



Geomechanical parameters assessment of rock mass at the dam site (case study: Haraz reservoir dam – Amol)

Heydar Davoudian, Mojtaba Farhadzadeh, Ghasem Eslami, Maliheh Akbari, Parisa Maleki*

Mazandaran Regional Water Company, Water Resources Management Company, Ministry of Energy, Iran

Corresponding Author email: P.Maleki1368@gmail.com

© The Author (s) 2026

Received: 20 Oct 2025

Revised: 01 Dec 2025

Accepted: 26 Dec 2025

Published: 07 Jan 2026

Extended Abstract

Introduction

The design and construction of major engineering structures, such as reservoir dams, requires a comprehensive understanding of the geomechanical characteristics of the in-situ rock mass. The Haraz Dam site is located in Mazandaran Province, approximately 25 kilometers south of Amol city, on the main branch of the Haraz River. The dam is an earth-fill structure with a clay core, with a height of 125 meters and a reservoir capacity of 230 million cubic meters at the normal water level. This study aims to assess rock mass quality using established engineering classification systems and to estimate relevant geomechanical parameters to facilitate slope stability analysis and ensure the safe design of the Haraz Dam.

Materials and Methods

Engineering geological data were collected through field surveys and the drilling of 14 exploratory boreholes. To determine the geomechanical parameters of the rock mass, a series of laboratory tests—including Uniaxial Compressive Strength (UCS) and Triaxial Compression tests—were conducted on core samples in accordance with the recommendations of the International Society for Rock Mechanics (ISRM) and the standards ASTM D2938-95 (2002) and ASTM D2664-04. Rock mass classification was performed using both the Rock Mass Rating (RMR) and Geological Strength Index (GSI) systems.

From a geological perspective, the study area is located within the central Alborz zone. The dominant lithological unit at the dam site is the Elika Formation, consisting of limestone, marly limestone, dolomite, and shale. Two major faults, Chelav and Kelerd, have been identified in the area. The Chelav thrust fault, trending northwest-southeast, is located in the reservoir's head area. The Kelerd Fault is situated approximately 2 km to the north.

In the dam's right abutment, four discontinuities are present: bedding and three joint sets—J1 (dip/dip direction: 46/238), J2 (82/094), J3 (41/139), and bedding (68/005). The left abutment features three discontinuities: bedding and two joint sets—J1 (61/236), J2 (63/102), and bedding (65/357). The persistence of these joints ranges from very low (<1 m) to low (1–3 m), and occasionally medium (3–10 m), while spacing is generally close (6–20 cm) to medium (20–60 cm). The joints are predominantly closed to slightly open.

Results and Discussion

To evaluate mechanical behavior, Uniaxial Compressive Strength (UCS), Elastic Modulus, and Poisson's Ratio were measured on samples from various boreholes under both dry and saturated conditions. The results consistently showed lower UCS values under saturation across all rock units, confirming the weakening effect of water. The lowest average UCS was observed in the Pn unit (9 MPa under saturation), with a high coefficient of variation (0.87), indicating significant heterogeneity within this sandy limestone-shale-siltstone unit. In contrast, the T1-DL4 unit exhibited a relatively high average elastic modulus under saturation, suggesting favorable mechanical quality. The highest Poisson's ratio was recorded in the Pn unit, likely due to its higher plasticity or deformability.

Triaxial tests under saturated conditions were conducted on selected samples to estimate shear strength parameters and constants for the Hoek-Brown failure criterion. The T1-SL unit demonstrated excellent mechanical performance under various confining pressures, with some samples exceeding 117 MPa in UCS. The triaxial results confirmed the dependency of rock strength on confining pressure and highlighted that, while most units exhibit good intact strength, discontinuities and bedding planes significantly reduce the rock mass strength locally. The m_i constant for the Hoek-Brown criterion was calculated for each lithological unit based on UCS and triaxial test data to ensure reliable design parameters. Engineering classification yielded GSI values ranging from 35 ± 5 to 52 ± 5 , based on lithology, structure, and joint surface conditions. The Pn unit was rated the poorest, while T1-DL4 showed the highest rock mass quality. RMR values for all studied units ranged between 30 and 47, classifying the rock mass as "Poor" to "Fair" according to Bieniawski's system. The lowest RMR (30) was assigned to the Pn unit, reflecting the weakest conditions, while the highest (47) was for the T1-DL4 unit, representing the best relative quality at the site. Based on the classification and laboratory results, the shear strength parameters of the dam foundation rock masses were estimated using the Hoek-Brown method. The highest cohesion and internal friction angle were observed in the T1-SL unit, indicating superior shear strength and stability potential within the dam foundation.

Conclusion

The results demonstrate that water saturation considerably reduces the mechanical strength of the rock, particularly in the Pn unit. Triaxial tests revealed a clear confining pressure-dependent increase in shear strength, with the T1-SL unit exhibiting the highest and the Pn unit the lowest strength. The estimation of Hoek-Brown parameters and classification via the RMR and GSI systems indicate that most foundation rock units fall within the "Poor" to "Fair" categories, which is consistent with other structural and geomechanical assessments.

Keywords: Geomechanical parameters, Haraz reservoir dam, Rock mass classification, RMR, GSI

Conflicts of Interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this article.

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Author Contribution

All authors: Writing, Methodology, Investigation and Data Curation, Analysis, Guidance and Supervision, Text Editing, Completion and Data Collection.

Citation: Davoudian, H., Farhadzadeh, M., Eslami, Gh., Akbari, M., & Maleki, P. (2025). Geomechanical parameters assessment of rock mass at the dam site (case study: Haraz reservoir dam – Amol), *Technical Strategies in Water Systems*, 3(3), 267-284. <https://doi.org/10.82185/tsws.2025.1221840>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



بررسی پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ در ساختگاه سد (مطالعه موردی: سد مخزنی هراز - آمل)

حیدر داودیان، مجتبی فرهادزاده، قاسم اسلامی، ملیحه اکبری، پریسا ملکی*

شرکت آب منطقه‌ای مازندران، شرکت مدیریت منابع آب، وزارت نیرو، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: P.Maleki1368@gmail.com

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

چکیده

شناسایی و ارزیابی ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ‌ها، یکی از مراحل کلیدی در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و طراحی سازه‌های عمرانی بزرگ مانند سد‌ها است. این پژوهش با هدف طبقه‌بندی مهندسی و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ در ساختگاه سد مخزنی هراز، واقع در جنوب شهرستان آمل، انجام شد. به این منظور، مجموعه‌ای از مطالعات میدانی و آزمایشگاهی شامل بررسی ساختار زمین‌شناسی، لیتولوژی، ناپیوستگی‌ها، کیفیت توده‌سنگ و آزمایش‌های مکانیکی نظیر مقاومت فشاری تک‌محوره و سه‌محوری بر روی نمونه‌های سنگی انجام گرفت. ساختگاه مورد مطالعه در پهنه ساختاری البرز مرکزی واقع شده و عمدتاً از واحدهای آهک، آهک مارنی، دولومیت و شیل مربوط به سازند الیکا تشکیل شده است. با استفاده از داده‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی، مشاهدات صحرایی و آزمایش‌های مکانیکی (مانند مقاومت فشاری تک‌محوره و سه‌محوری)، شاخص‌های GSI و RMR محاسبه و طبقه‌بندی توده‌سنگ‌ها انجام شد. همچنین با بهره‌گیری از معیار هوک-براون، پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ در نواحی مختلف پی سد برآورد گردید. نتایج نشان می‌دهد که اشباع‌شدگی تأثیر چشمگیری بر کاهش مقاومت مکانیکی سنگ‌ها دارد. به‌ویژه در واحد سنگی Pn که کمترین مقاومت را نشان داده است. در مقابل، نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بیانگر افزایش محسوس مقاومت برشی با افزایش فشار محصورکننده بوده و واحد-T1 SL بیشترین مقاومت را از خود نشان داده است. به‌طور کلی، ارزیابی‌های انجام‌شده بیانگر آن است که توده‌سنگ‌های محدوده ساختگاه سد در رده ضعیف تا متوسط قرار می‌گیرند و از دیدگاه ژئومکانیکی برای احداث سد خاکی مناسب ارزیابی می‌شوند.

واژگان کلیدی: پارامترهای ژئومکانیکی، سد مخزنی هراز، طبقه‌بندی توده سنگ، RMR، GSI

استناد: داودیان، ح.، فرهادزاده، م.، اسلامی، ق.، اکبری، م. و ملکی، پ. (۱۴۰۴). بررسی پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ در ساختگاه سد

(مطالعه موردی: سد مخزنی هراز - آمل). راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۳(۳): ۲۶۷-۲۸۴.

<https://doi.org/10.82185/tsws.2025.1221840>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

تحلیل پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ یکی از مراحل اساسی در طراحی سدها و تونل‌ها است که تأثیر زیادی در پایداری و عملکرد این سازه‌ها دارد. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های عددی برای تحلیل رفتار توده سنگ در برابر تغییر تنش‌ها و شرایط هیدرولوژیکی می‌تواند به بهبود روش‌های طراحی و مدیریت ریسک در پروژه‌های سدسازی کمک نماید (Zhang et al., 2011). Shalabi et al. (2007) روابطی را بین خصوصیات مهندسی سنگ بکر برای سنگ‌های آهکی، آهک دولومیتی و شیل (مقاومت مدول الاستیسیته و ضریب پواسان) با سختی‌های مختلف ارائه دادند. Alejano (2024) در تحقیقی به بررسی انواع سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ پرداخته است. او مزایا و محدودیت‌های کاربرد این طبقه‌بندی‌ها را در پروژه‌های مهندسی کوچک مقیاس بررسی کرده و نتیجه گرفت که استفاده صرف از این سیستم‌ها بدون ملاحظات تکمیلی می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های نادرست منجر شود. (Arianto et al., 2023) برای بررسی کیفیت توده سنگ در مسیر تونل سرریز سد سیدان در اندونزی از سیستم‌های طبقه‌بندی چندگانه مانند Q^1 ، GSI^2 ، SCE^3 و RMI^4 استفاده کردند. نتایج نشان داد که برای کاهش عدم قطعیت‌ها در هنگام طراحی سازه‌های مهم، بهتر است از چندین سیستم به صورت هم‌زمان استفاده شود. (Feng et al., 2025) با استفاده از مقادیر لوژان و پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ، مقادیر شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) را در دو نیروگاه برقابی در چین محاسبه کردند. (Al-Jawadi et al., 2025) نیز با مرور نحوه کمی‌سازی شاخص مقاومت زمین‌شناسی، بر اهمیت ترکیب داده‌های میدانی با نمودارهای اصلاح‌شده GSI جهت دقت بیشتر در ارزیابی مقاومت توده سنگ تأکید نمودند. (He et al., 2025) با بررسی پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی RMR^5 توده سنگ در تونل لوشان چین، یک روش اصلاح شده برای طبقه‌بندی توده سنگ‌ها با استفاده از سیستم RMR معرفی کردند که به کاهش عدم قطعیت در پروژه‌های زیرزمینی کمک می‌کند.

(Park et al., 2025) هم به ارزیابی رابطه بین RMR و سیستم Q برای طبقه‌بندی سنگ‌های گسله و ضعیف پرداختند. آن‌ها با تحلیل داده‌های حاصل از حفاری تونل‌ها در مناطق اولسان و گیونگ‌جو در کره جنوبی، معادلات همبستگی جدیدی بین شاخص‌های طبقه‌بندی برای افزایش دقت در طراحی تونل‌ها در محیط‌های زمین‌شناسی پیچیده ارائه کردند.

در ایران نیز مطالعات متعددی به منظور بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و ارزیابی ژئومکانیکی توده سنگ‌ها به‌خصوص در پروژه‌های سد و تونل‌سازی انجام شده است. (Hassanpour et al., 2023) داده‌های زمین‌شناسی مربوط به سه پروژه تونل‌سازی در مناطق متفاوت ایران را جمع‌آوری و دسته‌بندی کردند. سپس به بررسی روابط بین سیستم‌های مختلف طبقه‌بندی توده سنگ شامل RMR ، Q و GSI در شرایط مختلف زمین‌شناسی پرداختند. تحلیل‌های آماری نشان داد که ویژگی‌های مختلف زمین‌شناسی مانند وجود سنگ‌های رسی یا رگه‌دار، ضخامت لایه‌ها و تعداد ناپیوستگی‌ها اثر زیادی بر رابطه بین طبقه‌بندی‌ها دارند.

(Rezaei & Khamecheian, 2016) با مطالعه سنگ‌های مارنی ساختگاه سد دوستی و تحلیل آن‌ها با سیستم‌های طبقه‌بندی مختلف، نتیجه گرفتند که روش RMR نسبت به روش‌های دیگر مانند Q و GSI ، ارزیابی دقیق‌تری از شرایط ژئومکانیکی توده سنگ ارائه می‌دهد. در تحقیق دیگری، (Nazari et al., 2020) با تحلیل کمی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی واحدهای سنگی ساختگاه سد چم‌شیر با استفاده از شاخص‌های RMR و GSI ، دریافتند که بیشتر توده سنگ‌های منطقه از نظر مقاومت فشاری تک‌محوری، زاویه اصطکاک داخلی و

¹ Rock Mass Quality (Q-system)² Geological Strength Index³ Slope Mass Rating – Chinese System⁴ Rock Mass Index⁵ Rock Mass Rating

مدول تغییر شکل در رده متوسط تا زیاد قرار دارند؛ لذا با شرایط ساخت سد بتنی وزنی همخوانی دارند. (Mahouti & Katebi (2018) خاک‌های مارن‌دار تبریز را از نظر خواص فیزیکی و ژئومکانیکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد این خاک‌ها در برابر تورم، انقباض و واگرایی رفتار پیچیده‌ای دارند؛ لذا کاربرد روش‌های متداول طبقه‌بندی ژئوتکنیکی برای این خاک‌ها با محدودیت‌هایی همراه است. (Alijani et al. (2024) نیز به بررسی سیستم طبقه‌بندی توده سنگ (RMR) برای سنگ‌های درزه‌دار در ساخت سازه‌های زیرزمینی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که افزودن فاکتور درزه‌داری به سیستم RMR در سنگ‌های ضعیف منجر به افزایش دقت در تحلیل رفتار توده سنگ‌ها می‌شود.

هدف این پژوهش، ارزیابی جامع ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ در محل احداث سد هراز از طریق تحلیل کمی و کیفی داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی با بهره‌گیری از دو سیستم طبقه‌بندی معتبر GSI و RMR است. این بررسی به منظور تعیین وضعیت پایداری سنگ‌ها و ارائه مبنایی دقیق برای طراحی سازه‌های زیرسطحی و بدنه سد انجام شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه

رودخانه هراز در استان مازندران یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های حوضه آبریز دریای خزر است که از ارتفاعات بسیار بلند سرچشمه گرفته و پس از جمع‌آوری آب‌های حوضه بلده شهرستان نور و لاریجان شهرستان آمل به دریای خزر می‌ریزد. ساختگاه سد در حال ساخت هراز با مختصات جغرافیایی $36^{\circ}15'39''$ عرض شمالی و $52^{\circ}22'19''$ طول شرقی، در فاصله حدود ۲۵ کیلومتری جنوب شهر آمل، بر روی شاخه اصلی رودخانه هراز واقع شده است. نقشه موقعیت محدوده مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است.

سد هراز از نوع خاکی با هسته مخلوط رسی است که دارای ارتفاع ۱۲۵ متر از پی آبرفتی و حجم مخزن حدود ۲۳۰ میلیون مترمکعب در تراز عادی (Normal) است. از اهداف مهم ساخت این سد، تأمین نیاز آبی کشاورزی دشت هراز و تأمین نیاز شرب برخی از شهرهای مازندران از جمله آمل و محمودآباد به میزان حدود ۱۰۰ میلیون مترمکعب در سال است (KhazarAb Consulting Engineers Company, 2015).

شکل ۱- نقشه موقعیت و زمین‌شناسی ساختگاه سد مخزنی هراز

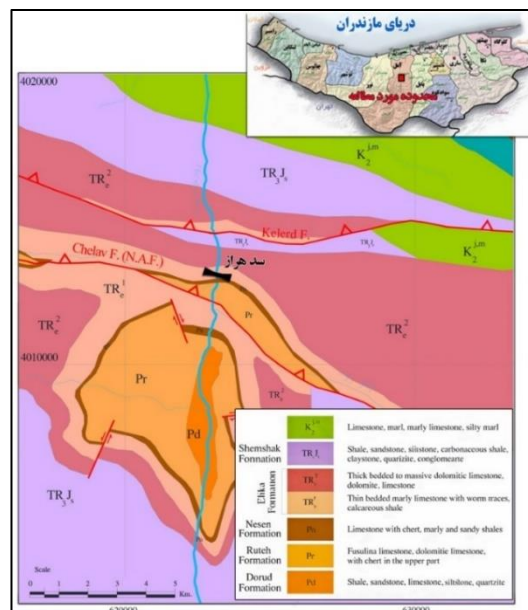


Fig. 1. Location and geological map of the Haraz reservoir dam site

۲-۲- روش مطالعه

در این مطالعه داده‌های زمین‌شناسی مهندسی از طریق برداشت‌های میدانی و حفر ۱۴ حلقه گمانه اکتشافی به دست آمد. برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ، آزمایش‌های مختلف آزمایشگاهی شامل آزمایش مقاومت فشاری نامحصور و آزمایش مقاومت فشاری (سه‌محوری) بر روی نمونه‌های اخذ شده از گمانه‌ها مطابق با روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) و استانداردهای (ASTM D2938-95 (2002) و ASTM D2664-04 (2004) انجام گردید (Mahab Ghods Consulting Engineers Company, 2014). برای طبقه‌بندی مهندسی سنگ نیز از دو سیستم RMR (Rock Mass Rating) و GSI (Geological Strength Index) استفاده شد. همچنین به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی از روابط تجربی Hoek & Brown (1997) استفاده گردید. مشخصات گمانه‌های اکتشافی حفر شده در محدوده سد در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات گمانه‌های اکتشافی حفر شده در محدوده سد هراز (Mahab Ghods Consulting Engineers Company, 2014)

Table 1. Specifications of exploratory boreholes drilled within the Haraz dam area

(Mahab Ghods Consulting Engineers Company, 2014)

مختصات گمانه (UTM)		وضعیت حفاری			موقعیت گمانه	نام گمانه
Y	X	عمق سنگ (m)	عمق آبرفت (m)	عمق کل (m)		
۴۰۱۳۰۴۸	۶۲۳۴۶۷	۱۴۳/۵	۱/۵	۱۴۵	تکیه‌گاه راست - محور سد	H-201
۴۰۱۳۰۶۱	۶۲۳۲۷۰	۶۲/۷	۲۷/۳	۹۰	بستر - بالادست محور سد	H-202
۴۰۱۲۹۱۳	۶۲۳۳۲۳	۵۶	۴	۶۰	تکیه‌گاه راست - بدنه سد	H-203
۴۰۱۳۳۷۳	۶۲۳۳۴۷	۱۹	۲۶	۴۵	بستر - محور نشیب بند	H-205
۴۰۱۳۰۱۶	۶۲۳۱۰۶	۸۸/۸	۱/۲	۹۰	تکیه‌گاه چپ - بدنه سد	H-206
۴۰۱۲۸۵۳	۶۲۳۲۰۴	۵۴/۷	۲۵/۳	۸۰	بستر - محور نشیب بند	H-207
۴۰۱۲۸۱۲	۶۲۳۵۲۳	۴۴/۵	۲۷/۵	۷۲	تکیه‌گاه راست - بالادست	H-208
۴۰۱۲۷۶۶	۶۲۳۲۵۹	۲۶	۲۴	۵۰	بستر - محور فراز بند	H-209
۴۰۱۲۷۱۳	۶۲۳۵۵۹	۴۹	۶	۵۵	تکیه‌گاه راست - بالادست	H-210
۴۰۱۳۰۸۱	۶۲۳۳۲۸	۹۷	۳	۱۰۰	تکیه‌گاه راست - محور سد	H-211
۴۰۱۳۲۷۸	۶۲۳۲۷۹	۳۲/۵	۳۲/۵	۶۵	تکیه‌گاه چپ - بدنه سد	H-212
۴۰۱۳۱۵۷	۶۲۳۲۷۹	۴۱/۶	۲۸/۵	۷۰	بستر - پایین‌دست محور	H-213
۴۰۱۲۷۳۰	۶۲۳۱۸۵	۱۸/۷	۲۱/۳	۴۰	بستر - بالادست فراز بند	H-214
۴۰۱۲۷۴۰	۶۲۳۴۳۸	۴۲	۲۳	۶۵	تکیه‌گاه راست - بالادست	H-215

۲-۲-۱- زمین‌شناسی محدوده

محدوده مورد مطالعه در بخش مرکزی پهنه البرز قرار گرفته است. امتداد کلی رودخانه هراز تقریباً شمالی - جنوبی است و در محدوده ساختگاه سد عمود بر لایه‌بندی سنگ‌ها به سمت شمال جریان دارد. دره هراز در محدوده ساختگاه سد به شکل V باز و متقارن است و شیب متوسط هر دو تکیه‌گاه حدود ۴۰ درجه است (Mahab Ghods Consulting Engineers Company, 2014). روباره:

در محدوده ساختگاه سد شامل نهشته‌های رودخانه‌ای، آبشست‌های دامنه‌ای و پادگانه‌های آبرفتی است. نهشته‌های رودخانه‌ای با ضخامت حدود ۵ متر، عمدتاً از ذرات دانه‌درشت (شن، ماسه، قلوه‌سنگ) با افق‌هایی از سیلت و رس، تشکیل شده است. آبشست‌های دامنه‌ای دارای ذرات زاویه‌دار شامل شن، سیلت، رس و اندکی قلوه‌سنگ هستند که ضخامت آن‌ها در تکیه‌گاه‌ها به ۳ متر می‌رسد. پادگانه‌های آبرفتی قدیمی نیز در تکیه‌گاه‌ها مشاهده می‌شوند و شامل مصالح دانه‌درشت (شن و قلوه‌سنگ) با سیمان‌بندی ضعیف تا متوسط و یک لایه ریزدانه‌تر در بالا هستند. سنگ‌بستر:

در محدوده فرازبند سد از رس، شیل‌های رسی و سنگ‌آهک تیره فسیل‌دار سازند نسن (پرمین بالایی) تشکیل شده است. اما بخش غالب واحدهای سنگی محدوده سد هراز متعلق به سازند الیکا (تریاس زیرین تا میانی) است. این سازند در محدوده سد هراز به دو بخش زیرین و بالایی تقسیم شده است (Süssli, 1976). بخش زیرین (الیکا تحتانی) از سنگ‌آهک نازک تا متوسط و گاهی ضخیم‌لایه تشکیل شده است. درون لایه‌های سنگ آهک، گاهی واحدهای آهک مارنی، آهک ورمیکوله، سنگ‌آهک خاکستری تا زرد و مارن شیلی نازک لایه نیز مشاهده شده است (شکل ۲). بخش بالایی این سازند (الیکا فوقانی) بیشتر از سنگ‌های دولومیتی تشکیل شده است. ساختار زمین‌شناسی:

واحدهای سنگی محدوده سد بر روی یال شمال شرقی طاق‌دیس عمارت با روند شمال غربی - جنوب شرقی قرار دارد. شیب لایه‌بندی سنگ‌ها در محدوده مورد مطالعه بین ۶۸-۶۵ درجه و جهت شیب لایه‌ها بین ۳۵۷-۰۰۵ است. از گسل‌های مهم محدوده سد می‌توان به گسل‌های چلاو و کلرد اشاره نمود. گسل چلاو با روند شمال غربی - جنوب شرقی در بخش‌های انتهایی مخزن سد واقع شده است. این گسل از نوع معکوس بوده و زون خرد شده متأثر از عملکرد آن با ضخامت حدود ۵۰ متر در مجاورت جاده آمل - تهران به خوبی قابل مشاهده است. به واسطه عملکرد این گسل، در ساحل چپ رودخانه هراز، دولومیت‌های سازند روته از سمت شمال بر روی سنگ‌های آهکی نازک لایه سازند الیکا در سمت جنوب رانده شده‌اند. گسل چلاو در سطح زمین دارای شیب ۷۵ درجه تا ۸۳ به سمت شمال است. گسل کلرد با فاصله حدود ۲ کیلومتر در شمال گسل چلاو واقع شده است و در شمال باختر ساختگاه سد به گسل چلاو متصل می‌شود. این گسل سبب راندگی واحدهای سنگی سازند الیکا از سمت شمال بر روی واحدهای سنگی متعلق به سازند شمشک در جنوب شده است (Mahab Ghods Consulting Engineers Company, 2014).

۲-۲-۲- ناپیوستگی‌های محدوده

بر اساس پیمایش صحرایی و درزه‌نگاری‌های انجام شده در محدوده ساختگاه سد هراز و رسم منحنی تجمعی آن‌ها، ناپیوستگی‌های موجود در محدوده سد به شرح زیر هستند:

الف - تکیه‌گاه راست

در این تکیه‌گاه ۴ ناپیوستگی شامل لایه‌بندی و سه دسته درزه شناسایی شده است. دسته درزه J1 با شیب و جهت شیب ۲۳۸/۴۶، دسته درزه J2 با شیب و جهت شیب ۹۴/۸۲، دسته درزه J3 با شیب و جهت شیب ۱۳۹/۴۱ و لایه‌بندی با شیب و جهت شیب ۵/۶۸ است. در شکل (۳) نمودار پراکندگی و نحوه تقاطع ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه راست نشان داده شده است.

ب - تکیه‌گاه چپ

در این تکیه‌گاه ۳ ناپیوستگی شامل لایه‌بندی و دو دسته درزه شناسایی شده است. دسته درزه J1 با شیب و جهت شیب ۲۳۶/۶۱، دسته درزه J2 با شیب و جهت شیب ۱۰۲/۶۳ و لایه‌بندی با شیب و جهت شیب ۳۵۷/۶۵ می‌باشد. شکل (۴) نمودار پراکندگی و نحوه تقاطع ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه چپ را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، دسته درزه J1 در تکیه‌گاه راست تقریباً معادل دسته درزه J1 تکیه‌گاه چپ و دسته درزه J2 تکیه‌گاه راست تقریباً معادل دسته درزه J2 تکیه‌گاه چپ است. دسته درزه J3 در تکیه‌گاه راست تمرکز نسبتاً خوبی داشته، در حالی که در تکیه‌گاه چپ تمرکز بسیار کم دارد و به همین سبب به عنوان یک دسته درزه معرفی نشده است. تداوم دسته درزه‌های ساختگاه خیلی کم (کمتر از ۱ متر) تا کم (۱-۳ متر) و به ندرت متوسط (۳-۱۰ متر) است. فاصله داری^۷ آن‌ها نیز غالباً در حد بسته (۲۰-۶۰ سانتی متر) تا متوسط (۲۰-۶۰ سانتی متر) و در مقادیر کمتر در حد خیلی بسته (۲-۶ سانتی متر) تا بسته (۶-۲۰ سانتی متر) است. بازشدگی^۸ دسته درزه‌ها در حد بسته (۰/۱-۰/۲۵ میلی متر) و تا حدودی باز (۰/۵-۰/۲۵ میلی متر) است. سطوح دسته درزه‌ها غالباً تمیز بوده و گاهی به وسیله مقدار کمی خرده سنگ و مواد ریزدانه به همراه اکسیدهای آهن پر شده است.

شکل ۲- عکس سمت راست: واحد شیلی - مارن آهکی سازند الیکا در امتداد ترانشه جاده آمل - تهران، عکس سمت چپ: واحد آهکی - دولومیتی سازند الیکا در تکیه‌گاه چپ سد (نگاه به غرب)

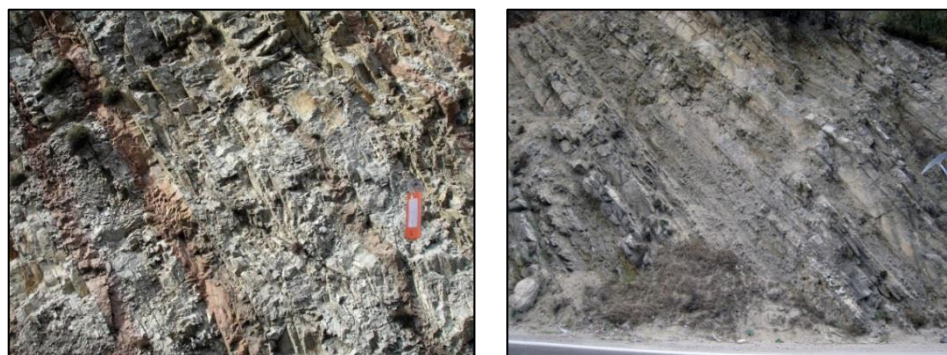


Fig. 2. Right photo: Shaly-Marly limestone unit of the Elika Formation along the Amol-Tehran road trench.
Left photo: Limestone-Dolomite unit of the Elika Formation in the left abutment of the dam (view to the west).

۳- نتایج و بحث

۱-۳- توصیف واحدهای سنگی ساختگاه سد

بر اساس مشاهدات صحرایی و مطالعات اکتشافی، سنگ میزبان ساختگاه سد شامل تناوبی از آهک، آهک مارنی، آهک دولومیتی و

^۶ Continuity

^۷ Spacing

^۸ Aperture

دولومیت به همراه میان‌لایه‌های مارن و شیل است که متعلق به سازند الیکا است. توصیف لایه‌های سنگی تشکیل‌دهنده پی سنگ سد در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است بر اساس تشابه نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی، برخی از واحدهای سنگی مانند T1-DLM2، T1-ML1 و همچنین واحدهای T1-DL1، T1-DL3 با یکدیگر تلفیق شده و به صورت گروهی طبقه‌بندی شده‌اند.

شکل ۳- پراکندگی و نحوه تقاطع ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه راست ساختگاه سد

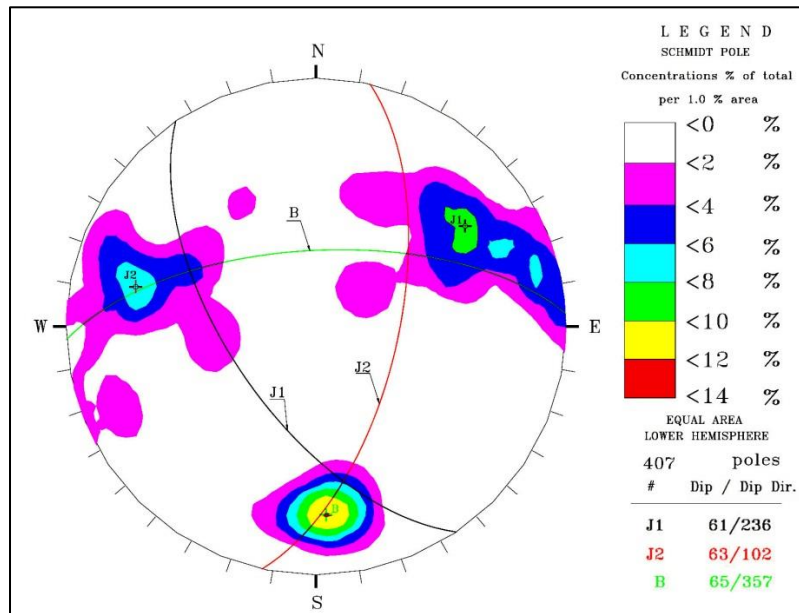


Fig. 3. Distribution and intersection pattern of discontinuities at the right abutment of the dam site.

شکل ۴- پراکندگی و نحوه تقاطع ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه چپ ساختگاه سد

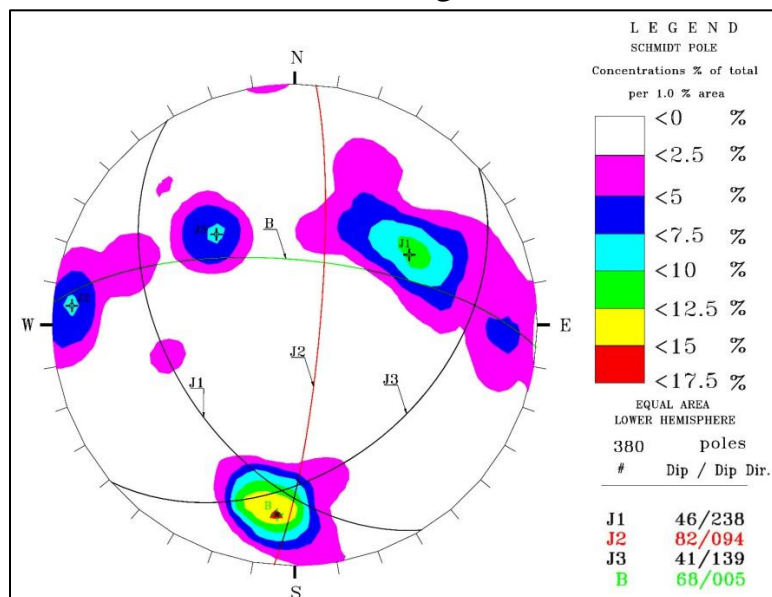


Fig. 4. Distribution and intersection pattern of discontinuities at the left abutment of the dam site

جدول ۲- توصیف واحدهای سنگی در پی سد

Table 2. Description of rock units at the dam foundation

نام واحد سنگی	جهت شیب لایه‌ها	میزان شیب لایه‌ها	توصیف
T1-DL1	۲۳۸-۲۳۶	۶۱°-۶۶°	تناوب آهک و دولومیت متوسط لایه با چیرگی دولومیت
T1-SL	۲۳۸-۲۳۶	۶۱°-۶۶°	تناوب شیل‌ها و آهک‌های مارنی خاکستری متوسط - نازک لایه
T1-DL2	۲۳۸-۲۳۶	۶۱°-۶۶°	تناوب آهک مارنی با دولومیت خاکستری - سبزی ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر
T1-ML1	۲۳۸-۲۳۶	۶۱°-۶۶°	تناوب آهک، آهک مارنی با میان‌لایه‌های شیلی - سبزی ۳۰ سانتی‌متر
T1-DLM1	۲۳۸-۲۳۶	۶۱°-۶۶°	تناوب آهک مارنی، مارن، آهک دولومیتی - سبزی ۵ تا ۴۰ سانتی‌متر
T1-DL3	۲۳۸-۲۳۶	۶۱°-۶۶°	تناوب آهک مارنی خاکستری با دولومیت خاکستری تیره متوسط لایه
T1-ML2	۲۳۸-۲۳۶	۶۱°-۶۶°	تناوب آهک مارنی و مارن - سبزی کمتر از ۱۰ سانتی‌متر تا حدود ۱ متر
T1-DL4	۲۳۸-۲۳۶	۶۱°-۶۶°	تناوب آهک دولومیتی خاکستری روشن با دولومیت خاکستری
Pn	۲۳۸-۲۳۶	۶۱°-۶۶°	تناوب آهک ماسه‌ای، شیل و لای سنگ

۳-۲- آزمایش‌های تعیین مشخصات مکانیکی سنگ

به منظور تعیین پارامترهای مکانیکی توده سنگ‌ها، آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل آزمایش مقاومت فشاری نامحصور و آزمایش مقاومت فشاری (سه محوری) بر روی نمونه‌های اخذ شده از گمانه‌ها مطابق با روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) و استانداردهای ASTM D2938-95 (2002) و ASTM D2664-04 (2004) انجام شد (Mahab Ghods Consulting Engineers Company, 2014).

۳-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری نامحصور (تک محوری)

به منظور ارزیابی رفتار مکانیکی توده سنگ در ساختمان سد مخزنی هراز، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون بر روی نمونه‌های برداشت شده از گمانه‌های مختلف در دو حالت خشک و اشباع انجام گرفت. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که در تمامی واحدهای سنگی، مقدار میانگین مقاومت UCS در حالت خشک بیشتر از حالت اشباع است، که بیانگر تأثیر منفی آب بر مقاومت نمونه‌ها است. برای مثال در واحد T1-SL، مقاومت تک محوری در حالت خشک ۶۰/۷ مگاپاسکال است، در حالی که در حالت اشباع میانگین آن به ۴۰/۲ مگاپاسکال می‌رسد. در واحدهای سنگی T1-ML1 و T1-ML2، کاهش مقاومت فشاری از ۴۰ مگاپاسکال در حالت خشک به ۳۴ مگاپاسکال در حالت اشباع مشاهده می‌شود. کمترین میزان میانگین مقاومت فشاری تک محوری در واحد Pn با میانگین ۹ مگاپاسکال در حالت اشباع اندازه گیری شده است. این مقدار همراه با ضریب تغییرات بالا (۰/۸۷) نشان دهنده ناهمگنی شدید در این واحد سنگی متشکل از آهک ماسه‌ای، شیل و لای سنگ است.

مدول الاستیسیته نیز در وضعیت خشک نسبت به اشباع مقادیر بیشتری دارد، که تأییدی بر کاهش سختی سنگ‌ها در اثر اشباع شدگی است. در واحد T1-ML1، میانگین مدول الاستیسیته از ۱۹ گیگاپاسکال (خشک) به ۱۵/۵ گیگاپاسکال (اشباع) کاهش یافته است. در واحد سنگی T1-DL4 میانگین مدول الاستیسیته در حالت اشباع نسبتاً بالا به دست آمده که بیانگر کیفیت ژئومکانیکی خوب این واحد

است. مقدار نسبت پواسون نیز عمدتاً بین ۰/۲۱ تا ۰/۲۸ قرار دارد و در اکثر واحدها تغییر چندانی میان حالت خشک و اشباع دیده نمی‌شود. بالاترین مقدار میانگین پواسون در واحد Pn گزارش شده که احتمالاً ناشی از خاصیت پلاستیسیته بالاتر این واحد است.

۳-۲-۲- آزمایش مقاومت فشاری محصور (سه‌محوری)

به‌منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی سنگ و برآورد ثابت‌های مورد نیاز برای معیار شکست هوک و براون، روی تعدادی از نمونه‌ها آزمایش سه‌محوری در حالت اشباع انجام شد. فشارهای جانبی باتوجه به جنس نمونه و متناسب با شرایط بارگذاری ناشی از سازه و موقعیت آن‌ها تعیین شده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

بررسی داده‌های جدول (۴) نشان می‌دهد که با افزایش تنش محصورکننده، مقاومت نهایی نمونه‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. این امر نشان دهنده تأثیر مثبت فشار جانبی بر مقاومت کلی توده سنگ است. در بین واحدهای مورد مطالعه، سنگ‌های واحد T1-SL در فشارهای مختلف، عملکرد مکانیکی بسیار مطلوبی از خود نشان داد؛ به‌طوری‌که مقدار مقاومت محوری در برخی نمونه‌ها به بیش از ۱۱۷ مگاپاسکال نیز رسید. واحدهای T1-DL1، T1-DL2، T1-DL3 و T1-DL4 نیز مقاومت مناسبی در برابر تنش‌های محصورکننده از خود نشان داده‌اند که بیانگر کیفیت مناسب این توده‌سنگ‌ها است. به‌طور کلی، تحلیل داده‌های آزمایش سه‌محوری حاکی از آن است که مقاومت سنگ‌های منطقه تابعی از فشار محصورکننده بوده و توده‌سنگ‌های موجود، خصوصاً در برخی واحدها، از استحکام مناسبی برخوردارند، هرچند تأثیر ناپیوستگی‌ها در تضعیف موضعی مقاومت سنگ قابل توجه است.

با توجه به اهمیت معیار شکست هوک-براون (Hoek & Brown, 1997) در برآورد پارامترهای ژئومکانیکی و استفاده آن در طراحی‌ها، ثابت m_i برای هر سنگ از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری و تک‌محوری محاسبه شد. نتایج به‌دست آمده در آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های گرفته شده از هر آزمایش در شکل (۵) ارائه شده است. در این شکل برای برآورد ثابت‌های معیار شکست هوک - براون نمودار σ_1 بر حسب σ_3 رسم شده است.

مقاومت فشاری محصور قابل محاسبه از نتایج آزمایش‌های فوق به ترتیب برای واحد سنگی T1-SL معادل ۴۰/۶ مگاپاسکال، واحدهای T1-DL1 و T1-DL3 معادل ۴۱/۷ مگاپاسکال، واحدهای T1-DL1، T1-DL2 و T1-DL3 معادل ۴۷/۷ مگاپاسکال و واحد سنگی T1-DL4 معادل ۶۷/۷ مگاپاسکال می‌باشد که با نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نامحصور مشابهت دارد.

با توجه به شیب و عرض از مبدا خطوط برازش شده در نمودارهای شکل (۵)، ثابت معیار شکست هوک و براون (m_i) برای سنگ بکر در جدول (۵) ارائه شده است. این پارامتر نشان‌دهنده شکنندگی و مقاومت اصطکاکی ذاتی سنگ بکر بدون در نظر گرفتن ناپیوستگی‌هاست. مقدار m_i برای واحدهای سنگی بررسی شده در محدوده ۹ تا ۱۲ قرار دارد. با توجه به ماهیت ضعیف توده سنگ در واحد Pn، امکان برداشت نمونه با طول مناسب جهت انجام آزمایش سه‌محوری مقدور نگردید. لذا ثابت هوک-براون (m_i) برای این واحد بر اساس تجربیات مشابه، معادل ۷ در نظر گرفته شد.

جدول ۳- نتایج آزمایش مقاومت تک محوری در حالت خشک و اشباع (Mahab Ghods Consulting Engineers Company, 2014)

Table 3. Results of uniaxial compressive strength tests in dry and saturated states
(Mahab Ghods Consulting Engineers Company, 2014)

واحد سنگی	نوع آزمایش	وضعیت نمونه	تعداد نمونه	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
T1-SL	مقاومت تک محوره (MPa)	خشک	۱	۶۰/۷	۶۰/۷	۶۰/۷	-	-
		اشباع	۱۴	۱۰/۲	۷۴/۵	۴۰/۲	۲۰/۳	۰/۵
	مدول الاستیسیته (GPa)	خشک	۱	۱۹	۱۹	۱۹	-	-
		اشباع	۷	۸/۵	۳۰/۷	۱۲/۰	۷/۶۵	۰/۵
	نسبت پواسون	خشک	۱	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۴	-	-
		اشباع	۹	۰/۱۳	۰/۳	۰/۲۱	۰/۵۰	۰/۲۷
	مقاومت تک محوره (MPa)	خشک	۹	۳۰	۴۷/۸	۴۰	۱۵/۳	۰/۳۵
		اشباع	۴۱	۶/۹	۷۲	۳۴	۱۸	۰/۵
	مدول الاستیسیته (GPa)	خشک	۹	۱۴	۲۸	۱۹	۳	۰/۱۷
		اشباع	۴۱	۸	۲۶	۱۵/۵	۶	۰/۳۷
	نسبت پواسون	خشک	۱۰	۰/۱۸	۰/۳۴	۰/۲۳	۰/۷۰	۰/۳
		اشباع	۳۸	۰/۱۵	۰/۳۷	۰/۲۶	۰/۷۰	۰/۲۹
T1-DL1 T1-DL3 T1-DL2	مقاومت تک محوره (MPa)	خشک	۱	۶۵	۶۵	۶۵	-	-
		اشباع	۱۴	۱۰	۴۸	۳۴	۱۱	۰/۳۵
	مدول الاستیسیته (GPa)	خشک	۱	۳۰	۳۰	۳۰	-	-
		اشباع	۱۴	۲۶	۱۲	۲۰	۹	۰/۵
	نسبت پواسون	خشک	۱	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۳۰	۰/۱۲
		اشباع	۱۴	۰/۱۴	۰/۳۱	۰/۲۴	۰/۷۰	۰/۳۲
	مقاومت تک محوره (MPa)	اشباع	۱۲	۳۰	۸۷	۵۲	۲۱	۰/۳۸
		اشباع	۱۳	۱۵	۴۰	۳۲	۸	۰/۲۷
	نسبت پواسون	اشباع	۷	۰/۱۳	۰/۳	۰/۲۴	۰/۵۰	۰/۲۱
		اشباع	۶	۷	۴۸	۹	۲۰	۰/۸۷
	مدول الاستیسیته (GPa)	اشباع	۶	۴	۱۴	۷	۴	۰/۵
		اشباع	۳	۰/۲۲	۰/۳۰	۰/۲۸	۰/۰۶	۰/۲۰
Pn	نسبت پواسون							

جدول ۴- نتایج آزمایش سه‌محوری واحدهای سنگی ساختگاه سد هراز (Mahab Ghods Consulting Engineers Company, 2014)

Table 4. Results of triaxial tests on the rock units at the Haraz dam site

(Mahab Ghods Consulting Engineers Company, 2014)

σ ₁ (MPa)	σ ₃ (MPa)	واحد سنگی	σ ₁ (MPa)	σ ₃ (MPa)	واحد سنگی	σ ₁ (MPa)	σ ₃ (MPa)	واحد سنگی
۶۹/۶۲	۲/۵	T1-DL1 T1-DL3 T1-DL2	۴۳/۳۶	۰/۵	T1-ML1 & T1-DLM1	۷۲/۲۸	۲	T1-SL
۸۷/۷۵	۶/۵		۵۴/۰۲	۱/۵		۹۳/۳۷	۳	
۱۰۱/۹۷	۸/۵		۷۰/۶۲	۲/۵		۴۳/۳۷	۱	
۶۳/۸۴	۲		۱۱۸/۰۶	۳		۴۹/۶۳	۵/۲	
۸۶/۹۲	۵		۳۳	۰/۷۵		۵۷/۸۳	۳/۵	
۱۰۰/۸۳	۷		۴۹	۱		۲۴/۵۷	۰/۵	
۶۴/۳۹	۲/۵		۵۴	۲		۳۶/۹۳	۱/۵	
۷۳/۷۷	۴		۶۴	۳		۵۰/۱۶	۲	
۸۲/۷۸	۵/۵		۴۳	۱/۵		۶۷/۶۲	۳	
۵۲/۲۸	۲		۵۳	۲/۵		۷۴/۳۳	۱	
۹۹/۹۹	۴	*: شکست بر روی لایه‌بندی رخ داده‌است. لذا اعداد حاصل شده معرف سنگ بکر نبوده و از آن‌ها در برآورد ثابت‌های سنگ بکر در معیار هوک- براون نمی‌توان استفاده کرد.	۶۳	۳/۵	T1-DL4	۵۷/۷۳	۲	
۱۳۱/۵۵	۶		۳۰/۵	۲/۵*		۷۵/۳۲	۳	
۴۸/۰۳	۲		۳۹/۱۱	۳/۵*		۷۰/۶	۱/۵	
۷۹/۰۵	۴		۴۸/۰۸	۵/۵*		۵۷/۴۸	۲/۵	
۱۲۲/۲۸	۶		۲۴/۱۱	۳*		۷۰/۸۹	۲/۵	
			۳۱/۷۳	۵*		۹۱/۹۲	۵	
			۴۶/۷۸	۷*		۱۱۷/۴۹	۷/۵	
			۱۷/۹۱	۲/۵*		۷۹/۹۶	۲	
			۲۱/۳۴	۴*		۸۷/۳۹	۴	
			۲۶/۴۱	۵/۵*		۹۴/۸۳	۶	
			۵۷/۶۲	۱/۷۵*		۱۸/۵۸	۰/۵	
			۶۲/۴۶	۲/۵*		۲۲/۰۵	۱	
			۶۸/۷۹	۴*		۲۶/۰۲	۱/۵	
			۵۲/۱	۱/۵		۱۶/۳۵	۱	
			۷۶/۲۵	۳		۲۴/۲۸	۲	
			۹۸/۸	۴/۵		۳۳/۲	۳	

جدول ۵- پارامتر ثابت سنگ بکر

Table 5. Intact rock constant parameters

ضریب همبستگی (%)	mi	جنس نمونه
۶۱	۱۰	T1-SL
۸۵	۱۱	T1-ML1 & T1-DLM1
۷۳	۱۲	T1-DL3 & T1-DL2
۶۴	۹	T1-DL4

شکل ۵- پوش دایر موهر- نتایج آزمایش‌های سه‌محوری نمونه‌های سنگی بکر

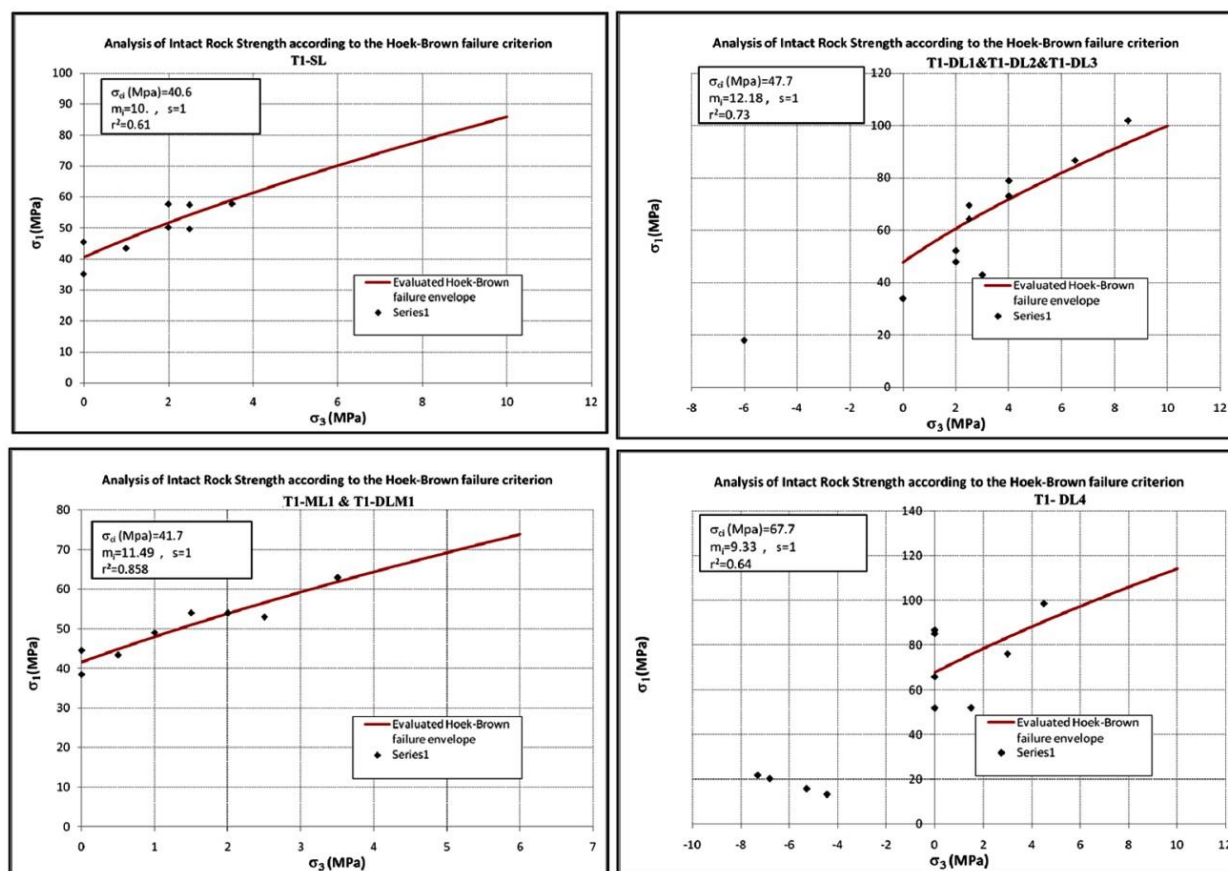


Fig. 5. Mohr circles envelope- Results of triaxial tests on intact rock samples

۳-۲-۳- طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ

شاخص GSI که توسط (Hoek & Brown 1997) ارائه شده است، در حقیقت یک فاکتور کاهشده انتقالی برای تعیین مقاومت توده سنگ از مقاومت سنگ بکر با توجه به شرایط ساختاری توده سنگ است. این شاخص دو فاکتور مهم از توده سنگ را مدنظر قرار می‌دهد. در فاکتور اول، معیار ساختار توده سنگ از نظر تعداد درزه‌ها است که از بلوکی تا خرد شده متغیر می‌باشد. در فاکتور دوم، وضعیت و کیفیت سطح درزه‌ها در توده‌سنگ‌های پی سد براساس مطالعات اکتشافی، آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی مدنظر قرار می‌گیرد. بر این اساس

شاخص‌های RMR و GSI برای توده‌سنگ‌های پی سد هراز در جدول (۶) برآورد شده است. این دو شاخص از جمله روش‌های تجربی پرکاربرد در مطالعات مهندسی سد برای طبقه‌بندی و تخمین ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها در شرایط طبیعی هستند.

جدول ۶- میزان کیفیت توده‌سنگ‌های پی سد هراز بر اساس شاخص‌های RMR و GSI

Table 6. Quality rating of rock masses at the Haraz dam foundation based on RMR and GSI indices

GSI	RMR89	توده‌سنگ‌ها
۵±۴۲	۳۷	T1-SL
۵±۴۰	۳۷	T1-ML1 & T1-DLM1
۵±۴۵	۴۲	T1-DL3 & T1-DL2
۵±۵۲	۴۷	T1-DL4
۵±۳۵	۳۰	Pn

بر اساس جدول (۶)، مقادیر GSI واحدهای سنگی محدوده سد هراز که بر مبنای خصوصیات زمین‌شناسی، ساختاری و میزان ناپیوستگی‌ها تعیین شده، در بازه ۳۵±۵ تا ۵۲±۵ قرار دارد. واحد Pn دارای پایین‌ترین کیفیت و واحد T1-DL4 دارای بهترین کیفیت توده سنگ در میان نمونه‌های مطالعه‌شده است.

مقادیر RMR برای تمامی واحدهای بررسی‌شده در بازه ۳۰ تا ۴۷ قرار دارد. بر اساس طبقه‌بندی (1989) Bieniawski، این میزان از RMR نشان‌دهنده کیفیت ضعیف تا متوسط توده‌سنگ‌ها است. پایین‌ترین مقدار RMR مربوط به واحد Pn است که نشان‌دهنده ضعیف‌ترین شرایط توده سنگ در میان سایر واحدها می‌باشد. بالاترین مقدار RMR نیز در واحد T1-DL4 مشاهده شده که نشان‌دهنده بهترین کیفیت نسبی توده سنگ در ساختگاه است. این نتایج کاملاً مشابه با نتایج حاصل از شاخص GSI است. به‌طور کلی می‌توان اظهار داشت که اغلب واحدهای سنگی محدوده سد در دسته توده‌سنگ‌های ضعیف تا متوسط قرار می‌گیرند. در شکل (۶) ناحیه‌بندی ژئومکانیکی پی و تکیه‌گاه‌های سد هراز و در جدول (۷) نحوه امتیازدهی برای تعیین شاخص RMR ارائه شده است.

شکل ۶- ناحیه‌بندی ژئومکانیکی پی و تکیه‌گاه‌های سد هراز

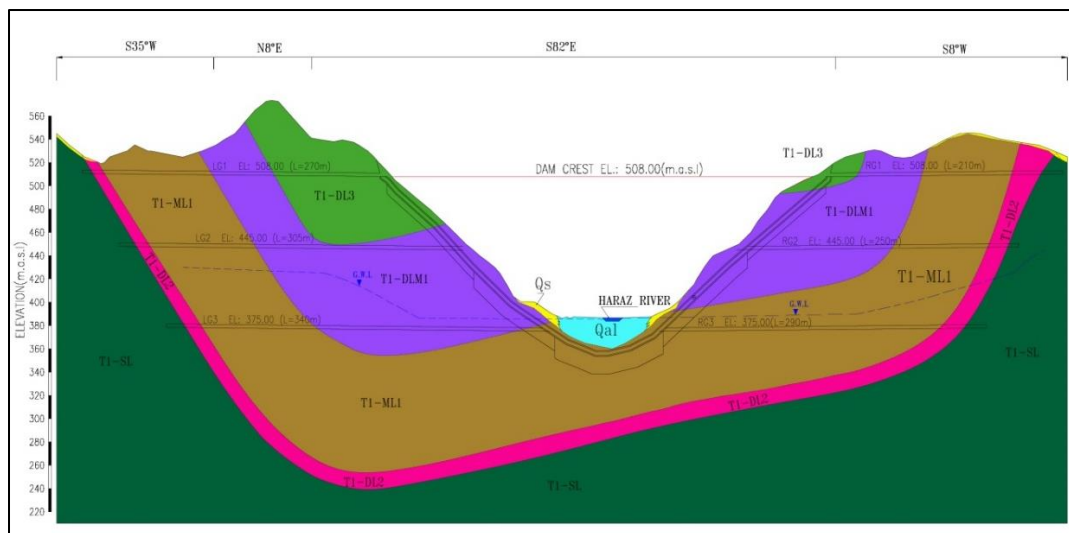


Fig. 6. Geomechanical zoning of the foundation and abutments of Haraz Dam

جدول ۷- امتیازات طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ‌های پی سد هراز (RMR)

Table 7. Engineering classification ratings of rock masses at the Haraz dam foundation (RMR)

توده‌سنگ‌ها	مقاومت سنگ بکر	کیفیت مغزه حفاری	فاصله ناپیوستگی	وضعیت ناپیوستگی‌ها	آب زیرزمینی	RMR89
T1-SL	۴	۱۲	۸	۹	۴	۳۷
T1-ML1 & T1-DLM1	۴	۷	۸	۱۱	۷	۳۷
T1-DL3 & T1-DL2	۵	۱۲	۸	۱۰	۷	۴۲
T1-DL4	۶	۱۲	۸	۱۵	۶	۴۷
Pn	۲	۷	۸	۹	۴	۳۰

۳-۲-۴- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ

با توجه به نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ‌ها، تجزیه و تحلیل و تخمین پارامترهای مقاومت برشی پی سنگ سد هراز بر مبنای روش (Hoek & Brown (1997) انجام شد. برای برآورد پارامترهای مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ‌ها نیز از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و برآورد پارامتر با استفاده از روابط ارائه شده توسط (Hoek & Diederichs (2006 استفاده شده است. در جدول (۸) نتایج برآورد پارامتر مقاومت برشی و مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ‌ها ارائه شده است.

جدول ۸- پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های پی سد

Table 8. Geomechanical parameters of rock masses at the dam foundation

نام واحد سنگی	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	مدول تغییر شکل‌پذیری (GPa)	ضریب پواسون
T1-SL	۰/۳۵	۴۲	۱/۶	۰/۳۴
T1-ML1 & T1-DLM1 & T1-ML2 T1-DL3 & T1-DL2 & T1-DL1 & T2-DL1	۰/۱۵	۳۵	۱/۸	۰/۲۸
T1-DL4	۰/۲۵	۴۱	۸	۰/۲۴
Pn	۰/۱۵	۳۰	۰/۸	۰/۳۵

بر اساس جدول (۸) بیشترین مقدار چسبندگی و بالاترین زاویه اصطکاک داخلی مربوط به واحد T1-SL است که حاکی از اصطکاک درونی بالاتر و پتانسیل پایداری این واحد سنگی در برابر گسیختگی برشی است. کمترین مقدار زاویه اصطکاک نیز مربوط به واحد Pn است که نشان‌دهنده رفتار ضعیف‌تر این توده سنگ در برابر لغزش می‌باشد.

مدول تغییر شکل‌پذیری در بازه‌ای بین ۰/۸ گیگاپاسکال برای ضعیف‌ترین سنگ (Pn) تا ۸ گیگاپاسکال برای مقاوم‌ترین سنگ (T1-DL4) قرار دارد. افزایش مدول تغییر شکل‌پذیری بیانگر توانایی بیشتر سنگ برای تحمل تنش بدون تغییر شکل زیاد است. تغییرات ضریب پواسون نسبتاً محدود (در بازه ۰/۲۴ تا ۰/۳۵) است. با توجه به مقدار بالاتر ضریب پواسون در واحد Pn و همچنین در نظر گرفتن سایر

پارامترها می‌توان اظهار کرد که این واحد سنگی نسبت به بقیه واحدها نرم‌تر و با کیفیت پایین‌تر است؛ لذا در شرایط بارگذاری تمایل به گسترش جانبی بیشتری دارد.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه ژئومکانیکی ساختگاه سد مخزنی هراز با بهره‌گیری از روش‌های صحرایی، آزمایش‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های مبتنی بر طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ (RMR و GSI)، اطلاعات دقیقی از وضعیت زمین‌شناسی و خواص ژئومکانیکی توده سنگ محدوده مورد مطالعه فراهم نموده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مقادیر حاصل از هر دو روش RMR و GSI تطابق قابل قبولی با یکدیگر دارند و بیانگر کیفیت پایین توده‌سنگ در بخش عمده‌ای از محدوده سد هستند. بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته، اشباع‌شدن سنگ‌ها موجب کاهش محسوس مقاومت مکانیکی، به‌ویژه در واحدهای سنگی ضعیف مانند واحد Pn می‌شود. همچنین، تحلیل آزمایش‌های سه‌محوری بیانگر افزایش قابل توجه مقاومت برشی توده سنگ با افزایش فشار محصورکننده است؛ به‌طوری‌که واحد T1-SL بیشترین و واحد Pn کمترین مقاومت را نشان دادند. برآورد پارامترهای معیار هوک و براون و طبقه‌بندی توده‌سنگ‌ها با استفاده از سیستم‌های RMR و GSI نشان داد که اغلب واحدهای سنگی پی سد هراز در رده ضعیف تا متوسط قرار می‌گیرند؛ از این رو برای احداث سد خاکی کاملاً مناسب هستند.

بر اساس ارزیابی‌های انجام‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب دو سیستم RMR و GSI در تحلیل‌های ژئومکانیکی پروژه‌های سدسازی، دید جامع‌تر و واقع‌بینانه‌تری نسبت به وضعیت پایداری و رفتار توده‌سنگ فراهم می‌کند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی قابل اعتماد برای طراحی سازه‌های زیرسطحی، انتخاب روش‌های مناسب پایداری و تصمیم‌گیری‌های فنی در مراحل اجرایی سد هراز مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از شرکت مهندسين مشاور مه‌اب قدس و شرکت مهندسين مشاور پندام که در مراحل مختلف این پژوهش همکاری نمودند سپاسگزاری می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و گردآوری داده‌ها، تحلیل، راهنمایی و نظارت، ویراستاری متن، تکمیل و جمع‌آوری داده‌ها.

منابع

Alejano, L. (2024). Rock mass classification systems: A useful rock mechanics tool, often misused. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04087-y>

Alijani, A., Ajallouian, R., Arbabi, A., & Dodangeh, R. (2024). Optimization of rock mass rating (RMR) classification for jointed rocks for underground structures. *Tunneling & Underground Space Engineering*, 11(4), 425–440.

- Al-Jawadi, A., Mohammad, F. O., & Jaafar, I. M. (2025). The quantification of the geological strength index (GSI): A review. *Iraqi National Journal of Earth Sciences*, 25(2), 253–267. <https://doi.org/10.33899/earth.2024.145397.1196>
- Arianto, B., Indrawan, I. G. B., & Warmada, I. (2023). Multi-rock mass classification systems for the assessment of excavation method and support design of spillway tunnel, Sidan Dam, Bali, Indonesia. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346802004>
- ASTM International. (2002). *Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens* (ASTM D2938-95).
- ASTM International. (2004). *Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurements* (ASTM D2664-04).
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Wiley.
- Feng, Y., Song, Y., Xue, H., & Dai, X. (2025). Geological strength index (GSI) prediction using Lugeon values and depth parameters: Case study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(5), 321–336. <https://doi.org/10.1007/s10064-025-04244-9>
- Hassanpour, J., Khoshkar, A.S., Farasani, M.G. et al. (2022). Investigating the relationships between rock mass classification systems based on data from mechanized tunneling projects in Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81, 147. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02641-y>
- He, P., Li, Z. K., Jiang, F., & Wang, G. (2025). Quick and reliable approach for rating underground engineering rock mass based on RMR system. *Applied Geophysics*, 22, 447–460. <https://doi.org/10.1007/s11770-024-1131-6>
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186.
- Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 203–215.
- KhazarAb Consulting Engineers Company. (2015). National Water and Wastewater Engineering Company of Iran.
- Mahab Ghods Consulting Engineers Company. (2014). *Rock mechanics report for the second phase design studies of the Haraz Dam body and power plant*. Mazandaran Regional Water Company.
- Mahouti, A., & Katebi, H. (2018). Classification of carbonated soils from geotechnical point of view (Case study: Marly soils of Tabriz). *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(3), 51–59. <https://doi.org/10.22034/CEEJ.2018.8240>
- Nazari, H., Farokhinassab, K., Esmailzadeh, M., Hajizadeh, F., & Moomivand, H. (2020). Engineering classify and estimation of the geomechanical parameters of rock masses at the Chamshir Dam site. *Journal of Science and Engineering Elites*, 5(1), 124–131.
- Park, J. S., Go, Y. W., & Oh, T. M. (2025). Evaluating the relationship between RMR and Q-system for improved classification of faulted rocks and weak rocks. *Scientific Reports*, 15(1), 191–204. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01985-1>
- Rezaei, H., & Khamecheian, M. (2016). Investigation of position marlstone in rock mass engineering classification system: Case study of Doosti Dam. *Journal of Engineering Geology*, 10(2), 3427–3444. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.10.2.3427>
- Shalabi, F. I., Cording, E. J., & Al-Hattamleh, O. H. (2007). Estimation of rock engineering properties using hardness tests. *Engineering Geology*, 90(3–4), 261–273. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.12.006>
- Süssli, P. E. (1976). *The geology of the lower Haraz valley area, central Alborz, Iran* (Geological Survey of Iran Report No. 38, pp. 114–116). Geological Survey of Iran.
- Zhang, X. P., Wong, L. N., Wang, S., & Geng-You, H. (2011). Engineering properties of quartz mica schist. *Engineering Geology*, 121(3–4), 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.04.020>