نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هفتم / شماره بیست و چهارم /بهار ۹۹

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
7th Year / No. 24 / June 2020

تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ آهک سازند دالان به روش عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایش‌های برجا (مطالعه موردی: نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان)

مجتبی مصفّا[۱]
علی عالی‌انوری*[۲]
عباس کمالی بندپی[۳]

چکیده

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در طراحی سازه‌های مهندسی، قابلیت تغییر شکل توده‌سنگ است. از آنجا که تعیین این مدول به روش مستقیم توسط آزمایش‌های برجا زمان‌بر، پرهزینه و به لحاظ عملیات اجرایی مشکل است؛ لذا تخمین صحیح آن به‌طور غیرمستقیم حائز اهمیت است. در این مطالعه به‌منظور تعیین غیرمستقیم مدول تغییر شکل توده‌سنگ، نتایج حاصل از آزمایش‌های دیلاتومتری در گالری اکتشافی پیرامون مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان با روش عددی شبیه‌سازی شده است. مغار نیروگاه در توده‌سنگ‌های آهکی سازند دالان قرار گرفته است. در این محدوده، علاوه بر لایه‌بندی و سه دسته‌درزه اصلی، مناطق خردشده ناشی از عملکرد گسل‌ها نیز دیده می‌شود. ازاین‌رو با فرض برقراری محیط پیوسته‌ی معادل در توده‌سنگ مغار از روش تفاضل محدود برای مدلسازی عددی آزمایش دیلاتومتری استفاده شده است. بر این اساس، بررسی مقادیر جابجایی به‌دست‌آمده از مدلسازی، مؤید این نکته است که با افزایش عمق، مدول تغییر شکل توده سنگ نیز افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه‌ی مدول تغییر شکل کلی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی در گمانه‌های D-1 و D-2 در محدوده مغار نیروگاه با مدول تغییر شکل کل میانگین حاصل از مجموع ۱۵ آزمایش دیلاتومتری در اطراف مغار نیروگاه نشان‌دهنده‌ی ۲۶ درصد خطا است که این اختلاف می‌تواند ناشی از شرایط زمین‌شناسی و تکتونیکی منطقه باشد.

واژه‌های کلیدی:
مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ، آزمایش دیلاتومتری، مدلسازی عددی.

---

[۱]. کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه کاشان
[۲]*. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، ali_aalianvari@kashanu.ac.ir
[۳]. دکتری مهندسی معدن، دانشگاه کبک، کانادا

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۳

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.5.3]

مقدمه

انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ[۱] مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ را نسبت مابین تنش اعمالی به مجموع کرنش‌های الاستیک و پلاستیک ناشی از آن تعریف می‌کند. مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ در شرایط برجا یک پارامتر محلی است؛ چراکه در اعماق، راستاها و مقیاس‌های مختلف تغییر می‌کند. می‌توان مطرح کرد که تأثیر این عوامل به‌ترتیب به وضعیت تنش‌های برجا، ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ و حجم نمونه‌ی معرف برمی‌گردد. برآورد مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ به‌صورت مستقیم با استفاده از آزمایش‌های برجا علاوه بر زمان‌بر و پرهزینه بودن، به لحاظ عملیات اجرایی نیز مشکل است؛ ازاین‌رو تعیین این پارامتر به‌طور غیرمستقیم در طراحی سازه‌های درگیر با توده‌سنگ ضروری به نظر می‌رسد (انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ-ISRM).

در سال‌های اخیر، مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ به‌طور مستقیم توسط آزمایش‌های برجا و غیرمستقیم توسط روش‌های آماری، محاسبات نرم، عددی و تحلیلی تعیین شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این روش‌ها اعتبار یکسانی ندارد. معمولاً روش‌های اندازه‌گیری مستقیم به‌عنوان معتبرترین روش شناخته می‌شوند و سایر روش‌ها را با نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های برجا مقایسه می‌کنند. محققان زیادی در خصوص برآورد غیرمستقیم مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ فعالیت کرده‌اند که در جدول (۱) به برخی از این روش‌ها اشاره شده است؛ که در این روابط، RQD شاخص کیفیت سنگ، RMR امتیاز توده‌سنگ، Q شاخص کیفیت توده سنگ، GSI شاخص مقاومت زمین‌شناسی، RMi شاخص توده‌سنگ، JH سیستم طبقه‌بندی بزرگراه ژاپن، UCS مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر برحسب مگاپاسکال، Is_{50} شاخص بارگذاری نقطه‌ای در قطر ۵۰ میلی‌متر، Ei مدول تغییر شکل‌پذیری سنگ بکر برحسب گیگاپاسکال، EM مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ برحسب گیگاپاسکال، H عمق بر حسب متر، α ضریبی برابر با ۰/۱۶ تا ۰/۳ (مقدار بیشتر برای سنگ‌های ضعیف)،WD درجه‌ی هوازدگی بر حسب درصد و D فاکتور تخریب می‌باشند.

جدول(۱): برخی از روش‌های تخمین غیرمستقیم مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ

محققان	روش	معادله
بینیاویسکی[۲]	رگرسیون خطی	$E_M = 2RMR - 100 \, , RMR > 50$
بارتن	رگرسیون	$E_M = 10Q_c^{\frac{1}{3}}, \quad Q_c = \frac{Q.UCS}{100}$
هوک و همکاران	محاسبات برگشتی	$E_M = (1 - 0.5D)\sqrt{\frac{UCS}{100}}10^{GSI-10/40}$ UCS<100
شن[۳] و همکاران	رگرسیون گوسی	$E_M = 1.14E_i e^{-\left(\frac{RMR-116}{41}\right)^2}$
صانعی و فرامرزی[۴]	رگرسیون نمایی	$E_M = E_i(0.000002e^{0.1392JH})$
المداگ[۵] و همکاران	رگرسیون نمایی	$E_M = 0.058e^{0.0785RMR}$
کارامان[۶] و همکاران	تحلیل آماری مقایسه‌ی چندگانه	$E_M = Is_{50} \times 10^{0.01RQD-0.25}$

در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایش‌های برجا و روش‌های عددی برای تعیین غیرمستقیم مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ در محدوده‌ی مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان استفاده شده است.

اگرچه روش‌های عددی در مسائل مختلف نسبتاً پیچیده هستند، اما با استفاده از آن‌ها می‌توان نقش عوامل مؤثر بر مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ همچون تنش‌های جانبی، ناهمسانگردی و مقیاس را در نظر گرفت. یکی از مهم‌ترین اطلاعات موردنیاز در مدسازی‌های عددی، داده‌های آزمایشبرجا یا داده‌های پایش[۷] منطقه‌ی

۱. International Society for Rock Mechanics

۲.Bieniawski

۳.Shen

۴.Sanei and Faramarzi

۵.Alemdag

۶.Karaman

۷.Monitoring

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.5.3]

موردمطالعه است. این تحقیق مبتنی بر آزمایش‌های برجای تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ است.

برای نخستین بار هیوز[۱] و همکاران در سال ۱۹۷۱ تحلیل‌های عددی اجزای محدود را برای آزمایش قابلیت تغییر شکل‌پذیری جک گمانه‌ای در سنگ‌های درزه‌دار به کار گرفتند. نتایج نشان داد که در توده‌سنگ بدون درزه یا با درزه‌داری متوسط که ترک‌های کششی به‌محض اعمال بارهای زیاد برای توسعه محتمل هستند، باید نتایج راه‌حل‌های الاستیک به‌طور جدیتجدیدنظر شوند. همچنین در شرایط آزمایش جک گمانه‌ای، بایستی مدول تغییر شکل‌پذیری واقعی سنگ ۲۹-۳۰ درصد بیشتر از مقدار راه‌حل الاستیک در نظر گرفته شود. هیوز (۱۹۷۱)، ایتو[۲] و همکاران در سال ۲۰۰۱ روش جدیدی را برای تعیین تنش‌های برجا با استفاده از ابزار دیلاتومتر براساس سنجش رفتار ناپیوستگی‌ها در طول مدت فشار گمانه پیشنهاد دادند. ایتو (۲۰۰۱) با استفاده از تحلیل‌های روش اجزای محدود دوبعدی نشان داد که بازشدگی ناپیوستگی‌ها، اثر نسبتاً ضعیفی بر تغییر شکل شعاعی دارد که این اثر، آشکارا بر تغییر شکل جانبی پدیدار می‌گردد. در این مطالعه، پیش‌بینی تحلیل‌ها به کمک آزمون‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. بالاکوسکی[۳] در سال ۲۰۰۶ آزمایش دیلاتومتر تخت[۴] را در خاک ماسه‌ای با روش اجزای محدود شبیه‌سازی کرد. او تحلیل‌های دوبعدی ساده شده را در حالت کرنش صفحه‌ای برای تعبیه‌ی تیغه و تورم غشای دیلاتومتر به کار گرفت. بالاچوسکی (۲۰۰۴) و آقاراضی[۵] و همکاران در سال ۲۰۰۸ هندسه‌ی حفاری را با ترکیب مدل‌های عددی اجزای محدود برای آزمایش بارگذاری صفحه‌ای به‌عنوان عاملی برای احتساب تأثیرات هندسی بر جابجایی‌ها توصیه کردند. آقارضی (۲۰۰۸)، ایزیک[۶] و همکاران در سال ۲۰۰۸ آزمایش برجا را به‌منظور تعیین اثرات هندسه، عمق آزمایش و ناحیه‌ی اختلال بر مقادیر مدول تغییر شکل‌پذیری با روش تفاضل محدود شبیه‌سازی کردند. ایسیک (۲۰۰۸) با استفاده از مدلسازی‌های دوبعدی نشان داد که نسبت طول به قطر پکر و عمق آزمایش بر مدول برشی محاسبه‌شده اثری ندارند. همچنین آن‌ها با تغییر ضخامت ناحیه‌ی اختلال در شبیه‌سازی‌ها پی بردند که این ضخامت اثر ناچیزی بر مدول اندازه‌گیری شده دارد.

همان‌گونه که از جدول ۲) مشاهده می‌شود، برخی از محققین در کنار مدلسازی عددی، روش دیگری را به کار گرفته‌اند تا رابطه‌ای تجربی برای تخمین مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ ارائه کنند.

جدول (۲): روابط تجربی تخمین مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ بر اساس روش‌های ترکیبی (قطبی راوندی، ۲۰۰۳)

محققان	رابطه
میتری[۷]	$E_M = 0.5E_i\left(1 - cos\left(\pi.\frac{RMR}{100}\right)\right)$
قطبی راوندی[۸]	$\frac{E_M}{} = \frac{0.2\sigma_z(10.599k + 9.355v - 4.299kv - 5.565)}{r.d}$

که در این روابط Ei مدول الاستیک ماده‌سنگ، RMR امتیاز توده‌سنگ، σz تنش قائم، k نسبت تنش افقی به قائم، ν نسبت پواسون، r شعاع تونل و d جابجایی‌های دیواره‌ی تونل می‌باشد (میتری ۱۹۹۴).

به‌طور طبیعی سنگ ماده‌ای ناپیوسته، ناهمگن، ناهمسانگرد و غیر الاستیک[۹] (DIANE) است. در این پژوهش با استفاده از معیار شکست موهر- کلمب به همراه شبکه‌ی ناپیوستگی‌های مجزا[۱۰] (DFN) و توزیع آماری خواص ژئومکانیکی توده‌سنگ مدلسازی به ترتیب براساس غیر الاستیک بودن، ناهمسانگردی و ناهمگنی سنگ صورت گرفته است. همچنین به دلیل وجود چندین نوع ناپیوستگی در منطقه‌ی موردمطالعه، توده‌سنگ به‌عنوان محیطی شبه پیوسته در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود سازه‌های زیرزمینی

۱. Heuze
۲. Ito
۳. Bałachowski
۴. Flatdilatometer
۵. Agharazi
۶. Isik
۷. Mitri
۸. GhotbiRavandi
۹. Discontinuos, Inhomogeneous, Anisotropic, Non Elastic
۱۰. Discrete Fracture Network

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.5.3]

بزرگ‌مقیاس در آهک‌های سازند دالان، در این مقاله به بررسی تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری این سازند با استفاده از مدل‌های عددی و تجربی پرداخته شده است.

معرفی مطالعه موردی و زمین‌شناسی منطقه

نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان، باهدف بهره‌گیری از پتانسیل انرژی برق‌آبی بین مخزن سد رودبار لرستان در تراز پایین و یک مخزن مصنوعی در تراز بالا (چال‌حاتم) در حال احداث است. این طرح با ظرفیت ۱۰۰۰ مگاوات در فاصله‌ی حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز در استان لرستان واقع شده است.

گستره‌ی موردبررسی در پهنه‌ی زاگرس شمالی یا زاگرس بلند واقع شده که این زون درواقع یک نوار به‌شدت خردشده به پهنای بین ۷۰ تا ۱۰۰ کیلومتر است که از جنوب باختری به نوار چین‌خورده‌ی زاگرس و از شمال خاوری به گسله‌ی اصلی واژگون زاگرس[۱] و پهنه‌ی سنندج- سیرجان محدود شده است. این پهنه دارای روند شمال باختری جنوب خاوری $N130°$ بوده و تحت تأثیر حرکات کرتاسه پسین و پلیوسن قرار گرفته است. در کمربند تراستی زاگرس مرتفع گسل‌های امتدادلغز و تراستی فراوانی به چشم می‌خورد. این ناحیه دارای برخاستگی است و بسیاری از گسل‌ها به‌عنوان گسل فعال یا واجد پتانسیل فعالیت در نظر گرفته می‌شوند. محل قرارگیری مغار نیروگاه را سنگ‌های آهکی- دولومیتی متعلق به سازند دالان به سن پرمین تشکیل داده است. این سازند از آهک‌های بیومیکرایتی، آهک‌های دولومیتی و دولومیت تشکیل شده است که دارای لایه‌بندی منظم ضخیم لایه تا متوسط لایه می‌باشند. شیب لایه‌بندی در این سازند عمدتاً نزدیک به قائم و در حدود ۶۵-۸۰ درجه به سوی شمال خاور است که در برخی قسمت‌ها به سبب عملکرد گسل‌ها و یا چرخش لایه‌ها، شیب لایه‌بندی تغییر می‌کند. در شکل(۱): مقطع زمین‌شناسی تهیه‌شده در گستره‌ی طرح و موقعیت مغار نیروگاه نمایش داده شده است. با حفر گالری اکتشافی به عرض ۶ متر و طول ۱۲۰ متر در امتداد سقف مغار نیروگاه فرصت بسیار مناسبی برای برداشت زمین‌شناسی ناپیوستگی‌ها و سایر مطالعات اکتشافی ژئوتکنیکی و مکانیک سنگ فراهم‌شده است. براساس ۳۲۰ ناپیوستگی برداشت‌شده در گالری اکتشافی به همراه درزه‌نگاری تونل‌ها و گالری‌های مجاور مغار نیروگاه مانند تونل دسترسی به زیر شفت‌های آب‌بر، تونل دسترسی به سقف مغار نیروگاه و تونل دسترسی به گالری تزریق چهار سیستم ناپیوستگی در محدوده‌ی مغار نیروگاه شناسایی شده که مشخصات آن‌ها در جدول(۳) آمده است(پویری ۲۰۱۴)راستای ناپیوستگی‌ها به‌صورت شماتیک با رعایت متوسط فاصله‌داری در شکل (۱)(۲) ترسیم شده است.

مطالعات آزمایشگاهی و برجا

برای اندازه‌گیری خواص ژئومکانیکی سنگ بکر و توده‌سنگ محدوده‌ی مغار نیروگاه، برنامه مطالعاتی گسترده‌ای شامل نمونه‌گیری از گمانه‌های اکتشافی برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و همچنین انجام آزمایش‌های برجای دیلاتومتری و شکست هیدرولیکی به اجرا در آمده است.

موقعیت گمانه‌های D-1 و D-2 محل انجام آزمایش دیلاتومتری و گمانه‌های HF-1 و BH-235 محل انجام آزمایش شکست هیدرولیکیدر داخل گالری اکتشافی در شکل (۳) مشخص‌شده‌اند.

آزمون‌های آزمایشگاهی

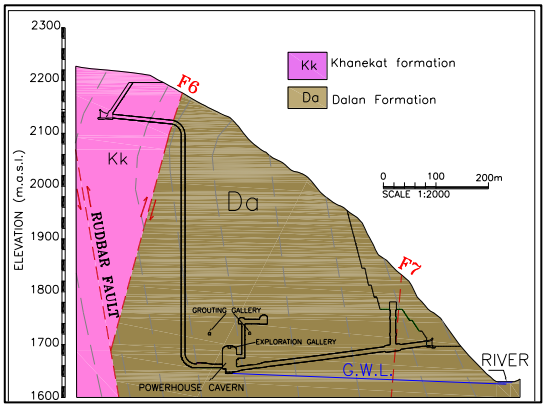
طی آزمایش‌های فیزیکی، چگالی بر روی نمونه‌های سنگی اخذشده از گمانه‌های اکتشافی اندازه‌گیری و در آزمایش مقاومت فشاری نامحصور، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون سنگ‌ها تعیین شده است. همچنین برای محاسبه‌ی پارامترهای چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی از نرم‌افزار Roclab کمک گرفته شده است. در این نرم‌افزار متناسب با بازه‌ی تنش محتمل پیرامون مغار نیروگاه، معیار خطی موهر- کلمب

[۱]. Main Zagros Reverse Fault

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.5.3]

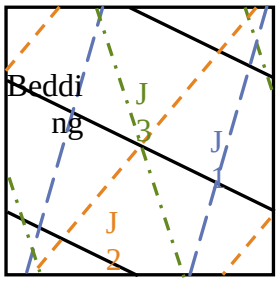
بر منحنی غیرخطی هوک- براون برازش داده‌شده و پارامترهای چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک معادل برآورد شده است. در ***Error! Unknown switch argument.***(۴) پارامترهای حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی آمده است.



شکل(۱): مقطع زمین‌شناسی در امتداد سازه‌های طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان(پویری ۲۰۱۴)

جدول(۳):مشخصات سیستم ناپیوستگی‌های برداشت‌شده در گالری اکتشافی مغار نیروگاه (پویری ۲۰۱۴)

نوع ناپیوستگی	شیب (*Deg*)	جهت شیب (Deg)	فاصله‌داری (m)	پایایی (m)	بازشدگی (*mm*)
لایه‌بندی	۸۰ – ۶۵	۰۳۹ – ۰۲۹	۶۰- ۶	۲۰ <	۲/۵ – ۰/۲۵
دسته‌درزه J1	۴۲ – ۳۰	۲۹۹ – ۲۷۳	۶۰- ۲۰	۳ <	۲/۵ – ۰/۲۵
دسته‌درزه J2	۸۱ – ۶۷	۱۳۴ – ۱۲۶	۶۰- ۲۰	۳ <	۲/۵ – ۰/۲۵
دسته‌درزه J3	۷۵ – ۶۰	۰۸۰ – ۰۶۵	۶۰- ۲۰	۳ <	۲/۵ – ۰/۲۵



شکل (۱): طرح شماتیک راستای سیستم ناپیوستگی‌ها

آزمایش شکست هیدرولیکی

با ترکیب نتایج دو آزمایش شکست هیدرولیکی[۱](HF) و آزمایش هیدرولیکی در شکستگی‌های از پیش موجود[۲](HTPF) در دو گمانه نسبت‌های تنش افقی حداقل و حداکثر در محدوده‌ی تراز مغار نیروگاه به شرح ***Error! Reference source not found.***می‌باشد.

جدول(۴): پارامترهای ژئومکانیکی ماده‌سنگ(پویری، ۲۰۱۴)

کمیت آماری	چگالی (gr/cm3)	مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)
میانگین	۲/۷	۲۹/۱	۰/۲۲	۲/۳	۴۵
انحراف معیار	۰/۰۴	۵/۵	۰/۰۱	۰/۶	۱

جدول(۵): مقادیر و راستای تنش‌های اصلی در تراز مغار نیروگاه-8(پویری، ۲۰۱۴)

کمیت آماری	نسبت تنش افقی حداقل به قائم (kh)	نسبت تنش افقی حداکثر به قائم (kH)	راستای تنش افقی حداکثر
محدوده‌ی تغییرات	۰/۱۵ – ۰/۴	۰/۵ – ۰/۹	N ۱۳۰-۱۵۰°
میانگین	۰/۲۷۵	۰/۷	N ۱۴۰°

جدول(۶): نتایج آزمایش برجای دیلاتومتری درمجموع دو گمانه(Poyry, 2014)

کمیت آماری	مدول تغییر شکل‌پذیری کل (GPa)			
	حسگر ۱	حسگر ۲	حسگر ۳	کل داده‌ها

[۱].Hydraulic fracture

[۲].Hydraulic Test on Pre-existing Fractures

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.5.3]

میانگین	۱۱/۴	۶/۴	۱۰/۶	۱۰/۳

مقاومت برشی سطوح ناپیوستگی‌ها

برای تعیین مقاومت برشی سطح ناپیوستگی‌ها در جدول از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی (برش اره‌بُر) و برداشت‌های انجام‌شده در گالری اکتشافی استفاده شده است.

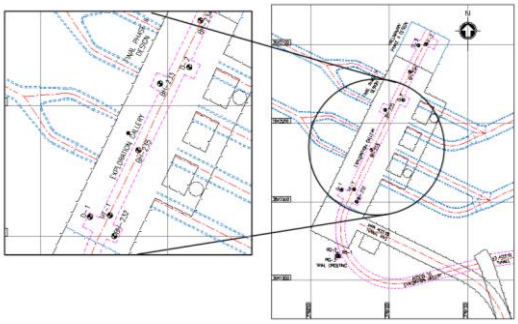
جدول (۷): پارامترهای مقاومت برشی سطوحناپیوستگی‌ها-8

(Poyry, 2014)

نوع ناپیوستگی	چسبندگی(MPa)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (Deg)
لایه‌بندی	۰/۰۵	۳۳
درزه‌ها	۰/۰۸	۳۵

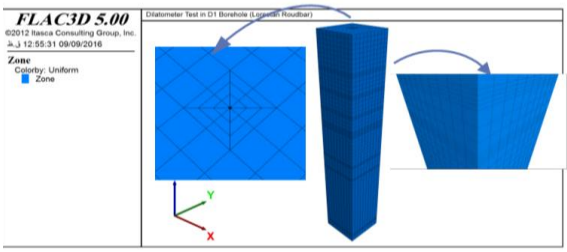
فرآیند مدلسازی

به دلیل حضور ناپیوستگی‌هایی شامل لایه‌بندی، دسته‌درزه‌ها و نواحی گسله در منطقه‌ی گالری اکتشافی محل انجام آزمایش دیلاتومتری، مدلسازی‌ها براساس فرض پیوسته‌ی معادل[۱] صورت گرفته است که در فرض پیوسته‌ی معادل توده‌سنگ درزه‌دار به‌صورت پیوسته و ناهمسانگرد تلقی می‌گردد. در محیط‌های شبه پیوسته[۲] روابط غیرخطی در منطق کرنش بزرگ حاکم است. برای شبیه‌سازی آزمایش دیلاتومتر انعطاف‌پذیر در داخل گمانه، شبکه‌ای با ۱۲۳۲۵ گره و ۱۱۰۰۸ مش که ابعاد آن در راستای محور X و محور Y ۱۰ متر و در راستای محور Z (عمق) ۶۰ متر می‌باشد، ایجادشده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، به دلیل حساسیت پاسخ مدل در نزدیک به دیواره‌ی گمانه‌ها و اعماق مورد آزمایش تراکم نقاط گرهی در این نواحی بیشتر از سایر سطوح شبکه است. برای مش‌بندی پیرامون دیواره‌ی گمانه‌ها از شبکه‌ی شعاعی قوسی در اطراف استوانه[۳] به ابعاد ۲m ×۲m ×۶۰m و ازآنجا به بعد از شبکه‌ی مکعبی[۴] با ابعاد مش ۱ m در سه راستا استفاده شده است.

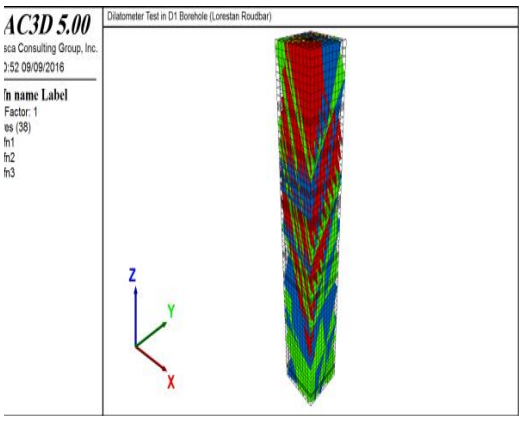


شکل(۳): موقعیت گمانه‌های اکتشافی و انجام آزمایش‌های برجا در داخل گالری اکتشافی مغار نیروگاه

برای تأثیر ناهمسانگردی در خصوصیات مواد، شبکه‌ی ناپیوستگی‌های مجزا (DFN) تولیدشده است. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌گردد، به دلیل استفاده از خصوصیات دسته‌درزه‌ی J1 در مدل رفتاری، تنها سه شبکه‌ی ناپیوستگی ایجادشده که به لایه‌بندی، دسته‌درزه‌ی J2 و دسته‌درزه‌ی J3اختصاص داده‌شده است. ویژگی‌های ذکرشده‌ی ناپیوستگی‌ها در **Error! Unknown switch argument.** و **Error! Unknown switch argument.**نشان داده‌شده‌اند.



شکل (۴): نمای سه‌بعدی از هندسه‌ی شبکه



شکل (۵): شبکه‌ی ناپیوستگی‌های مجزای تولیدشده

برای توده‌سنگ، مدل ناهمسانگرد درزه موجود در همه‌جا

۱. Equivalent Continuum

۲. Pseudo Continuum

۳. Radcylinder

۴. Brick

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.5.3]

منطبق بر معیار شکست موهر- کلمب در نظر گرفته شده که صفحات ضعیف را شامل می‌شود. شیب و جهت شیب در این مدل رفتاری براساس مشخصات دسته‌درزه‌ی غالب (J1) شناسایی‌شده در محدوده‌ی مغار نیروگاه انتخاب‌شده است. پارامترهای این مدل رفتاری طبق جدول و(۸)جدول وارد که به علت تغییرات در میزان آن‌ها، پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ و دسته‌درزه‌ی J1 با توزیع آماری نرمال به نرم‌افزار داده‌شده‌اند.

جدول (۸): پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ

کمیت آماری	مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	چگالی (gr/cm3)
میانگین	۸/۷۳	۰/۲۷	۲/۳	۴۵	۲/۷
انحراف معیار	۲/۹۲	۰/۰۳	۰/۶	۱	۰/۰۴

جدول (۹): پارامترهای صفحه‌ی ضعیف

کمیت آماری	چسبندگی درزه (MPa)	زاویه‌خانه (Deg)	شیب درزه (Deg)	جهت شیب درزه (Deg)
میانگین	۰/۰۸	۳۵	۳۶	۳۲۶
انحراف معیار	-	-	۶	۱۳

مدول یانگ و نسبت پواسون توده‌سنگ درزه‌دار ناهمگن است و از فاصله‌داری خیلی زیاد تا فاصله‌داری خیلی کم ناپیوستگی‌ها کاهش می‌یابد. برای توزیع ناهمگن مدول یانگ و نسبت پواسون در ***Error! Unknown switch argument.*** از مقادیر حداکثر و حداقل استفاده شده است. مقدار حداکثر مدول یانگ و نسبت پواسون توده‌سنگ در فاصله‌داری خیلی زیاد ناپیوستگی‌ها معادل مدول الاستیک و نسبت پواسون ماده‌سنگ است درصورتی‌که تأثیر مقیاس در آن اعمال گردد. برای تخمین مقیاس معادل در مدول یانگ از متوسط محدوده‌ی ۲۰-۶۰ درصدی که هیوز پیشنهاد داده و برای نسبت پواسون از رابطه‌ی ترزاقی و ریچارت (رابطه‌ی ***Error! Reference source not found.***) استفاده شده است. در رابطه‌ی **Error! Reference source not found.** به‌جای k متوسط نسبت تنش افقی حداکثر و حداقل به قائم در تراز مغار نیروگاه به‌کاررفته است تا نسبت پواسون به دست آید.

$$K = \frac{\nu}{1-\nu} \qquad (۱)$$

برای برآورد حداقل مقدار نسبت پواسون و مدول یانگ توده‌سنگ در مقادیر فاصله‌داری‌های خیلی کم ناپیوستگی‌ها از روابط (۲) و (۳)که در روش پیوسته‌ی معادل برای توده‌سنگ شامل ناپیوستگی‌هایی با جهت‌یابی تصادفی ارائه‌شده ، استفاده می‌شود.

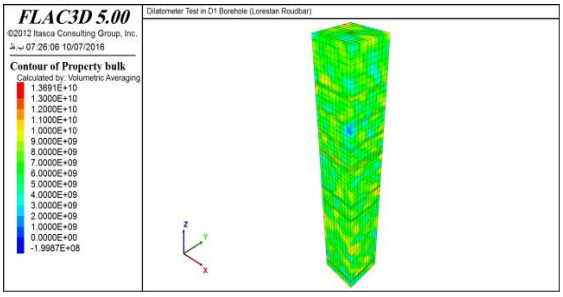
$$E_M = \frac{2E_r(7-5\nu_r)}{3(1-\nu_r)(9+5\nu_r)} \qquad (۲)$$

$$\nu_m = \left(\frac{1+5\nu_r}{9+5\nu_r}\right) \qquad (۳)$$

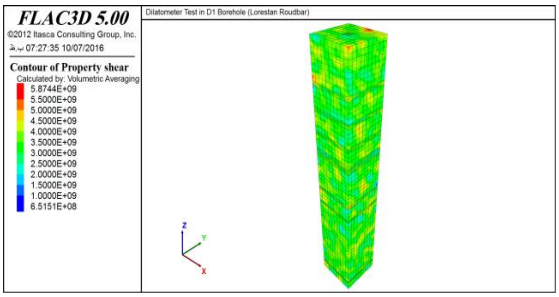
معرفی پارامترها بدین‌گونه با در نظر گرفتن پارامترهای ژئومکانیکی به‌صورت توزیع آماری نرمال و اعمال شبکه ناپیوستگی‌ها در مدل رفتاری درزه موجود در همه‌جا به‌ترتیب مدل‌ها به‌صورت ناهمگن و ناهمسانگرد فرض شده‌اند. توزیع آماری ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ در شکل‌های (۶) و (۷) نمایش داده‌شده است.

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.5.3]

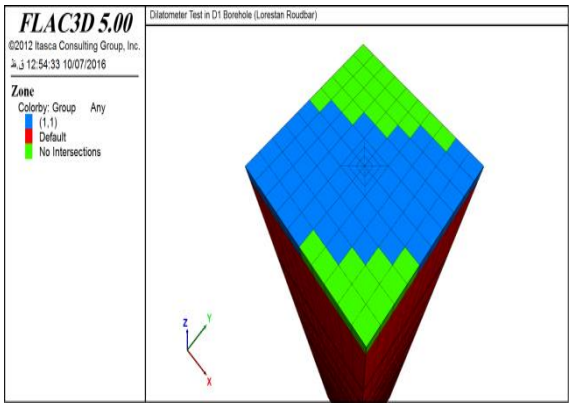


شکل (۶): تغییرات مدول بالک نمایانگر ساختار ناهمگن توده‌سنگ

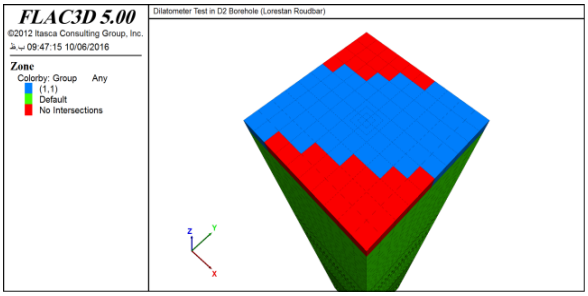


شکل (۷): تغییرات مدول برشی نمایانگر ساختار ناهمگن توده‌سنگ

شرایط اولیه که بیانگر تنش‌های برجای طبیعی در منطقه هستند به‌صورت حاصل‌ضرب چگالی مواد در شتاب گرانش و ارتفاع در مدل‌ها ایجادشده است. راستای تنش افقی حداکثر در محدوده‌ی آزیموت ۱۴۰ درجه قرار دارد که امتداد تنش افقی حداقل در راستای محور X و امتداد تنش افقی حداکثر در راستای محور Y منظور شده است؛ بنابراین راستای شمال در شبکه با زاویه‌ی ۴۰ درجه نسبت به جهت مثبت محور Y، میان جهت مثبت محور X و محور Y قرار خواهد گرفت. با توجه به نتایج آزمایش شکست هیدرولیکی در پیرامون مغار، نسبت تنش افقی حداکثر به تنش قائم برابر ۰/۷ و نسبت تنش افقی حداقل به تنش قائم برابر ۰/۲۷۵ استفاده شده است. همان‌طور که پیش از این مطرح شد، آزمایش‌های دیلاتومتری درون گالری اکتشافی انجام می‌شوند؛ بنابراین روباره به‌صورت تنش ثقلی[۱] به مرز بالایی شبکه اثر می‌گذارد. بیشینه و کمینه مقدار روباره در این محدوده برابر ۴۴۳ و ۴۲۷ متر می‌باشد که به‌صورت بار مثلثی (غیریکنواخت) در خلاف راستای محور گالری(موازی محور X) به مرز بالایی شبکه واردشده است. محور گالری اکتشافی در راستای آزیموت ۲۶ درجه قرار دارد که کف گالری مطابق شکل‌های سطح آزاد از تنشی به عرض ۶ متر در راستای محور آن به وجود آورده است. براساس طرح موقعیت گمانه‌های اکتشافی آزمایش دیلاتومتری، سطح آزاد طوری در نظر گرفته شده است که در یکی از مدل‌ها مشابه ***Error! Unknown switch argument.*** گمانه‌ی D-1 نزدیک به دیواره‌ی چپ گالری اکتشافی و در مدل دیگر مشابه شکل(۹) گمانه‌ی D-2 نزدیک به دیواره‌ی راست گالری اکتشافی واقع شده باشد.



شکل (۸): محل حفر گمانه‌ی D-1 در سمت چپ گالری اکتشافی



شکل (۹): محل حفر گمانه‌ی D-2 در سمت راست گالری اکتشافی

پس از برقراری شرایط تعادل در مدل‌ها، گمانه‌هایی به قطر ۱۰۱ میلی‌متر در مرکز مرز بالایی شبکه به طرف پائین حفاری می‌شوند. بعد از حفاری گمانه‌ها برای اینکه تنها تأثیر فشارهای وارده بر میزان جابجایی در دیواره‌ی گمانه‌ها بررسی گردد، میزآن جابجایی‌ها در نقاط گرهی واقع بر دیواره‌ی گمانه صفر می‌شود. سپس آزمایش دیلاتومتری در

[۱].Gravitational Stress

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.5.3]

اعماق موردنظر شبیه‌سازی شده که برای این مقصود توده‌سنگ دیواره‌ی گمانه‌ها مطابق تمامی چرخه‌های آزمایش در هر عمق بارگذاری و باربرداری می‌گردند. پس از اعمال فشار در هر مرحله برای حداکثر فشار در هر چرخه ۱۰۰ گام زمانی اضافه شده است تا بیشترین جابجایی‌ها ثبت گردد. ۱۰۰ گام زمانی معادل ۱۰ مرحله ثبت جابجایی است؛ زیرا در حالت کرنش بزرگ نیروها در هر ۱۰ گام محاسبه می‌شوند. برای ثبت مقادیر جابجایی دیواره‌ی گمانه‌ها نقاط پایشی مطابق راستای حسگرهای جابجایی دیلاتومتر در نظر گرفته شده است. اختلاف راستای یکی از حسگرها با متوسط امتداد تنش اصلی حداقل ۲۴ درجه می‌باشد (موازی محور گالری محل آزمایش) که دو حسگر دیگر با زاویه‌ی ۱۲۰ درجه نسبت به آن بر روی دیواره‌ی گمانه قرار گرفته‌اند.

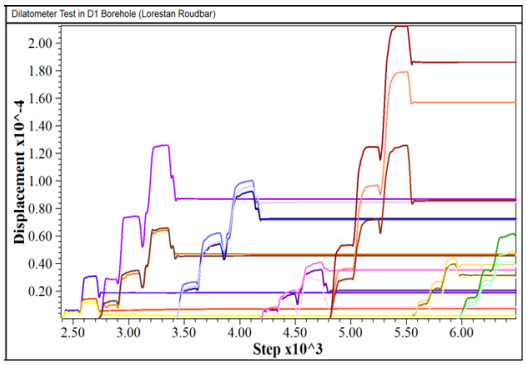
نتایج و بحث

برای بررسی پاسخ شبیه‌سازی آزمایش دیلاتومتری مقادیر جابجایی‌های ثبت‌شده در طول بارگذاری و باربرداری در دیواره‌ی گمانه‌ها با استفاده از رابطه‌ی (۴)در محاسبه‌ی مدول تغییر شکل توده‌سنگ به کار گرفته می‌شود. طبق این رابطه مدول تغییر شکل‌پذیری کل توده‌سنگ در اعماق مورد آزمایش به‌طور جداگانه محاسبه شده است. مدول کل در هر عمق از نسبت اختلاف حداکثر فشار در چرخه‌ی اول و سوم بارگذاری به میزان تغییرات قطر گمانه ناشی از این افزایش فشار به دست می‌آید.

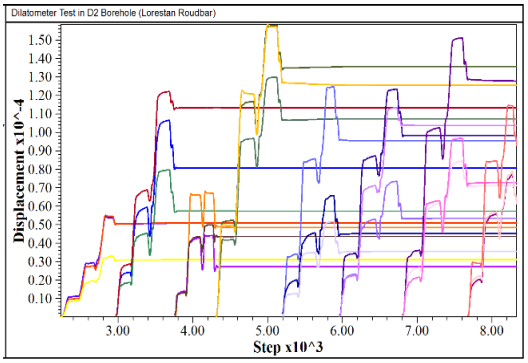
$$E_d = D.\frac{\Delta p_i}{\Delta D}.(1+V_R) \qquad (۴)$$

توده‌سنگ ناهمگن و ناهمسانگرد

مدول تغییر شکل به‌دست‌آمده از میزآن جابجایی‌های نشان داده شده در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به‌ترتیب در جدول (و جدول) آورده شده است. ازآنجایی‌که در عمق ۸/۵ متر گمانه‌ی D-1 آزمایش برجای دیلاتومتری در دوچرخه انجام‌شده؛ لذا در مدل گمانه‌ی D-1 در این عمق تنها دوچرخه شبیه‌سازی شده است که کاهش میزآنجابجایی در آن نسبت به دیگر اعماق مربوط به همین موضوع می‌باشد.



شکل(۱۰): نمودارجابجایی‌نقاط گرهی اعماق مورد آزمایش در گمانه‌ی D-1



شکل (۱۱): نمودار جابجایی نقاط گرهی اعماق مورد آزمایش در گمانه‌ی D-2

میزان ناهمسانگردی مدول تغییر شکل که در نمودارهای شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود؛ ناشی از ناهمسانگردی مدل رفتاری، شبکه‌ی ناپیوستگی‌های مجزا و وجود تنش افقی حداکثر و حداقل است.

جدول (۱۰): نتایجحاصل از مدلسازی عددی در گمانه‌ی D-1

کمیت آماری	مدول تغییر شکل‌پذیری کل (GPa)			
	حسگر ۱	حسگر ۲	حسگر ۳	کل داده‌ها
میانگین	۱۷/۳	۱۳/۱	۱۷/۵	۱۴/۵

جدول (۱۱): نتایج حاصل از مدلسازی عددی در گمانه‌ی D-2

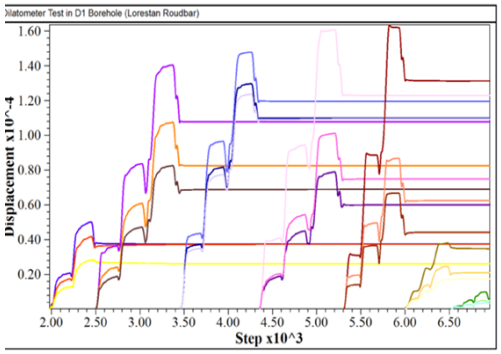
کمیت آماری	مدول تغییر شکل‌پذیری کل (GPa)			
	حسگر ۱	حسگر ۲	حسگر ۳	کل داده‌ها
میانگین	۱۱/۱	۱۱	۱۲/۳	۱۱/۵

بنابراین میانگین مدول تغییر شکل کل حاصل از مدلسازی عددی در محدوده‌ی مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان معادل ۱۳ گیگا پاسکال به دست می‌آید. مقایسه‌ی

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.5.3]

میانگین مدول تغییر شکل کل به‌دست‌آمده حاصل از مدلسازی عددی دو گمانه با میانگین کل نتایج آزمایش برجای دیلاتومتری درجدول(، حدود ۲۶ درصد خطا را نشان می‌دهد.

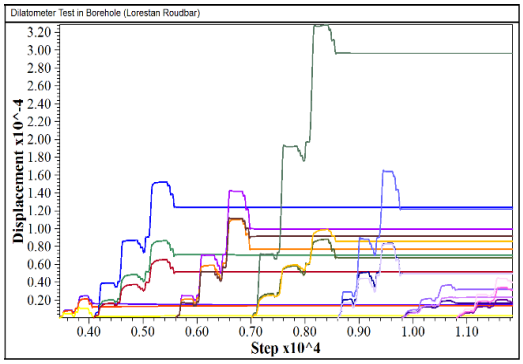
برای بررسی تأثیر ناهمگنی بر نتایج مدلسازی، مدول یانگ و نسبت پواسون در مدل گمانه‌ی D-1 همگن در نظر گرفته شده است. با فرض مدول یانگ و نسبت پواسون همگن، مطابق شکل کاهش تغییر شکل‌پذیری در اثر افزایش عمق به چشم می‌خورد. با توجه به این شکل می‌توان اظهار کرد در حالتی که تغییراتی زیادی ناشی از ماهیت ژئومکانیکی و درزه‌داری در مدول یانگ و نسبت پواسون وجود نداشته باشد، می‌توان شاهد روند افزایش مدول تغییر شکل‌پذیری با افزایش عمق بود.



شکل (۱۲): نمودارجابجایی نقاط گرهی اعماق مورد آزمایش در گمانه‌ی D-1 بدون ناهمگنی مدول یانگ و نسبت پواسون

فرض عدم وجود سطح آزاد

همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌گردد، در صورت عدم وجود سطح آزاد در مرز بالای شبکه از میزآنجابجایی‌های کل کاسته شده و مطابق با آن مدول تغییر شکل کل نسبت به مدل گمانه‌ی D-1 و D-2 که سطح آزاد در مرز بالای شبکه وجود دارد، مقدار بیشتری به دست می‌آید. با مقایسه‌ی این دو نوع مدل می‌توان به تأثیر ایجاد فضای زیرزمینی در تغییر میزان تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ پی برد. در حقیقت مدل بدون سطح آزاد کاهش مدول در نزدیکی سطح آزاد بیانگر تغییر شکل‌پذیری کم توده‌سنگ در اطراف فضای زیرزمینی می‌باشد. مدول تغییر شکل در پیرامون فضای زیرزمینی تا شعاعی تحت تأثیر به هم خوردگی تنش‌های برجای طبیعی قرار دارد که بعد از این شعاع تغییرات مدول به مقدار اولیه‌ی خود برمی‌گردد. در حقیقت پاسخ‌های این دو نوع مدل مبین افزایش قابلیت تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ در اثر ایجاد سازه‌ی زیرزمینی در آن است. در این مدل، الگوی چرخه‌های بارگذاری و باربرداری در اعماق گمانه مطابق مدل گمانه‌ی D-1 در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۳): نمودار جابجایی نقاط گرهی اعماق مورد آزمایش در گمانه‌ی فرضی بدون سطح آزاد

نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های عددی می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در کنار آزمایش‌های برجا استفاده تا تغییرات مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ در یک منطقه برآورد گردد. درصورتی‌که مدلسازی با درک شرایط حاکم بر محل تعیین مدول و عوامل مؤثر بر مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ صورت گیرد، روش‌های عددی می‌تواند برای تخمین مدول کلی توده‌سنگ به کار گرفته شوند؛ اما به‌دلیل ماهیت پیچیده‌ی توده‌سنگ نمی‌توان تنها به شبیه‌سازی‌های عددی برای تعیین دقیق مدول تغییر شکل‌پذیری در تمام محیط‌ها اکتفا کرد؛ زیرا چنین مدل‌های عددی احتیاج به اطلاع دقیق از ساختار توده‌سنگ دارند که این هدف با انجام مشاهدات صحرایی توده‌سنگ در مقاطع و فضاهای زیرزمینی اکتشافی میسر می‌گردد. این در صورتی است که پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ و تنش‌های وارد بر آن با آزمایش‌های برجا پیش از این تعیین شده باشند.

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.5.3]

نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ محدوده‌ی مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان به‌طور غیرمستقیم توسط روش عددی تفاضل محدود با تکیه‌بر نتایج آزمایش برجای دیلاتومتری تعیین شده است. هدف از این تحقیق معرفی و به‌کارگیری روش‌های عددی به‌عنوان روش جایگزین کارآمد برای تعیین غیرمستقیم مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ است. مدلسازی‌ها با در نظر گرفتن ناهمگنی، ناهمسانگردی و مقیاس صورت گرفته که خلاصه‌ی نتایج به شرح زیر می‌باشد.

۱- مقایسه‌ی مدول تغییر شکل کلی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی در گمانه‌های D-1 و D-2 با مدول تغییر شکل کل میانگین حاصل از مجموع ۱۵ آزمایش دیلاتومتری در اطراف مغار نیروگاه نشان‌دهنده‌ی ۲۶ درصد خطا است.

۲- با بررسی میزآنجابجایی‌های به‌دست‌آمده از مدل‌های عددی می‌توان در صورت همگن بودن، مدول یانگ و نسبت پواسون نشان داد که مدول تغییر شکل توده‌سنگ با افزایش عمق افزایش می‌یابد.

۳- ایجاد فضای زیرزمینی در توده‌سنگ منجر به افزایش قابلیت تغییر شکل‌پذیری و کاهش مدول توده‌سنگ می‌شود.

۴- نحوه‌ی توزیع تنش‌های برجا در مقدار و تغییرات مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ اهمیت بسزایی دارد.

مراجع

1- Heuze, F.E. Goodman, R.E. Bornstein, A. (1971). Numerical Analyses of Deformability Tests in Jointed Rock– Joint Perturbation and No Tension Finite Element Solutions, International Journal of Rock Mechanics 3, 13–24.

2- Ito,T. Sato,A. Hayashi, K. (2001). Laboratory and field verification of a new approach to stress measurements using a dilatometer tool. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 38, 1173–1184.

3- Balachowski, L. (2006. April).Analysis of dilatometer test in calibration chamber,

4- Agharazi, A. Tannant, D. Jafari, A. (2008.). Stress and tunnel geometry effects on deformation modulus derived from plate load tests, GeoEdmonton'08, 601–608.

5- Isik, N.S. Ulusay, R. Doyuran, V. (2008). Deformation modulus of heavily jointed–sheared and blocky greywackes by pressuremeter tests: Numerical, experimental and empirical assessmentsEngineering Geology 101, 269–282.

6- Mitri, H.S. Edrissi, R. Henning, J. (1994). Finite element modeling of cable bolted stopes in hard rock ground mines. In: Presented at the SME annual meeting, New Mexico, Albuquerque, 94–116.

7- GhotbiRavandi, E. Rahmannejad, R. FeiliMonfared A.E. GhotbiRavandi E. (2013). Application of numerical modeling and genetic programming to estimate rock mass modulus of deformation. Int J Min Sci Technol;23(5), 733–737.

8- Poyry-MahabGhodss Joint Venture. (2014). RoudbarLorestan Pumped Storage Power Plant Second Phase Studies, Power Plant Design Rock Mechanics Report, Report Code: 3170-3390200.

9- Itasca Consulting Group Inc. (2012). FLAC 3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D Dimensions, Users Manual), Version 5.0, Minneapolis: ICG.

10- Heuze, F. E. (1980).Scale Effects in the Determination of Rock Mass Strength and Deformability, Rock Mech. 12, 167-192.

11- Fossum, A. F. (1985).Technical Note: Effective Elastic Properties for a Randomly Jointed Rock Mass, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. &Geomech. Abstr. 22(6), 467-470.

12- Ladanyi B. (1987). Suggested methods for deformability determination using a flexible dilatometer, Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. 24 (2), 123-134.

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.5.3]