشکیل شده در محل انشعاب، D) ویژگی‌های عمومی گوه‌ها پس از نصب سیستم نگهداری در مقطع پس از انشعاب، E) گوه‌های تشکیل شده در تونل پس از انشعاب، F) ویژگی‌های عمومی گوه‌ها پس از نصب سیستم نگهداری در مقطع پس از انشعاب.

Figure 20. A) Formed wedges in the tunnel section before bifurcation, B) General wedge information after support system installation before bifurcation, C) Formed wedges at the junction area, D) General wedge information after support system installation at the junction, E) Formed wedges in the tunnel section after bifurcation; and F) General wedge information after support system installation after bifurcation.

لهیدگی در تونل پرداخته شد. نتایج گویای آن است که در روش‌های جتوا و همکاران (Jethwa et al., 1982) تونل در رده لهیدگی ملایم، گونل و همکاران (Goel et al., 1995) در محدوده لهیدگی کم و سینگ و همکاران (Singh and Goel, 1999) تونل در رده بدون لهیدگی قرار می‌گیرد. بنابراین با توجه به پتانسیل پایین لهیدگی تونل، از استفاده از روش‌های عددی به‌منظور بررسی این پدیده صرف‌نظر گردید.

۴-۵- بررسی پتانسیل لهیدگی

با توجه به ژرفای زیاد تونل (نزدیک ۵۰۰ متر) و از آنجاکه پیش از اتصال تونل‌های آبراهه به نیروگاه، هر تونل به دو تونل با قطر کوچک‌تر منشعب می‌شود و همچنین فعالیت زمین‌شناسی منطقه از نظر زمین‌ساختی، به‌گونه‌ای که به تشکیل درزه و ناپیوستگی در واحدهای آهکی سازند دالان در محدوده پژوهش انجامیده، بنابراین با بهره‌گیری از روش تجربی و نیمه تجربی به بررسی

۵- نتیجه‌گیری

ضریب اطمینان به کمترین مقدار خود (۰/۱۵) می‌رسد که نشان‌دهنده ناپایداری قطعی تحت نیروی وزن است. بر اساس منحنی تغییر شکل طولی (LDP) و نتایج مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود، گام حفاری بهینه ۲ متر به صورت تمام مقطع تعیین شد. تحلیل منحنی واکنش زمین (GRC) نیز گویای این مطلب بود که جابه‌جایی توده سنگ رفتار الاستو-پلاستیک داشته و سهم عمده آن (حدود ۸۰ درصد) در محدوده الاستیک رخ می‌دهد. جهت جلوگیری از هرگونه محافظه‌کاری در تحلیل، تراز هشدار خطر II طبق معیار ساکورایی مبنای قضاوت قرار گرفت. در این راستا، ضریب اطمینان تونل در حالت بدون نگهداری نزدیک به ۱ (۱/۰۷) محاسبه شد که پایداری مرزی را نشان می‌دهد. با اعمال سیستم نگهداری طراحی شده (شاتکریت مسلح ۱۰ سانتی متری و میل‌مهارهای تمام تزریقی)، ضریب اطمینان گوه‌ها به بیش از ۹ و ضریب اطمینان کل سیستم به بیش از ۱/۵ ارتقا یافت که پایداری ایمن سازه را تضمین می‌کند. در نهایت، مقایسه روش‌های مختلف نشان داد که سیستم نگهداری پیشنهادی بر اساس طبقه‌بندی RMR، تطابق بسیار بالایی با نتایج مدل‌سازی عددی دارد. همچنین، نتایج آنالیز حساسیت مشخص کرد که پارامترهای مدول الاستیسیته و تنش‌های برجا حاکم‌ترین عوامل بر میزان جابه‌جایی‌های تونل هستند؛ در حالی که پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک در رتبه‌های بعدی اهمیت قرار دارند.

سپاسگزاری

از آنجاکه این پژوهش بخشی از دستاوردهای پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده اول می‌باشد، بنابراین در پایان از دانشگاه تربیت مدرس و شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس که امکان انجام این پژوهش را فراهم آورده و ما را در انجام آن یاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

انتقال انرژی از ساعت‌های کم‌مصرف به ساعت‌های پرمصرف با استفاده از نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای با تلمبه کردن آب از یک مخزن پایین دست به مخزن بالادست انجام می‌شود که در نتیجه آن مازاد نیروی برق تولیدی و غیرقابل مصرف شبکه در ساعات غیر پیک به انرژی پتانسیل تبدیل می‌گردد و در ساعتی که نیاز به مصرف بیش از ظرفیت تولید می‌باشد آب ذخیره‌شده در مخزن بالادست توربین نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای را مانند نیروگاه‌های برق‌آبی معمولی به گردش درآورده و تولید برق می‌نماید و با این کار در حقیقت آب ذخیره‌شده از حالت انرژی پتانسیل به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد. با توجه به این که انتقال آب بین مخازن تعبیه‌شده به کمک تونل‌های آب بر صورت می‌گیرد، از این رو، مطالعه این سازه‌ها از جهت زمین‌شناسی مهندسی و تحلیل پایداری آن‌ها از الزامات اجرای این گونه سازه‌های مهندسی به شمار می‌آید. بنابراین، در این پژوهش، پایداری ساختاری و ژئومکانیکی محل انشعاب تونل‌های آبراهه پایین نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار با ترکیب روش‌های تجربی، کنترل ساختاری (تحلیل بلوکی) و مدل‌سازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. چنانچه با بررسی ویژگی‌های ساختاری منطقه، ۳ دسته ناپیوستگی اصلی شناسایی شد که به دلیل تقاطع آن‌ها با محور تونل، توده سنگ در ردیف محیط‌های شبه‌پیوسته طبقه‌بندی گردید. تحلیل‌های ساختاری نشان داد که آرایش این ناپیوستگی‌ها به گونه‌ای است که ۲ دسته از آن‌ها تقریباً بر محور تونل عمود بوده و شرایط به نسبت مساعدی را از نظر پایداری کلی فراهم می‌کنند. تحلیل پایداری گوه‌ها با نرم‌افزار Unwedge نشان داد که در شرایط بدون نگهداری، گوه‌های مستقر در سقف و دیواره‌های بالایی در مقاطع پیش از انشعاب، محل انشعاب و پس‌از آن، دارای ضریب اطمینان بحرانی (کمتر از ۱) هستند. به‌ویژه در محل انشعاب به دلیل افزایش دهانه حفاری، وزن گوه‌های پتانسیل افزایش یافته و

کتابنگاری

- ابره، ب.، فرامرزی، ل. و قارونی‌نیک، م.، ۱۳۹۱، تعیین پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی توده‌سنگ مسیر تونل‌های پستاک سد رودبار لرستان. مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد ۵، شماره ۳ و ۴، ص ۶۶-۴۹. http://www.jiaeg.ir/article_62340.html
- احمدی، ع.، نیک‌خواه، م.، جلالی، س. ا. و عیدی‌وندی، ا.، ۱۴۰۱، ارزیابی عددی روش‌های تحکیم و بهسازی در تونل البرز. نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد ۱۵، شماره ۴، ص ۱۷-۱۰. https://www.jiaeg.ir/article_171052.html
- اصلانی، م. و موحد، م.، ۱۳۸۲، اثرات احداث نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای در بهبود عملکرد سیستم تولید برق کشور. کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور، تهران. وزارت نیرو، تهران. <https://civilica.com>
- اورعی، ک.، ۱۳۹۰، مباحث پیشرفته فنی و اقتصادی نگهداری در معادن، انتشارات جهاد دانشگاهی، ۴۸۲ ص.
- بهزادی‌نژاد، ح.، فرامرزی، ل.، داربر، م.، ۱۳۹۶، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت محل انشعاب تونل‌های پستاک از تونل انتقال آب سد رودبار لرستان با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D. نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، دوره ۷، شماره ۱۳، ص ۱۲۳-۱۱۳. <https://dx.doi.org/10.29252/annm.7.13.113>
- تلخابلو، م.، فاطمی‌عقدا، س. م. و معتمدی، م.، ۱۳۹۴، بررسی تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئومکانیکی بر گام پیشروی مجاز تونل. نشریه زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد هشتم، شماره ۳ و ۴، ص ۶۴-۴۷. <https://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jeg.8.3.47>
- جمالی‌زاده، ح.، فاطمی‌عقدا، م.، تلخابلو، م. و مختاری، ا.، ۱۴۰۰، بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی توده سنگ میزبان تونل قطعه سوم آزادراه ارومیه - تبریز و پیشنهاد سیستم نگه‌دارنده بر اساس روش‌های تجربی و عددی. نشریه پژوهش‌های دانش زمین، سال ۱۲، شماره ۴۸، ص ۱۴۶-۱۲۳. <https://doi.org/10.48308/esrj.2022.101464>
- خداپرست‌مشهدی، م. و قزلباش، ا.، ۱۳۹۵، ارزیابی اقتصادی احداث نیروگاه برق‌آبی (تلمبه‌ذخیره‌ای) در سدهای مخزنی کشور، مطالعه موردی: سد نیروگاه پیرتقی. فصلنامه علمی-پژوهشی مطالعات اقتصادی کاربردی ایران، سال پنجم، شماره ۱۷، ص ۲۴۴-۱۹۹. <https://dx.doi.org/10.22084/AES.2016.1481>
- رحمان‌نژاد، ر.، ۱۳۹۱، کاربرد فضاهای زیرزمینی، انتشارات جهاد دانشگاهی، ۴۵۹ ص.

شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۹۳، گزارش نهایی مطالعات و طراحی‌های مکانیک سنگ سد و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان، ۱۰۷ ص. صبور، س.، جواد اصطهباناتی، م. و زارع، ش.، ۱۴۰۳، مدل‌سازی عددی سه‌بعدی سامانه پیش‌نگهداری در جلوی سینه کار تونل با رویکردهای مختلف، مطالعه موردی. نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، دوره ۱۴، شماره ۳۸، ص ۲۱-۳۳. <https://dx.doi.org/10.22034/ANM.2023.19799.1601>.

علیزاده کاکلر، س. و دولتی ارده جانی، ف.، ۱۳۹۷، بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر مدل‌سازی تغییرات هدایت هیدرولیکی در محیط شکسته با استفاده از روش المان مجزا. نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۱۳، شماره ۱۴، ص ۲۷-۴۴. <https://dx.doi.org/10.22034/ijme.2018.34836>.

قارونی نیک، م. و فرمینی فراهانی، ع.، ۱۳۹۵، بررسی پایداری تونل‌ها در تقاطعات Y شکل با توجه به زاویه برخورد آن‌ها، مطالعه موردی: تونل پنستاک سد رودبار لرستان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی عمران و محیط‌زیست امیرکبیر، دوره ۴۸، شماره ۲، ص ۱۹۷-۱۹۱. <https://dx.doi.org/10.22060/ceej.2016.655>.

کمالی‌بندی، ع.، شهریار، ک.، شریف‌زاده، م. و معارف‌وند، پ.، ۱۳۹۵، بررسی خصوصیات ناپوستگی‌ها به منظور تولید مدل شبکه گسسته شکستگی - مطالعه موردی: مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان. نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق‌آبی، سال ۳، شماره ۹، ص ۳۷-۵۴. <https://dx.dor.org/20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.1>.

مدنی، ح.، ۱۳۹۳، تونل‌سازی، طراحی و اجرای سیستم‌های نگهداری، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۶۲۴ ص.

معینی‌رودبالی، ه.، کتیبه، ه. و گلاتونچی، ا.، ۱۳۹۰، تحلیل نشت مخزن ذخیره آب نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای سد آزاد و گزینش روش بهینه آب‌بندی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴۳، شماره ۲، ص ۳۵-۴۱. <https://dx.doi.org/10.22060/ceej.2012.138>.

موسوی کانی، س. ج.، ۱۴۰۳، مروری بر نقش نیروگاه‌های تلمبه‌ذخیره‌ای در بهره‌برداری سیستم قدرت و بازارهای برق (مطالعه موردی: نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌پیشه). نشریه سد و نیروگاه‌های برق‌آبی ایران، سال ۱۱، شماره ۳۷، ص ۸۷-۹۷. <https://dx.dor.org/20.1001.1.23225882.1403.11.37.8.4>.

References

- Abrah, B., Faramarzi, L., and Gharouni Nik, M., 2013. Determination of geological and geotechnical parameters of rock mass along penstock tunnels of Rudbar-Lorestan dam. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 5: 3 and 4, 49-66 (In Persian), http://www.jiaeg.ir/article_62340.html.
- Ahmadi, A., Nikkhab, M., Jalali, S.E., and Eidivandi, E., 2023. Numerical Assessment of Support and Reinforcing Techniques of Alborz Tunnel. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 15(4), 1-17 (In Persian), https://www.jiaeg.ir/article_171052.html.
- Alizadeh kaklar, S., and Doulati Ardeh jani, F., 2018. Investigation of the affecting parameters to the level of hydraulic conductivity changes in the fractured rock mass by using the finite difference method. *Journal of Mining Engineering*, 13(41), 27-44 (In Persian), doi:10.22034/ijme.2018.34836.
- Aslani, M., and Movahed, M., 2003. The impact of building pumped storage power plants on enhancing the efficiency of the national electricity grid, 1st National Conference on Hydropower (In Persian), <https://civilica.com>.
- Barczak, T.M., 2017. Research developments that contributed to the landscape of longwall roof support design over the past 25 years. In: Syd S. Peng (Ed.), *Advances in coal mine ground control*, Woodhead Publishing, doi:10.1016/B978-0-08-101225-3.00001-3.
- Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6 (4), 189-236, doi: 10.1007/BF01239496.
- Barton, N., Loset, F., Lien, R., and Lunde, J., 1980. Application of Q-system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations. In ISRM International Symposium-Rockstore 80. International Society for Rock Mechanics, doi:10.1016/B978-1-4832-8421-7.50080-6.
- Behzadinejad, H., Faramarzi, L., and Darbor, M., 2017. Stability Analysis and Support System Design of Penstock Tunnels Bifurcation with Headrace Tunnel of Rudbare-Lorestan Dam Project. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 7(13), 113-123 (In Persian), <https://dx.doi.org/10.29252/anm.7.13.113>.
- Bieniawski, Z.T., 1976. Engineering classification in rock engineering. In: *Proceeding of the symposium on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg, 97-106. South Africa. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema, <https://scholar.google.com>.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*, John Wiley and Sons. New York, 251 p. <https://books.google.com>.
- Carranza-Torres, C., and Diederichs, M., 2009. Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24(5), 506-532, doi:10.1016/j.tust.2009.02.001.
- Carranza-Torres, C., and Fairhurst, C., 2000. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy

- the Hoek-Brown failure criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology* 15(2), 187-213, doi: 10.1016/S0886-7798 (00)00046-8.
- Chen, D., Wang, L., Shen, C., Jiang, C., and Zhang, L., 2022. Investigation of the support constraint effect and failure instability law of tunnels constructed using the New Austrian tunneling method. *Scientific Reports*, 12(1), 5811, doi: 10.1038/s41598-022-09826-1.
- Chortis, F., and Kavvadas, M., 2021. Three-dimensional numerical analyses of perpendicular tunnel intersections. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 1771-1793, doi: 10.1007/s10706-020-01587-w.
- Gharouni Nik, M., and Farmahini Farahani, A., 2016. *Assessment the Stability of Tunnels in Y Shaped Intersections with Regard to the Intersection Angles, Case Study: Penstock Tunnels of Rudbar Dam. Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 48(2), 191-198 (In Persian), doi.:10.22060/ceej.2016.655.
- Goel, R.K., Jethwa, J.L., and Paithankar, A.G., 1995. Indian experiences with Q and RMR systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 10(1), 97-109, doi: 10.1016/0886- 7798 (94)00069-W.
- Hoek, E., and Brown, E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34 (8), 1165-1186, doi: 10.1016/S1365-1609 (97)80069-X.
- Hsiao, F.Y., Wang, C.L., Chern, J.C., 2009. Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(1), 14-21, doi:10.1016/j.tust.2008.01.003.
- Itasca Consulting Group, 2009, *Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*, Version 4.0. Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group 438. <https://www.itascacg.com>.
- Jamalizadeh, H., Fatemi Aghda, M., Talkhablou, M., and Mokhtari, E., 2022. *Investigation of the engineering geological properties of host rock masses in section third of Urmia - Tabriz freeway tunnel and suggested support system based on empirical and numerical methods. Researches in Earth Sciences*, 12(4), 123-146 (In Persian), doi: 10.48308/esrj.2022.101464.
- Jethwa, J.L., Dube, A.K., Singh, B., Bhawani, S., and Mithal, R.S., 1982. Evaluation of methods for tunnel support design in squeezing rock conditions. *Proceedings of the 4th International Congress of the International Association of Engineering geology*. Vol. 5, New Delhi, India, 121-134. <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/1icchge/1icchge-theme7/7>.
- Ji, Z., Li, J., Zhang, X., and Song, Z., 2023. A quantitative assessment method for the correlation between rock mass basic quality and Protodyakonov coefficient. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1249866, doi:10.3389/feart.2023.1249866.
- Kamali Bandpey, A., Shahriyar, K., Sharif Zadeh, M., and Maaref Vand, P., 2016. *Statistical Investigation of Discontinuity Properties to Generate Discrete Fractured Network - Case study: Cavern of Rodbar Lorestan Pumped Storage Power Plant. Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant*, 3 (9):36-54(In Persian), dor: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.4.1.
- Katsaprakakis, D.A., Christakis, D.G., Stefanakis, I., Spanos, P., and Stefanakis, N., 2013. Technical details regarding the design, the construction and the operation of seawater pumped storage systems. *Energy*, 55, 619-630, doi:10.1016/j.energy.2013.01.031.
- Keyter, G.J., Ridgway, M., Varley, P.M., and Venture, B.C.J., 2008. Rock engineering aspects of the Ingula powerhouse caverns. In 6th International Symposium on Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction, Southern African Institute of Mining and Metallurgy (P. 409-445), <https://www.researchgate.net>.
- Khodaparast mashhadi, M. and ghezelbash, A., 2016. *Economic assessment of the construction of hydroelectric power plant (pumped-storage) in Iranian reservoir dams: case study of Pirtaghi damandpower plant. Journal of Applied Economics Studies in Iran*, 5(17), 199-224 (In Persian), doi:10.22084/AES.2016.1481.
- Kulpa, J., Kopacz, M., Stecula, K., and Olczak, P., 2024. Pumped Storage Hydropower as a Part of Energy Storage Systems in Poland—Młoty Case Study. *Energies*, 17(8), 1830, doi: 10.3390/en17081830.
- Li, G., and Han, Z., 2004. Principal engineering geological problems in the Shisanling pumped storage power station, China. *Engineering geology*, 76(1-2), 165-176, doi:10.1016/j.enggeo.2004.06.013.
- Li, G., He, M., and Tao, Z., 2010. Deformation mechanism and excavation process of large span intersection within deep soft rock roadway. *Mining Science and Technology (China)*, 20(1), 28-34, doi: 10.1016/S1674-5264(09)60156-3.
- Li, S., Yanxiang, C., Linhua, H., and Enping, G., 2022, Study on response and influencing factors of shield single/twin tunnel under seismic loading using FLAC 3D, *Shock and Vibration*. 1 (2022), 2224198, doi:10.1155/2022/2224198.
- Li, Y., Lei, X., Wang, N., Ren, Y., Xia, X., Jin, X., and Li, T., 2024a. Stability analysis of pumped storage hydropower plant in abandoned open-pit mine affected by dynamic surface subsidence of combined mining. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(13), 19516-

- 19542, doi: 10.1007/s11356-024-32352-8.
- Li, Z., Xiao, J., Wan, J., Cheng, J., Feng, H., Zhan, H., and Huang, K., 2024b. A dynamic modeling approach to predict water inflow during tunnel excavation in relatively uniform rock masses. *Tunneling and Underground Space Technology*, 146, 105668, doi:10.1016/j.tust.2024.105668.
- Liu, H.Y., Small, J.C., and Carter, J.P., 2008. Effects of tunneling on existing support systems of intersecting tunnels in the Sydney region. In *SHIRMS 2008: Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium* (P. 113-126). Australian Centre for Geomechanics, doi:10.36487/ACG_repo/808_150.
- Liu, H.Y., Small, J.C., Carter, J.P., and Williams, D.J., 2009. Effects of tunneling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 880-894, doi:10.1016/j.compgeo.2009.01.013.
- Madani, H., 2014. *Tunneling, Design and Implementation of Maintenance Systems*, Amirkabir University of Technology Publications, Tehran, 624 pp (In Persian).
- Mahab Ghods consulting engineering co, 2014. *final report on studies and designs of rock mechanics of the rudbar dam and lorestan pumped storage power plant*, 107 p (In Persian).
- Moeini Roudbali, H., Katibeh, H. and Golaabatoonch, I., 2012. *Upper Reservoir Seepage Analysis of Azad Dam Pumped Storage Power Station and Selecting the Best Sealing Method*. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 43(2), 35-41 (In Persian), doi: 10.22060/ceej.2012.138.
- Morabito, A., Spriet, J., Vagnoni, E., and Hendrick, P., 2020. Underground pumped storage hydropower case studies in Belgium: perspectives and challenges. *Energies*, 13(15), 4000, doi: 10.3390/en13154000.
- Mousavi Kani, J., 2024. *An overview of the role of hydroelectricity Pumped-storage in the operation of the power system and electricity markets (Case study: siah bisheh PSH)*. *Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant*. 11 (37), 86-97 (In Persian), dor: 20.1001.1.23225882.1403.11.37.8.4.
- Orei, K., 2011, *Mine Maintenance: Advanced Technical and Economic Considerations*, Jahad Daneshgahi Publications, 482 pages (In Persian).
- Palmstrom, A., 1995. RMi – A rock mass characterization system for rock engineering purposes. Ph.D thesis, University of Oslo, Norway, 400 P. <https://www.uio.no>.
- Pitorac, L., Vereide, K., and Lia, L., 2020. Technical Review of Existing Norwegian Pumped Storage Plants. *Energies*, 13(18), 4918, doi: 10.3390/en13184918.
- Protodyakonov, M.M., and Koifman, M.I., 1964. Uber den Masstabeffect bd Untersuchung yon Gestein und Kohle. 5. Landertreffen des Internationalen Buros fflr Gebi~gsmechanik, Deutsche Akademie der Wissenschaften, Berlin, 3, 97-108. <https://scholar.google.com>.
- Rahman Nejad, R., 2012, *Application of Underground Spaces*, Jahad Daneshgahi Publications, 459 p (In Persian).
- Sabour, S., Javadi, M. and Zare, S., 2024. *Three-Dimensional Numerical Modelling of Pre-Support System in front of Tunnel by Different Approaches, Case Study*. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 14(38), 21-33 (In Persian), doi: 10.22034/ANM.2023.19799.1601.
- Sakurai, S., 1981. Direct strain evaluation technique in construction of underground opening. In: *Proceedings of the 22nd US Symposium on Rock Mechanics*, Cambridge, Massachusetts (P. 278-282). American Rock Mechanics Association, <https://scholar.google.com>.
- Sakurai, S., 1993. Back analysis in rock engineering. *Comprehensive Rock Engineering-Excavation, Support and Monitoring*. Pergamon Press, Oxford, 4, 543-569, doi:10.1016/B978-0-08-040615-2.50156-5.
- Sakurai, S., 1999. Interpretation of field measurements in tunneling practice. In *Proceedings of the 9th ISRM Congress*, International Society for Rock Mechanics, Beijing, China.
- Singh, B., and Goel, R.K. 1999. *Rock mass classification: a practical approach in civil engineering*, Vol. 46, Elsevier Science, Amsterdam, 282 p. ISBN: 9780444502605.
- Sun, X.M., Qi, Z.M., Zhang, Y., Miao, C.Y., Zhao, C.W., and He, M.C., 2023. Failure mechanism and control countermeasures of surrounding rock at deep large section chamber intersection in the Wanfu Coal Mine. *Journal of Mountain Science*, 20(7), 2058-2075, doi: 10.1007/s11629-023-8004-y.
- Talkhablou, M., Fatemi Aghda, S. M. and Motamedi, M., 2016. *Evaluation of engineering geology and geomechanic parameters on admissible advancement step in tunnel*. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 8(3 and 4), 47-64 (In Persian), doi:10.18869/acadpub.jeg.8.3.47.

- Tan, Z., Zhou, Z., Kong, H., Zhao, B., and Zhao, J., 2021. Single excavation face method for super-large-span bifurcated tunnels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 174(4), 406-418, doi: 10.1680/jgeen.20.00222.
- Yang, C.J., and Jackson, R.B., 2011. Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 839-844, doi:10.1016/j.rser.2010.09.020.
- Zhang, S., Ran, C., Qu, H., Wu, Z., Zheng, D., and Pan, Z., 2024. Stability and engineering impact analysis of high level glacier valley deposits at the KAWABAIQING pumped storage power station in southeast Tibet. *Journal of Engineering Geology*, 32(3): 1112-1128, doi:10.13544/j.cnki.jeg.2024-0017.