نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال چهارم / شماره سیزدهم / تابستان ۱۳۹۶

Journal of Dam and Hydroelectric Power Plant
4rd Year / No. 13 / March 2017

ارزیابی آماری پارامترهای مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ
مطالعه موردی تونل‌های تحت‌فشار طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد

هادی جابری[۱]
مسعود چراغی سیف‌آباد*[۲]
محمود بهنیا[۳]

چکیده

هم‌زمان با پیشرفت دانش بشری، استفاده از فضاهای زیرزمینی به‌ویژه به‌عنوان محل ساخت نیروگاه‌های برق‌آبی رو به افزایش است. به‌منظور طراحی و ساخت این فضاهای زیرزمینی، شناخت خواص توده‌سنگ کاملاً ضروری است. پارامترهای ورودی برای طراحی فضاهای زیرزمینی مانند پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ (C و φ) و ضریب تغییرشکل‌پذیری را نمی‌توان به‌طور دقیق تعیین نمود. عدم‌قطعیت موجود در این پارامترها برخی ذاتی و برخی دیگر به دلیل عدم آگاهی یا درک درست از این پارامترها است. برای کمّی کردن اثر این عدم‌قطعیت‌ها در طراحی فضاهای زیرزمینی باید از روش‌های آماری استفاده نمود. در این مطالعه از یک روش آماری به‌منظور تعیین شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) توده‌سنگ استفاده شده است و توزیع حجم بلوک (V_b) و عامل شرایط سطح درزه (Jc) که به‌عنوان عوامل مشخصه کمّی در تعیین مقدار GSI می‌باشند، تعیین‌شده‌اند. این روش بر اساس ارتباط بین شرایط زمین‌شناسی توصیفی و پارامترهای قابل‌اندازه‌گیری میدانی مانند فاصله‌داری و زبری درزه‌ها که متغیرهای تصادفی هستند بنا نهاده شده است. با استفاده از توزیع GSI به‌دست‌آمده از برداشت‌های میدانی و ترکیب با خواص مقاومتی سنگ بکر که آن‌ها نیز به‌صورت آماری ارائه‌شده‌اند، تابع توزیع آماری پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ و مدول تغییرشکل‌پذیری آن، با استفاده از روش مونت‌کارلو در نرم‌افزار @RISK برای توده‌سنگ‌های دربرگیرنده تونل‌های تحت‌فشار طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد برآورد شده است و در ادامه ظرفیت توده‌سنگ برای مشارکت در تحمل فشار داخلی وارده در تونل‌های تحت‌فشار مورد ارزیابی قرارگرفته است.

کلید واژه‌ها

عدم‌قطعیت، پارامترهای ژئومکانیکی، پارامترهای مقاومت برشی، طبقه‌بندی GSI، روش مونت‌کارلو

۱ . کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اصفهان
۲ *. دانشیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اصفهان cheraghi@cc.iut.ac.ir
۳ . استادیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۱۶

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]

مقدمه

در سال‌های اخیر ساخت نیروگاه‌های بزرگ زیرزمینی، ضرورت ساخت شفت[1] و تونل‌های تحت‌فشار[2] برای انتقال آب از آبگیرها[3] به این نیروگاه‌ها را ایجاد نموده است. هدف اصلی در طراحی این سازه‌ها که از واحدهای زمین‌شناسی مختلف و اعماق گوناگون قبل از رسیدن به نیروگاه عبور می‌نمایند، انتقال آب با ایمنی کافی و بدون ایجاد تأثیرات زیان‌آور به محیط اطراف خود در زمان بهره‌برداری پروژه می‌باشد. این تأثیرات شامل تراوش آب از تونل، ناپایداری دیواره‌ها و ایجاد شکستگی در توده‌سنگ است. با انتخاب مناسب یک پوشش بتنی یا فلزی و همچنین اتخاذ تدابیر مناسب برای تونل تحت‌فشار در هر قسمت و متناسب با شرایط زمین‌شناسی موجود می‌توان این تأثیرات مخرب را کنترل نمود. برای انتخاب این پوشش مناسب ضروری است که شرایط زمین‌شناسی موجود در امتداد تونل‌های تحت‌فشار به‌خوبی شناخته شود و واکنش واحدهای دربرگیرنده تونل نسبت به نیروهای هیدرولیکی موجود تحلیل گردد. همچنین برای استفاده از ظرفیت توده‌سنگ برای تحمل قسمتی از بار وارده و تقسیم بار[4] بین پوشش و توده‌سنگ، شناخت مشخصات و کیفیت توده‌سنگ دربرگیرنده تونل‌ها ضرورت پیدا می‌کند. هرچند نوع پوشش (بتنی یا فلزی) توسط مقدار و توزیع تنش‌های برجا تعیین می‌شود ولی ضخامت پوشش با توجه به مقدار فشار داخلی و مشخصات توده‌سنگ دربرگیرنده تعیین می‌شود. تغییرات زمین‌شناسی و واکنش واحدهای دربرگیرنده تونل‌ها به‌خوبی با پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ که مهم‌ترین و کلیدی‌ترین عوامل مؤثر بر تحلیل پایداری تونل‌های تحت‌فشار هستند نشان داده می‌شوند. تعیین خصوصیات توده‌سنگ، از مهم‌ترین فعالیت‌هایی است که همواره در مطالعات مکانیک سنگ از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. لازم به ذکر است این پارامترها به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل‌سازی‌های عددی به‌طور گسترده استفاده می‌شوند.

هرچند این پارامترها را می‌توان از آزمون‌های برجا تعیین کرد اما در مراحل اولیه طراحی به دلیل مسائل اقتصادی و همچنین عدم دسترسی به محل سازه‌های زیرزمینی، تعیین این پارامترها برای استفاده در تحلیل‌ها عملی نیست.

در مهندسی سنگ به دلیل هزینه زیاد آزمایش‌های موردنیاز، اغلب تعداد داده‌ها متناسب با تغییرات و شرایط واقعی زمین نبوده و ازاین‌رو نتایج همیشه دارای عدم‌قطعیت هستند. لازم به ذکر است عدم‌قطعیت ذاتی است و در طبقه‌بندی توده‌سنگ غیرقابل‌اجتناب است. عدم‌قطعیت به انواع مختلفی همانند عدم‌قطعیت وابسته به اتفاقات ذاتی[5]، تغییرات طبیعی، نداشتن اطلاعات و آگاهی در مورد اتفاقات و روند آن و همچنین عدم‌قطعیت به دلیل ناتوانی در تصمیم‌گیری درست تقسیم می‌شوند. عوامل رایج ایجاد عدم‌قطعیت در مهندسی سنگ شامل متغیر بودن خواص توده‌سنگ در ابعاد مکان و زمان (پدیده خزش)، خطاهای اتفاقی و سیستماتیک در برداشت داده‌ها و انجام آزمایش‌ها و رفتارسنجی توده‌سنگ، ساده‌سازی مدل‌های عددی و تحلیلی و همچنین خطاهای انسانی می‌باشد. به‌عنوان مثال فاصله‌داری درزه‌ها به‌طور قابل‌توجهی در یک فضا متغیر است (تغییرات مکانی) و یا اینکه نمی‌توان یک مقدار ثابتی را به‌عنوان مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر درنظر گرفت (تصادفی). ازاین‌رو روش مناسب برای مقابله با عدم‌قطعیت، ارزیابی و مدیریت خطرات مربوط به عدم‌قطعیت است که می‌بایست این میزان عدم‌قطعیت در فرآیند تصمیم‌گیری درنظر گرفته شود. امروزه از مفاهیم آماری و احتمالاتی برای تشریح و توصیف تغییرپذیری پارامترهای ورودی انتخاب‌شده استفاده می‌کنند. مزیت این روش‌ها، تأکید بر موارد مجهول و ناشناخته‌ای است که در تحلیل پایداری سازه‌ها تأثیرگذار هستند (کای، ۲۰۱۱). با توجه به تغییرات طبیعی توده‌سنگ، روش‌های آماری از روش‌های قطعی واقعی‌تر هستند. برای برآورد قطعی خواص توده‌سنگ معمولاً از مقدار میانگین خواص توده‌سنگ استفاده می‌شود اما در برآورد آماری امکان درنظر گرفتن محدوده کامل اطلاعات مربوط به خواص تصادفی توده‌سنگ وجود دارد (ساری[6] و همکاران، ۲۰۱۰).

1. Shaft
2. Pressure tunnels
3. Power intake
4. Load sharing
5. Inherent randomness
6. Sari

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]

روش‌های آماری معمولاً برای مقابله با عدم‌قطعیت ناشی از ماهیت تصادفی هندسه توده‌سنگ و تغییرات خواص ژئومکانیکی آن به‌کاربرده می‌شوند. روش آماری اولین بار برای توضیح تغییرات ذاتی (طبیعی) مقاومت مواد ترد (شکننده) توسط وایبل[1] (۱۹۳۹) استفاده شد. پس‌ازآن استفاده از روش‌های آماری برای ارزیابی خصوصیات توده‌سنگ در علم مهندسی سنگ موردتوجه قرار گرفت. در ادامه از روش‌های آماری برای ترسیم توزیع فضایی درزه‌های موجود در توده‌سنگ استفاده شد و مشخص شد که فاصله‌داری درزه‌ها عمدتاً از توزیع نمایی پیروی می‌کند (ساری ۲۰۰۹). کیم[2] و گائو[3] (۱۹۹۸)، از روش مجذور کای[4] (χ^2) برای تعیین تابع توزیع تغییرات طبیعی پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ استفاده نمودند. هوک[5] (۱۹۹۸) با استفاده از روش مونت‌کارلو و توزیع‌های نرمال فرض شده برای پارامترهای ورودی معیار هوک و براون، اقدام به تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ نمود. ساری[6] (۲۰۰۹) مطابق با روش هوک بررسی‌هایی را با تعداد محدودی داده آماری انجام داد؛ اما به‌جای فرض توزیع نرمال برای متغیرهای ورودی استفاده‌شده در معیار هوک-براون، توزیع‌های آماری واقعی خواص ناپیوستگی‌ها و پارامترهای مقاومت سنگ بکر را درنظر گرفت. ساری همچنین در سال ۲۰۱۰ و در ادامه کارهای قبلی با استفاده از روش مونت‌کارلو اقدام به برآورد خواص توده‌سنگ نمود. بدین منظور توزیع‌های آماری مناسب برای پارامترهای ناپیوستگی‌ها و سنگ بکر یک ساختگاه موردنظر به‌عنوان ورودی در سیستم طبقه‌بندی RMR لحاظ شدند. در سال ۲۰۱۱ کای از روش مونت‌کارلو و سیستم GSI برای توصیف توده‌سنگ و برآورد پارامترهای ورودی موردنیاز در تحلیل‌های عددی استفاده کرد. از میان سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ (RQD، RMR، Q و GSI)، سیستم GSI عملاً تنها سیستم طبقه‌بندی است که دارای یک ارتباط مستقیم با پارامترهای طراحی مثل پارامترهای معیار موهر-کولمب، پارامترهای مقاومتی هوک-براون یا مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ می‌باشد. هرچند که استفاده از سیستم GSI به دلیل کیفی بودن پارامترهای ورودی آن نیاز به تجربه زیاد دارد (کای[7] و همکاران، ۲۰۰۴). در سال ۱۳۹۲ ربیعی با استفاده از روش مونت کارلو، پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های معدن گل گهر سیرجان را برآورد نمود.

با توجه به گسترش فعالیت‌های عمرانی و همچنین افزایش عمق و ابعاد سازه‌های زیرزمینی در ایران به‌ویژه نیروگاه‌های برق‌آبی زیرزمینی، ضرورت استفاده از روش‌های آماری و بررسی عدم قطعیت‌های موجود در برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های دربرگیرنده چنین سازه‌های مهمی، بیش از پیش احساس می‌شود. بدین منظور در این مطالعه بر اساس برداشت‌های زمین‌شناسی و نیز زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته در تونل‌های دسترسی اطراف مغار نیروگاه، حجم بلوک و عامل شرایط سطح درزه که به‌عنوان عوامل مشخصه کمی مورداستفاده در این مطالعه می‌باشند محاسبه شده‌اند. در ادامه با تعیین تغییرات شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، عدم‌قطعیت‌ها و تغییرات پارامترهای مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ دربرگیرنده تونل‌های تحت‌فشار طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد با استفاده از روش مونت‌کارلو و بر اساس معیار شکست هوک- براون موردبررسی قرارگرفته است.

پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ

پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ را می‌توان از معیار گسیختگی هوک و براون اصلاح‌شده (هوک و همکاران، ۲۰۰۲) برای توده‌سنگ درزه‌دار به دست آورد (پیوست ۱). به‌منظور تخمین پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ درزه‌دار با استفاده از معیار گسیختگی هوک و براون به سه پارامتر شامل ثابت هوک-براون برای سنگ بکر (m_i)، مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر (σ_{ci}) و شاخص مقاومت زمین‌شناختی (GSI) نیاز است (هوک و بروان، ۱۹۹۷).

تعیین پارامترهای توده‌سنگ با استفاده از سیستم

1. Weibull
2. Kim
3. Kim & Gao
4. Chi-square
5. Hoek
6. Sari
7. Cai

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]

طبقه‌بندی GSI

شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) که توسط هوک و همکاران (۱۹۹۲ و ۱۹۹۵) معرفی شده است سیستمی را برای ارزیابی میزان کاهش مقاومت توده‌های سنگی، در شرایط مختلف زمین‌شناسی، ارائه می‌نماید. پارامترهای ورودی این سیستم میزان درزه‌داری توده‌سنگ (ابعاد بلوک) و شرایط سطح درزه‌ها است. همان‌گونه که بیان شد GSI تنها سیستمی است که یک مجموعه کامل از خواص مکانیکی توده‌سنگ پارامترهای مقاومتی هوک – براون (m_b و s) (پیوست ۱) و پارامترهای موهر-کلمب (c و Ø) (پیوست ۲) و مدول تغییرشکل‌پذیری (E) (پیوست ۳) را برای طراحی فراهم می‌کند.

نمودار اولیه شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر اساس مشاهده توده‌سنگ توسط افراد باتجربه و ماهر توسعه یافته است. هنگامی‌که این افراد در دسترس هستند استفاده از نمودار GSI بر اساس رده‌بندی توصیفی ساختار توده‌سنگ و شرایط سطح ناپیوستگی مناسب است. با افزایش استفاده از سیستم GSI هوک و همکاران (۲۰۱۳) روشی را برای محاسبه کمی GSI بر اساس عامل شرایط سطح درزه ($JCond_{89}$) و RQD ارائه دادند. در ادامه برای آسان شدن استفاده از این سیستم توسط افراد کم‌تجربه، کای و همکاران (۲۰۰۴) یک روش کمی که در آن V_b حجم بلوک و J_c عامل شرایط سطح درزه به‌عنوان عوامل مشخصه کمّی مورداستفاده در برآورد GSI هستند را ارائه نمودند. لازم به ذکر است که این روش کمّی با داده‌های آزمایش‌ها برجا اعتبارسنجی شده است. نمودار کمّی GSI در شکل ۱ ارائه شده است.

در این روش، ابعاد بلوک که یک شاخص بسیار مهم از کیفیت توده‌سنگ است از فاصله‌داری، جهت‌داری، تعداد و تداوم درزه‌ها تبعیت می‌کند. ابعاد بلوک که عملاً بیان‌کننده چگالی حجمی ناپیوستگی‌های توده‌سنگ است با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (پالمستروم، ۱۹۹۵):

$$V_b = \frac{s_1 s_2 s_3}{\sin\gamma_1 \sin\gamma_2 \sin\gamma_3} \qquad (۱)$$

که در آن S_i و γ_i به ترتیب فاصله‌داری درزه‌ها در یک دسته‌درزه و زاویه بین دسته‌درزه‌ها است (شکل ۲). در محاسبه حجم بلوک فرض می‌شود که سه دسته‌درزه وجود داشته و این درزه‌ها تداوم داشته باشند.

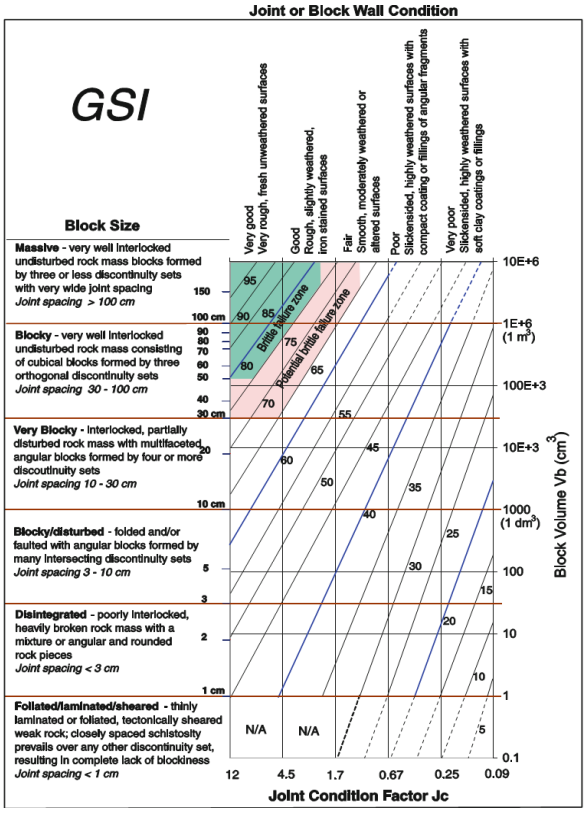
اگر درزه‌ها تداوم نداشته باشند مقاومت توده‌سنگ و پایداری کلی آن افزایش می‌یابد. عامل تداوم درزه P_i به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_i = \begin{cases} \frac{L_i}{L}, & L_i < \mathrm{L} \\ 1, & L_i \geq \mathrm{L} \end{cases} \qquad (۲)$$

که در آن L_i طول درزه i در صفحه برداشت و L طول خط برداشت است. حجم بلوک با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (کای و همکاران (۲۰۰۴)):

$$V_b = \frac{s_1 s_2 s_3}{\sqrt[3]{p_1 p_2 p_3}.\sin\gamma_1 \sin\gamma_2 \sin\gamma_3} \qquad (۳)$$

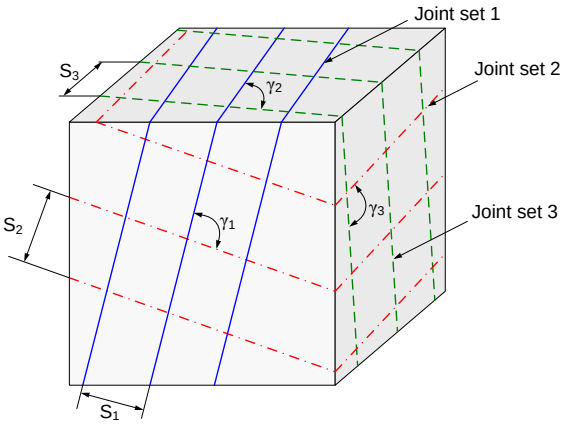
در سیستم GSI، وضعیت سطح درزه‌ها با استفاده از زبری، هوازدگی و نوع مواد پرکننده آن‌ها بیان می‌شود که ترکیبی از این عوامل مقاومت سطح درزه را تعیین می‌کند.



شکل ۱ : نمودار GSI کمی شده (کای و همکاران،۲۰۰۴)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]



شکل ۲: مشخص کردن ابعاد بلوک با استفاده از سه دسته‌درزه (پالمستروم، ۱۹۹۵)

ضریب شرایط درزه J_c از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$J_c = \frac{J_w \cdot J_s}{J_A} \qquad (۴)$$

که در آن J_w معرف موجدار بودن سطح در مقیاس بزرگ، J_S نشان‌دهنده سطوح صاف در مقیاس کوچک و J_A عامل هوازدگی درزه‌ها است. مقدار این پارامترها را می‌توان با توجه به جداول ارائه‌شده توسط پالمستروم (۱۹۹۵) به دست آورد.

بر اساس نمودار کمّی ارائه‌شده در شکل ۱ و با استفاده از روش برازش سطح، کای و کایزر (۲۰۰۶) معادله زیر را برای محاسبه GSI از J_c و V_b ارائه نمودند.

$$GSI = \frac{26.5 + 8.79 \ln J_c + 0.9 \ln V_b}{1 + 0.0151 \ln J_c - 0.0253 \ln V_b} \qquad (۵)$$

که در آن J_c یک پارامتر بدون بعد و V_b حجم بلوک برحسب cm^3 است. توزیع آماری پارامتر GSI را با استفاده از روش مونت‌کارلو و با به‌کارگیری متغیرهای فاصله‌داری درزه، جهت‌داری درزه، تداوم درزه و عامل شرایط سطح درزه می‌توان برآورد نمود و در ادامه با برآورد توزیع آماری سه پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر (σ_{ci})، ثابت هوک- براون (m_i) و مدول الاستیک سنگ بکر (E_i) و استفاده از روابط ارائه‌شده در پیوست ۱، ۲ و ۳، توزیع آماری پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ و مدول تغییر شکل‌پذیری آن را محاسبه نمود.

تعیین توزیع احتمال پارامترهای مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری با استفاده از شبیه‌سازی

روش‌های شبیه‌سازی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در تحلیل احتمالاتی و بررسی قابلیت اعتماد در علوم مهندسی ازجمله مهندسی مکانیک سنگ و ژئوتکنیک هستند. از این میان، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو که بر اساس ورودی تصادفی پایه‌ریزی شده کاربرد وسیع‌تری نسبت به سایر روش‌ها پیداکرده است.

هنگامی‌که توزیع هر متغیر مشخص است و متغیر خروجی وابسته به متغیر ورودی است می‌توان از روش مونت‌کارلو استفاده کرد (هوک، ۲۰۰۰). روش مونت‌کارلو برای سامانه‌های پیچیده غیرخطی با درجه عدم‌قطعیت زیاد و سامانه‌های با ورودی‌های نامعین با موفقیت به کار می‌رود. ایراد روش مونت‌کارلو انجام شبیه‌سازی‌های زیاد و محدودیت آن ضرورت مشخص بودن توزیع آماری متغیرهای ورودی است. هنگامی‌که هیچ‌گونه اطلاعاتی در خصوص نوع توزیع داده‌ها موجود نباشد، توزیع نرمال یا توزیع نرمال ناقص به‌صورت معمول برای آن‌ها فرض می‌شود (هوک، ۲۰۰۰). لازم به ذکر است که با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته‌ای نظیر @RISK که در این تحقیق مورداستفاده قرارگرفته، می‌توان بر مشکلات ناشی از تعداد نمونه‌های بسیار زیاد غلبه کرد.

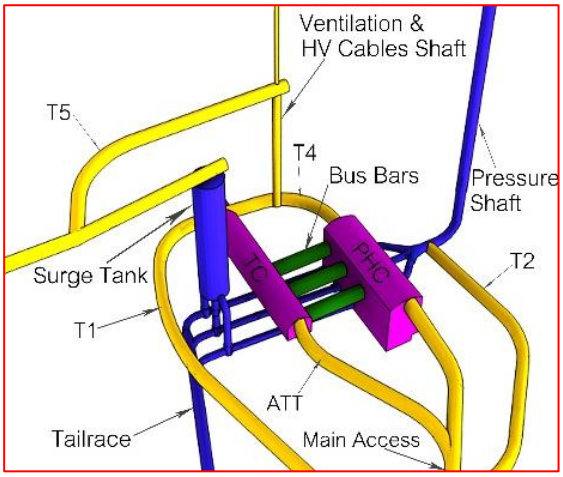
@RISK به‌عنوان یک نرم‌افزار قدرتمند در تحلیل ریسک پروژه‌ها به شمار می‌رود و به‌صورت یک نرم‌افزار افزودنی بر روی نرم‌افزار اکسل نصب می‌شود. درنتیجه تلفیق @RISK با قابلیت‌های اکسل، کاربر قادر خواهد بود برای طراحی مدلی به‌منظور برآوردن نیازهای تحلیل ریسک با بهترین نحوه ممکن اقدام نماید. به‌طورکلی @RISK برنامه‌ای است که از عدم‌قطعیت پارامترهای ورودی برای تولید نحوه توزیع پارامتر خروجی استفاده می‌کند. این برنامه امکان اجرای مستقیم و ساده روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به همراه معیار گسیختگی اصلاح‌شده هوک-براون را فراهم می‌کند و به کاربر اجازه ارزیابی تغییرات خواص توده‌سنگ را می‌دهد. همچنین می‌توان تأثیر تغییرات متغیرهای ورودی بر پارامترهای توده‌سنگ را مشاهده نمود (غیاث، ۱۳۹۳).

مطالعه موردی تونل‌های تحت‌فشار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد

طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد در استان کردستان و در

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]

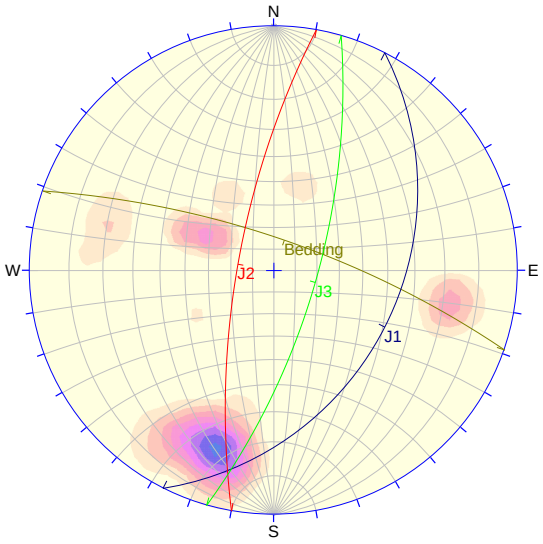
مجاورت رودخانه کوماسی (چم گوره) از سرشاخه‌های مهم رودخانه سیروان در حال احداث است. این طرح حدود ۷۵ کیلومتر از سنندج فاصله دارد و دارای سه واحد نیروگاه با ظرفیت نصب هر واحد ۱۷۰ مگاوات است. مجموعه‌ای از فضاهای زیرزمینی ازجمله یک شفت تحت‌فشار به طول حدود ۴۵۰ متر به همراه سه تونل تحت‌فشار قبل از مغار نیروگاه قرار دارند (شکل ۳). توده‌سنگ دربرگیرنده ساختگاه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد شامل ماسه‌سنگ کمی دگرگون‌شده با میان‌لایه‌هایی از شیست و فیلیت (K^{ss}) است. لایه‌های ماسه‌سنگی دارای ضخامت چندین سانتی‌متر تا حداکثر ۱ متر هستند که دارای دو دسته‌درزه به همراه یک لایه‌بندی می‌باشند (شکل ۴) (مهندسین مشاور مهاب قدس، ۱۳۹۲). در شکل شماره ۵ تصویر استرویگرافیک ناپیوستگی‌های برداشت‌شده در اطراف سازه‌های زیرزمینی اصلی نشان داده‌شده است. میانگین زاویه بین آن‌ها به ترتیب ۷۷، ۸۴ و ۷۵ درجه برآورد شده است.



شکل ۳: جانمایی سازه‌های زیرزمینی طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد



شکل ۴: واحد ماسه‌سنگی موجود در محل سازه‌های زیرزمینی طرح تلمبه ذخیره‌ای آزاد که در سطح زمین رخنمون یافته



شکل ۵: تصویر استریوگرافیک ناپیوستگی‌های واحد K^{SS} در محل مغار نیروگاه

اغلب پارامترهای مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری مورداستفاده در علم ژئومکانیک همانند مقاومت فشاری تک‌محوره، چسبندگی، زاویه اصطکاک و مدول یانگ معمولاً از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. انواع دیگر توزیع‌ها مانند لاگ نرمال، وایبل و پواسون برای پارامترهای موردنیاز دیگر کاربرد دارند. فاصله‌داری درزه‌ها که به همراه پایایی[1] آن‌ها، بیشترین اهمیت را در تعیین ابعاد بلوک دارد و کنترل‌کننده کیفیت توده‌سنگ است از توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کند (پاسکال و همکاران (۱۹۹۷)، راف[2] و همکاران (۱۹۹۸)، ساری[3] (۲۰۰۹)، سیمپسون[4] (۲۰۰۰) و اودن و همکاران[5] (۲۰۰۷)). برخی محققین مانند لمی و حاجی گئورگیو[6] (۲۰۰۳) و ژانگ و انیشتین[7] (۱۹۹۸) نشان دادند که فاصله‌داری از توزیع نمایی منفی و لاگ نرمال پیروی می‌کند و اساساً وابسته به حداقل طول اندازه‌گیری شده یعنی کمترین طول ناپیوستگی در معرض دید می‌باشد که توسط اپراتور اندازه‌گیری شده است. اگر طول اندازه‌گیری حداقل، کوچک باشد (مثلاً ۱۰ میلی‌متر) فاصله‌داری از توزیع نمائی پیروی می‌کند و اگر طول اندازه‌گیری حداقل، بزرگ باشد (مثلاً ۵۰

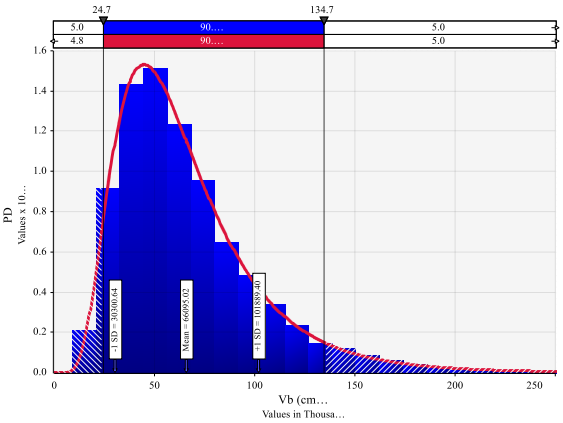
1. persistent
2. Ruf et al
3. Sari
4. Simpson
5. Odonne et al
6. Lemy & Hadjigeorgiou
7. Zhang & Einstein

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]

سانتی‌متر)، تعداد زیادی از ناپیوستگی‌های کوچک در برداشت‌های میدانی نادیده گرفته می‌شود و بنابراین فاصله‌داری ناپیوستگی‌های تعیین‌شده از رخنمون‌ها نشانگر پیروی از توزیع لاگ نرمال است (یی[1] و همکاران، ۲۰۱۲). لازم به ذکر است که توزیع لاگ نرمال به دلیل همخوانی بهتر با داده‌های برداشت‌شده به‌عنوان تابع توزیع آماری فاصله‌داری درزه‌ها انتخاب شد. همچنین در این تحقیق فرض شده که درزه‌ها تداوم داشته و همدیگر را قطع می‌کنند.

لازم به ذکر است که این مطالعه بر اساس برداشت‌های صورت گرفته از درون تونل دسترسی T1 با طول کلی ۳۵۶ متر که حدود ۲۰۰ متر آن در واحد K^{ss} (ناحیه ماسه‌سنگی موردمطالعه) قرار دارد انجام‌شده است (شکل ۳).

میانگین فاصله‌داری برای درزه‌های J_2 و J_1 و لایه‌بندی به ترتیب برابر ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر لحاظ شد که انحراف استاندارد آن‌ها نیز به ترتیب ۹، ۱۲ و ۱۵ سانتی‌متر برآورد شده است (جدول ۱). در ادامه با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تابع توزیع آماری (PDF) حجم بلوک (V_b) برای توده‌سنگ دربرگیرنده مغار نیروگاه با ۵۰۰۰ تکرار محاسبه شد که در شکل ۶ نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حجم بلوک از توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کند.



شکل ۶: تابع توزیع حجم بلوک

بر اساس برداشت‌های میدانی صورت گرفته از درون تونل دسترسی T1، ناپیوستگی‌های موجود در محل به‌طورکلی اندکی هوازده، زبر، صفحه‌ای و با موجداری کم هستند. مقدار میانگین برای موجداری در مقیاس بزرگ (J_w)، صاف (هموار) بودن در مقیاس کوچک (J_s) و هوازدگی درزه‌ها (J_A) به ترتیب برابر ۱/۵، ۲ و ۲ برآورد شد. مشاهدات و برداشت‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که میزان تغییرات این پارامترها کم است و با توجه به اندک بودن تغییرات این پارامترها به دلیل عمق زیاد ناحیه موردمطالعه و از طرفی پیشنهادهای انجام‌شده توسط کای (۲۰۱۱)، ضریب تغییرات برای هر سه پارامتر ۸ درصد فرض شد (جدول ۱). لازم به ذکر است که اگر مقادیر نزدیک به کران باشد باید از توزیع نرمال بریده[2] استفاده کرد. این بریدگی بر اساس مقدار حداکثر و حداقل برای هر پارامتر انجام می‌شود. به‌عنوان‌مثال J_w نباید کوچک‌تر از ۱ و بزرگ‌تر از ۳ باشد درنتیجه توزیع نرمال با میانگین ۲ و انحراف استاندارد ۰/۱۶ که در ۱ و ۳ بریده‌شده، توزیع J_w را نشان می‌دهد. J_c که از رابطه (**Error! Reference source not found.**) تعیین می‌شود در شکل ۷ نشان داده‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که عامل وضعیت درزه از توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کند اما می‌توان به‌خوبی آن را با توزیع نرمال نیز نشان داد.

جدول ۱: پارامترهای ورودی به همراه مشخصات آماری آن‌ها

کمیت	مقدار	توزیع آماری	میانگین	ضریب تغییرات (٪)
فاصله‌داری (cm)	لایه‌بندی	لاگ نرمال	۵۰	۳۰
	J_1		۴۰	۳۰
	J_2		۳۰	۳۰
Jw		نرمال	۱/۵	۸
Js		نرمال	۲	۸
JA		نرمال	۲	۸
Jc		لاگ نرمال	۱/۵۱	۱۴
GSI		لاگ نرمال	۵۴/۸	۴

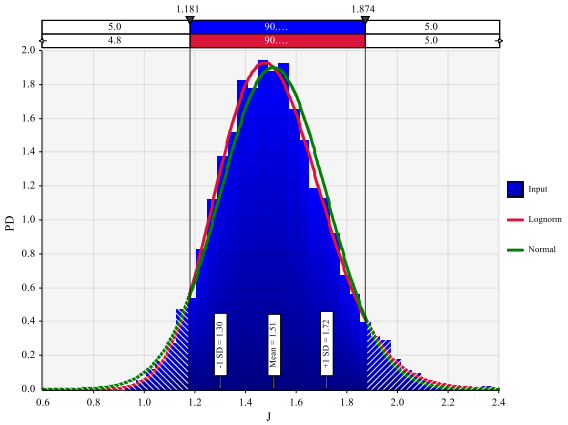
با استفاده از رابطه شماره (۵) GSI از حجم بلوک و عامل شرایط سطح درزه برآورد می‌شود. هرچند که تابع توزیع حجم بلوک و عامل شرایط سطح درزه از توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کنند اما GSI محاسبه‌شده از توزیع نرمال پیروی می‌کند (شکل ۸). میانگین و انحراف استاندارد برآورد شده برای GSI به ترتیب برابر ۵۴/۸ و ۲/۲۴ است.

1.Ye

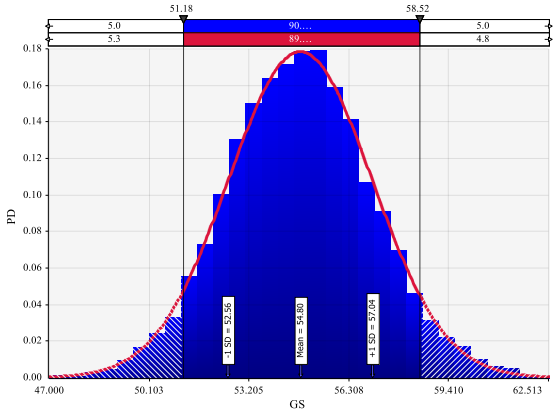
2. Truncated

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]

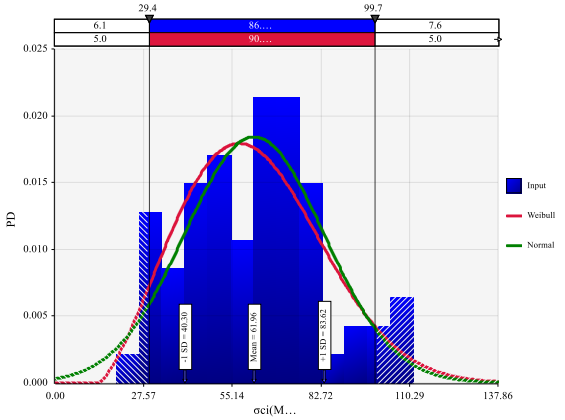


شکل ۷: تابع توزیع لاگ نرمال برای عامل وضعیت درزه



شکل ۵ : تابع توزیع نرمال برای GSI

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره یا نامحصور (UCS) مرسوم‌ترین آزمایش آزمایشگاهی در مطالعات مکانیک سنگ است که باوجود ظاهری ساده، انجام دقیق آن بسیار مشکل است. ۶۴ آزمایش مقاومت فشاری روی سنگ بکر حاصل از گمانه‌های حفاری‌شده در واحد K^{ss} انجام‌شده که در محدوده ۱۹ تا ۱۱۴ مگاپاسکال قرار دارند (مهندسین مشاور مهاب قدس، ۱۳۹۲). نتایج آزمایش‌ها نشانگر تغییرات زیاد مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر است. درنتیجه مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ را نمی‌توان تنها با مقدار میانگین همه مقاومت‌های تعیین‌شده نشان داد. از طرفی با توجه به توزیع فراوانی نمونه‌ها، می‌توان از روش‌های آماری برای نشان دادن تغییرات و توزیع مقاومت فشاری تک‌محوره استفاده کرد. بدین منظور بر اساس اطلاعات آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره، از نرم‌افزار @RISK برای تعیین تابع توزیع مقاومت فشاری تک‌محوره استفاده شد. بر این اساس میانگین مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_{ci}) برابر ۶۱/۹۶ مگاپاسکال و انحراف استاندارد آن ۲۱/۴۵ مگاپاسکال برآورد شد. تابع چگالی آماری مقاومت فشاری تک‌محوره در شکل ۹ ارائه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که توزیع وایبل بهترین برازش بوده اما توزیع نرمال نیز می‌تواند به‌خوبی آن را پوشش دهد که البته لازم است مقادیر منفی آن در این حالت حذف گردد.



شکل ۹: تابع توزیع مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_{ci})

بر اساس نتایج آزمایش سه محوره گزارش‌شده، ثابت m_i برابر ۱۳ برآورد شده است (مهندسین مشاور مهاب قدس، ۱۳۹۲). عدم‌قطعیت m_i معمولاً کم است و ضریب تغییرات آن برای انواع سنگ‌ها حدود ۵ تا ۱۰ درصد است. این پارامتر در معادله هوک - براون مؤلفه مقاومت اصطکاکی را توصیف می‌نماید و از طرفی نتایج نشان می‌دهد که تغییرات زاویه اصطکاک کم و حدود ۵ تا ۱۰ درصد است (کای، ۲۰۱۱). درنتیجه با فرض ضریب تغییرات ۱۰ درصد، انحراف استاندارد این پارامتر ۱/۳ محاسبه شد و همچنین فرض شد که m_i از توزیع نرمال پیروی می‌کند. لازم به ذکر است که با توجه به آتشباری کنترل‌شده در حفاری مغارها، ضریب اغتشاش توده‌سنگ (D) صفر درنظر گرفته‌شده است.

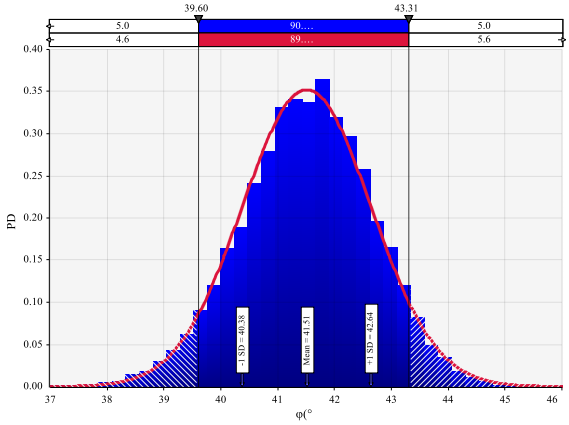
در ادامه با استفاده از توابع توزیع σ_{ci}، m_i و GSI، تابع چگالی آماری برای پارامترهای مقاومتی هوک-براون m_b، a و s بر اساس روابط شماره ۷، ۸ و ۹ ارائه‌شده در پیوست و با استفاده از روش مونت کارلو محاسبه شدند که پارامترهای آماری آن‌ها در جدول شماره ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که هر سه ثابت موردمطالعه از توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کنند.

در ادامه و با استفاده از روابط ۱۲، ۱۳ و ۱۴ موجود در

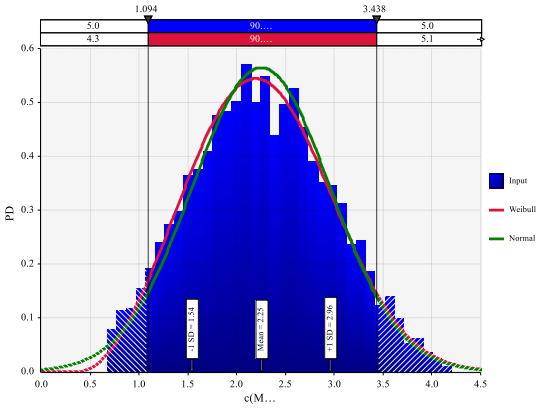
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]

پیوست، توزیع چگالی آماری برای پارامترهای مقاومتی موهر- کولمب (c و φ) برآورد شد. نتایج نشان می‌دهد که زاویه اصطکاک از توزیع نرمال پیروی می‌کند اما چسبندگی دارای بهترین برازش با توزیع وایبل است که با توزیع نرمال نیز می‌توان آن را به‌خوبی نشان داد (اشکال ۱۰ و ۱۱). این مسئله به دلیل تأثیر مقاومت تک‌محوره سنگ بکر است، اگر σ_{ci} از توزیع نرمال پیروی کند چسبندگی نیز از توزیع نرمال پیروی می‌کند. میانگین مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی به ترتیب ۴۱/۵ درجه و ۲/۶ مگاپاسکال و انحراف استاندارد آن‌ها نیز به ترتیب ۱/۱۳ درجه و ۰/۷۱ مگاپاسکال برآورد شده است (جدول ۲).

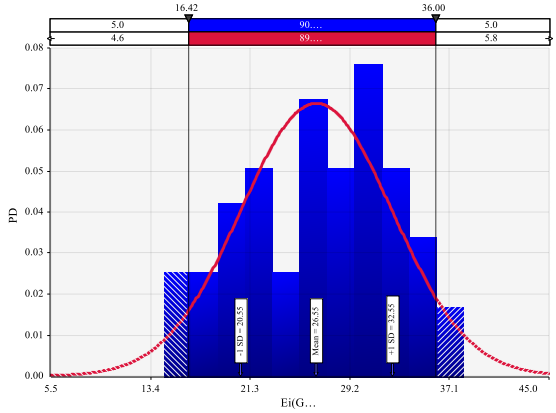


شکل ۱۰ : تابع توزیع زاویه اصطکاک توده‌سنگ (φ)

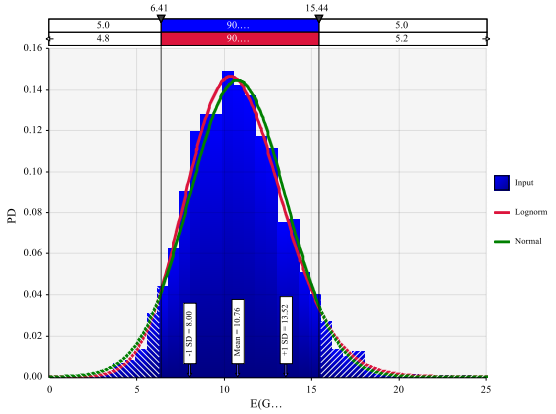


شکل ۱۱ : تابع توزیع چسبندگی (c)

هوک و دیدریش در سال ۲۰۰۶ روش‌های تجربی موجود برای ارزیابی مدول تغییرشکل‌پذیری را موردبررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که این روش‌ها ارزیابی مطمئنی از مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ ارائه نمی‌دهند و ازاین‌رو رابطه جدیدی را برای ارزیابی مدول تغییرشکل- پذیری توده‌سنگ ارائه دادند و در آن از مدول سنگ بکر استفاده کردند (پیوست ۳)؛ بنابراین با استفاده از تابع چگالی آماری مدول سنگ بکر حاصل از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی (شکل ۱۲) تابع توزیع GSI حاصل از برداشت‌های صحرایی، تابع چگالی آماری مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ (E) محاسبه شد (شکل ۱۳). نتایج نشان می‌دهد که مدول توده‌سنگ را به‌خوبی می‌توان با هر دو توزیع لاگ نرمال و نرمال نشان داد؛ بنابراین مدول تغییرشکل‌پذیری ماسه‌سنگ‌های دگرگون‌شده دربرگیرنده سازه‌های زیرزمینی اصلی طرح نیروگاه آزاد دارای میانگین ۱۰/۸ و انحراف استاندارد ۲/۸ گیگاپاسکال می‌باشند؛ بنابراین مدول این توده‌سنگ‌ها در بازه‌ی ۸ تا ۱۳/۵ گیگاپاسکال قرار دارد.



شکل ۱۲ : تابع توزیع مدول تغییرشکل‌پذیری سنگ بکر



شکل ۱۳ : تابع توزیع مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ

میانگین، انحراف استاندارد و ضریب تغییرات پارامترهای مقاومت و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ به‌طور خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است. ضریب تغییرات نشان‌دهنده میزان پراکندگی و تغییرات در مقادیر پارامترهای موردنظر است. به‌گونه‌ای که هر چه مقدار آن کمتر باشد پراکندگی کمتر

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

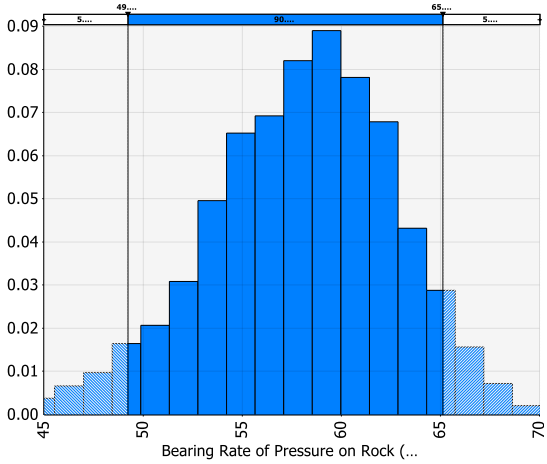
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]

بوده و عدم‌قطعیت نیز کمتر است. مشاهده می‌شود که از میان پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ کمترین میزان تغییرات مربوط به زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ است که ازنظر آماری جامعه یکنواخت‌تری محسوب شده و عدم‌قطعیت آن کمتر است. بیشترین ضریب تغییرات مربوط به مقاومت کششی توده‌سنگ است درنتیجه پراکندگی آن نیز بیشتر است.

جدول ۲: پارامترهای توده‌سنگ دربرگیرنده تونل‌های تحت‌فشار با استفاده از سیستم طبقه‌بندی GSI

ردیف	پارامتر	میانگین	انحراف استاندارد	ضریب تغییرات (٪)
۱	m_b	۲/۵۹	۰/۳۲	۱۲/۴
۲	s	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۱۷	۲۵/۴
۳	a	۰/۵۰۴۲	۰/۰۰۰۶	۰/۱۳
۴	φ (°)	۴۱/۵۱	۱/۱۳	۲/۷
۵	$c(MPa)$	۲/۲۵	۰/۷۱	۳۱/۵
۶	$E(GPa)$	۱۰/۷۶	۲/۷۶	۲۵/۷
۷	$\sigma_t(MPa)$	-۰/۱۶۵	۰/۰۷۷	۴۶/۷

در ادامه به‌منظور برآورد تأثیر تغییرات مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ، شعاع ناحیه خرد شده در اطراف تونل و مدول تغییرشکل‌پذیری این ناحیه، با استفاده از روابط تحلیلی موجود (پیوست ۷-۴) میزان مشارکت توده‌سنگ در تحمل بارهای وارده (λ) در تونل‌های تحت‌فشار پیش بینی شده در ساختگاه طرح تلمبه ذخیره‌ای آزاد موردبررسی قرار گرفت. قطر داخلی تونل تحت‌فشار ۵/۴ متر و قطر حفاری شده آن ۶/۸ متر است. ضخامت پوشش فلزی موردنیاز با توجه به حداکثر فشار داخلی موجود (۷۲۰ متر) ۳/۵ سانتیمتر لحاظ شده است. لازم به ذکر است که برای برآورد مدول تغییرشکل‌پذیری ناحیه دست‌خورده مقدار D برابر با ۰/۸ فرض شد و شعاع این ناحیه نیز با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی ۲ متر درنظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که میزان باری که می‌تواند توسط توده‌سنگ تحمل شود با درجه اطمینان ۹۰٪ بین ۴۹ تا ۶۵ درصد قرار دارد (شکل ۱۴)؛ بنابراین با پذیرفتن ریسک ۵٪ می‌توان مشارکت توده‌سنگ را با توجه به پارامترهای موجود ۴۹ درصد لحاظ کرد.



شکل ۱۴ : توزیع میزان مشارکت توده‌سنگ در تحمل فشار داخلی

نتیجه‌گیری

پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ مانند مدول تغییرشکل-پذیری و پارامترهای مقاومتی آن از مهم‌ترین پارامترهای ورودی به‌منظور انجام تحلیل پایداری و طراحی فضاهای زیرزمینی هستند. به دلیل تغییرات ذاتی و طبیعی توده‌سنگ، این پارامترها همواره دارای عدم‌قطعیت هستند. ازاین‌رو لازم است تا این پارامترها به‌طور مناسبی تعیین و تغییرات آن‌ها در طراحی لحاظ گردد. از طرفی با توجه به تغییرات پارامترهای توده‌سنگ درنظر گرفتن یک مقدار دقیق برای خواص توده‌سنگ مشکل است و در طراحی با روش‌های قطعی مهندسین اغلب با مشکل انتخاب یک مقدار از میان داده‌های زیاد مواجه هستند. ازاین‌رو با استفاده از روش طراحی آماری می‌توان تغییرات پارامترهای توده‌سنگ را لحاظ کرده و بر مشکلات ناشی از روش‌های قطعی غلبه نمود. لازم به ذکر است تغییرات پارامترهای توده‌سنگ ذاتی است.

از سیستم طبقه‌بندی GSI می‌توان برای تعیین پارامترهای طراحی در مهندسی سنگ مانند پارامترهای مقاومتی هوک-براون یا موهر-کلمب و همچنین مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ استفاده نمود. با استفاده از این سیستم می‌توان عدم‌قطعیت موجود در خواص توده‌سنگ ناشی از پارامترهای مقاومت سنگ بکر، فاصله‌داری درزه‌ها و شرایط سطح درزه‌ها را با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی همانند روش مونت‌کارلو برآورد نمود. نتایج شبیه‌سازی آماری توده‌سنگ

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]

در نرم‌افزار RISK@ نشان می‌دهد که پارامترهای مقاومتی هوک-براون (m_b و s) برای توده‌سنگ‌های ماسه‌سنگی دربرگیرنده تونل‌های تحت‌فشار طرح نیروگاه طرح آزاد از توزیع لاگ نرمال، زاویه اصطکاک از توزیع نرمال، چسبندگی و مقاومت کششی از توزیع وایبل و مدول توده‌سنگ از توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کند؛ بنابراین با وارد نمودن توابع توزیع این پارامترها در تحلیل پایداری تونل‌های تحت‌فشار و استفاده از ظرفیت سنگ برای تحمل بار آب موجود در تونل‌ها می‌توان تابع توزیع زون پلاستیک در اطراف آن‌ها را برآورد نمود و در ادامه در مورد سیستم تحکیم موردنیاز (بتن یا پوشش فلزی) و ضخامت موردنیاز آن‌ها اظهارنظر نمود.

پیوست

۷-۱- معیار هوک و براون

معیار هوک و براون اصلاح‌شده برای توده‌سنگ درزه‌دار به‌صورت زیر ارائه شده است (هوک و همکاران، ۲۰۰۲):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m_b\frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a \qquad (۶)$$

که در آن m_b، s و a ثابت‌های توده‌سنگ و σ_{ci} مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر است. هنگامی‌که مقدار GSI مشخص باشد، پارامترهای مقاومت هوک – براون m_b، s و a از روابط زیر محاسبه می‌شوند (هوک و همکاران ۲۰۰۲):

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)} \qquad (۷)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} \qquad (۸)$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right) \qquad (۹)$$

که در آن m_i ثابت هوک–براون برای سنگ بکر و D عامل اغتشاش ناشی از انفجار و آزادسازی تنش‌ها در توده‌سنگ می‌باشد. با فرض مقدار صفر برای σ_3 در رابطه‌ی ۶، مقاومت فشاری تک‌محوره توده‌سنگ به‌صورت زیر برآورد می‌شود:

$$\sigma_c = \sigma_{ci}.s^a \qquad (۱۰)$$

اگر در معیار هوک-براون مقدار $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_t$ قرار داده شود مقاومت کششی به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \qquad (۱۱)$$

۷-۲- پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ

زاویه اصطکاک و چسبندگی توده‌سنگ دو پارامتر موردنیاز در تمامی تحلیل‌های ژئوتکنیکی می‌باشند. این مقادیر از طریق حل رابطه معیار اصلاح‌شده هوک-براون برای محدوده‌ای که تنش اصلی حداقل در بازه‌ی $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{3max}$ قرار دارد، تعیین می‌شود. روابط لازم برای تعیین زاویه اصطکاک و مقاومت چسبندگی به‌صورت زیر ارائه شده‌اند (هوک و همکاران ۲۰۰۲):

$$\varphi = \sin^{-1}\left[\frac{6am_b\left(s+m_b\sigma_{3n}\right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b\left(s+m_b\sigma_{3n}\right)^{a-1}}\right] \qquad (۱۲)$$

$$c = \frac{\sigma_{ci}\left[(1+2a)+(1-a)m_b\sigma_{3n}\right]\left(s+m_b\sigma_{3n}\right)^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+\left(6am_b\left(s+m_b\sigma_{3n}\right)^{a-1}\right)/(1+a)(2+a)}} \qquad (۱۳)$$

که در آن

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{ci}} \qquad (۱۴)$$

در رابطه ۱۴ σ_{3max} حد بالایی تنش محصورکننده است که در آن ارتباط بین معیارهای هوک–براون و موهر-کلمب درنظر گرفته‌شده است.

۷-۳- پارامترهای تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ

مدول تغییرشکل‌پذیری وابسته به مقدار GSI بوده و از رابطه زیر برآورد می‌شود (هوک و همکاران، ۲۰۰۲):

$$E = \left(1-\frac{D}{2}\right)\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}\ (GPa) \qquad (۱۵)$$

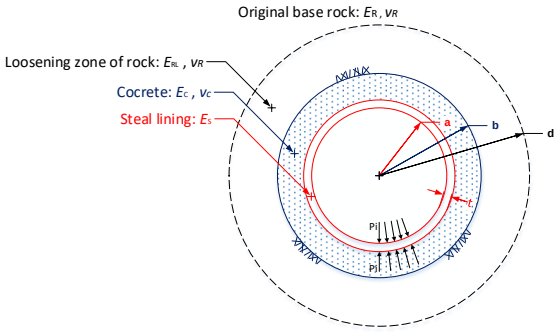
وجود σ_{ci} در رابطه ۱۵ نشان‌دهنده تأثیر غیرمستقیم مدول سنگ بکر (E_i) بروی مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ است، زیرا بین E_i و σ_{ci} یک رابطه مستقیم وجود دارد. درنهایت مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ درزه‌دار توسط هوک و دیدریش (۲۰۰۶) به‌صورت زیر ارائه شده است:

$$E_{rm} = E_i\left(0.02 + \frac{1-D/2}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}}\right) \qquad (۱۶)$$

۷-۴- اندرکنش سنگ، بتن و پوشش فلزی

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]



شکل ۱ – پارامترهای طراحی تحلیلی پوشش فلزی

$$\lambda = \frac{C_1 C_2}{C_1 C_2 + (C_2 C_3 - C_4) t'} \qquad ۱۷$$

$$C_1 = \frac{E_{RL}}{E_R},\ C_2 = \frac{\left(\frac{d}{b}\right)^2 + 1}{\left(\frac{d}{b}\right)^2 - 1} - \nu_R + (1+\nu_R) C_1$$

$$C_3 = C_1 \frac{E_S}{E_C} \ln\frac{b}{a} + \frac{E_S}{E_R}\left[\frac{\left(\frac{d}{b}\right)^2 + 1}{\left(\frac{d}{b}\right)^2 + 1}\right] + \nu_R \qquad ۱۸$$

$$C_4 = 4\frac{E_S}{E_R}\frac{\left(\frac{d}{b}\right)^2}{\left[\left(\frac{d}{b}\right)^2 - 1\right]^2}$$

E_R، E_{RL}، E_C، E_S و ν_R به ترتیب مدول سنگ سالم، مدول سنگ خردشده، مدول بتن، مدول پوشش فلزی و نسبت پواسون سنگ می‌باشند. مقادیر a، b و d نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

منابع

۱- ربیعی وزیری، م، (۱۳۹۲)، تحلیل احتمالاتی خواص توده‌سنگ مورد مطالعاتی: معدن آهن شماره یک گل گهر، دانشکده فنی و مهندسی بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- غیاث، مجید. مقدمه‌ای بر روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، بسپارش، فصلنامه علمی-ترویجی، سال چهارم، شماره ۱، ص ۷۷-۶۷، ۱۳۹۳.

۳- مهاب قدس، مطالعات مرحله دوم نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد، گزارش مطالعات و طراحی‌های مکانیک سنگ نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۲

4- Cai M, Kaiser PK, Uno H, Tasaka Y, Minami M, (2004), Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 41, no. 1, pp. 3–19.

5- Cai M, (2011), Rock Mass Characterization and Rock Property Variability Considerations for Tunnel and Cavern Design, Rock Mech. Rock Eng. vol. 44, no. 4, pp. 379–399.

6- Cai, M. Kaiser, P. K. (2006), Visualization of rock mass classification systems. Geotechnical and Geological Engineering, 24(4), 1089–1102.

7- Hoek E, (1998), Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 35, no. 1, pp. 63–68.

8- Hoek E, Brown ET, (1997), Practical estimates of rock mass strength. Int J Rock Mech Min Sci 34(8): 1165-86.

9- Hoek E, Carranza-Torres C, Corkum B, (2002), Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition, 5th North Am. Rock Mech. Symp. vol. 1, pp. 267–273.

10- Hoek E, Carter TG, Diederichs MS, (2013), Quantification of the Geological Strength Index Chart, 47th US Rock Mech. Symp.

11- Hoek E, Diederichs MS, (2006), Empirical estimation of rock mass modulus, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 43, no. 2, pp. 203–215.

12- Hoek, E. (2000), Practical Rock Engineering, Evert Hoek Consulting Engineer Inc.

13- Hoek, E. Kaiser P.K. and Bawden W.F. (1995), Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam, Balkema.

14- Hoek, E. Wood D. and Shah S.(1992), A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock '92, (ed. J.A. Hudson), 209-214. London, Brit. Geotech.

15- Kim K, Gao H, (1998), Probabilistic approaches to estimating variation in the mechanical properties of rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. vol. 32, no. 2, pp. 111–120.

16- Lemy F, Hadjigeorgiou J, (2003), Discontinuity trace map construction using photographs of rock exposures, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 40, no. 6, pp. 903–917.

17- Odonne F, Lézin C, Massonnat G, Escadeillas G, (2007), The relationship between joint aperture, spacing distribution, vertical dimension and carbonate stratification: An example from the Kimmeridgian limestones of Pointe-du-Chay (France), J. Struct. Geol. vol. 29, no. 5, pp. 746–758.

18- Palmstrom, A. (1995), RMi-A system for characterising rock mass strength for use in rock engineering. Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology, 1(2), 69–108.

19- Pascal C, Angelier J, Cacas MC, Hancock PL, (1997), Distribution of joints: probabilistic modelling and case study near Cardiff (Wales, U.K.), J. Struct. Geol. vol. 19, no. 10, pp. 1273–1284.

20- Ruf JC, Rust KA, Engelder T (1998), Investigating the effect of mechanical discontinuities on joint spacing, Tectonophysics, vol. 295, pp. 245–257.

21- Sari M. (2009),The stochastic assessment of strength

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]

and deformability characteristics for a pyroclastic rock mass, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 46, no. 3, pp. 613–626.

22- Sari M, Karpuz C, Ayday C, (2010), Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites, Comput. Geosci. vol. 36, no. 7, pp. 959–969.

23- Simpson GDH, (2000), Synmetamorphic vein spacing distributions: Characterisation and origin of a distribution of veins from NW Sardinia, Italy, J. Struct. Geol. vol. 22, pp. 335–348.

24- Weibull W.(1939), A statistical theory of the strength of material. Proc. Roy. Swedish Int. Eng. Res. 151:1.

25- Ye J, Zhang Y, Sun J, Wu F, (2012), Correction of the probabilistic density function of discontinuities spacing considering the statistical error based on negative exponential distribution, J. Struct. Geol. vol. 40, pp. 17–28.

26- Zhang L, Einstein HH, (1998), Estimating the Mean Trace Length of Rock Discontinuities, Rock Mech. Rock Eng. vol. 31, pp. 217–235.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.4.9]