

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

مجتبی مصفا<sup>۱</sup>

علی عالی‌انوری\*<sup>۲</sup>

عباس کمالی بندپی<sup>۳</sup>

### 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. از این‌رو 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 تکنیکی منطقه باشد.

### واژه‌های کلیدی:

مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، مدول تغییر شکل پذیری توده‌سنگ، آزمایش دیلاتومتری، مدلسازی عددی.

<sup>۱</sup>. کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

<sup>۲</sup>\*. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، ali\_aalianvari@kashanu.ac.ir

<sup>۳</sup>. دکتری مهندسی معدن، دانشگاه کبک، کانادا

مقدمه

برابر با ۰/۱۶ تا ۰/۳ (مقدار بیشتر برای سنگ‌های ضعیف)، WD، درجه‌ی هوازگی بر حسب درصد و D فاکتور تخریب می‌باشند.

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

شکل‌پذیری توده سنگ

معادله	روش	محققان
$E_M = 2RMR - 100, RMR > 50$	رگرسیون خطی	بینیایوسکی <sup>۲</sup>
$E_M = 10Q_c^{\frac{1}{3}}, Q_c = \frac{Q \cdot UCS}{100}$	رگرسیون	بارتن
$E_M = (1 - 0.5D) \sqrt{\frac{UCS}{100}} 10^{GSI-10/40}$ UCS < 100	محاسبات برگشتی	هوک و همکاران
$E_M = 1.14E_i e^{-\left(\frac{RMR-116}{41}\right)^2}$	رگرسیون گوسی	شن <sup>۳</sup> و همکاران
$E_M = E_i (0.000002e^{0.1392JH})$	رگرسیون نمایی	صانعی و فرامرزی <sup>۴</sup>
$E_M = 0.058e^{0.0785RMR}$	رگرسیون نمایی	المداغ <sup>۵</sup> و همکاران
$E_M = I_{S50} \times 10^{0.01RQD-0.25}$	تحلیل آماری مقایسه‌ی چندگانه	کارامان <sup>۶</sup> و همکاران

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<sup>۷</sup> منطقه‌ی

انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ<sup>۱</sup> 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 زمان بر و پرهزینه بودن، به لحاظ عملیات اجرایی نیز مشکل است؛ از این رو 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، I<sub>S50</sub> شاخص بارگذاری نقطه‌ای در قطر ۵۰ میلی‌متر، E<sub>i</sub> مدول تغییر شکل‌پذیری سنگ بکر برحسب گیگاپاسکال، E<sub>M</sub> مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ برحسب گیگاپاسکال، H عمق بر حسب متر، α ضریبی

<sup>۲</sup>. Bieniawski

<sup>۳</sup>. Shen

<sup>۴</sup>. Sanei and Faramarzi

<sup>۵</sup>. Alemdag

<sup>۶</sup>. Karaman

<sup>۷</sup>. Monitoring

<sup>۱</sup>. International Society for Rock Mechanics

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 رابطه‌ی 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 <sup>۷</sup>	$E_M = 0.5E_i \left( 1 - \cos \left( \pi \cdot \frac{RMR}{100} \right) \right)$
قطبی راوندی <sup>۸</sup>	$E_M = \frac{0.2\sigma_z(10.599k + 9.355v - 4.299kv - 5.565)}{r.d}$

که در این روابط  $E_i$  مدول الاستیک ماده‌سنگ، RMR امتیاز توده‌سنگ،  $\sigma_z$  تنش قائم،  $k$  نسبت تنش افقی به قائم،  $v$  نسبت پواسون،  $r$  شعاع تونل و  $d$  جابجایی‌های دیواره‌ی تونل می‌باشد (میتری ۱۹۹۴).

به‌طور طبیعی سنگ ماده‌ای ناپیوسته، ناهمگن، ناهمسانگرد و غیر الاستیک<sup>۹</sup> (DIANE) است. در این پژوهش با استفاده از معیار شکست موهر- کلمب به همراه شبکه‌ی ناپیوستگی‌های مجزا<sup>۱۰</sup> (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 مورد مطالعه، توده‌سنگ به‌عنوان محیطی شبه پیوسته در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود سازه‌های زیرزمینی

مورد مطالعه است. این تحقیق مبتنی بر آزمایش‌های برجای تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ است. برای نخستین بار هیوز<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۶ آزمایش دیلاتومتر تخت<sup>۴</sup> 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 آقارازی<sup>۵</sup> 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. آقارازی (۲۰۰۸)، ایزیک<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ آزمایش برجا را به‌منظور تعیین

<sup>۱</sup>.Heuze

<sup>۲</sup>.Ito

<sup>۳</sup>.Bałachowski

<sup>۴</sup>.Flatdilatometer

<sup>۵</sup>.Agharazi

<sup>۶</sup>.Isik

<sup>۷</sup>.Mitri

<sup>۸</sup>.GhotbiRavandi

<sup>۹</sup>.Discontinuous, Inhomogeneous, Anisotropic, Non Elastic

<sup>۱۰</sup>.Discrete Fracture Network

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 فراهم شده است. براساس ۳۲۰ ناپیوستگی برداشت شده 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 (پوری ۲۰۱۴). راستای ناپیوستگی‌ها به صورت شماتیک با رعایت متوسط فاصله‌داری در شکل (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 هیدرولیک در داخل گالری اکتشافی در شکل (۳) مشخص شده‌اند.

### آزمون‌های آزمایشگاهی

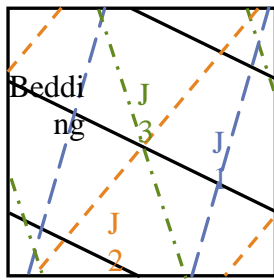
طی آزمایش‌های فیزیکی، چگالی بر روی نمونه‌های سنگی اخذ شده از گمانه‌های اکتشافی اندازه‌گیری و در آزمایش مقاومت فشاری نامحصور، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون سنگ‌ها تعیین شده است. همچنین برای محاسبه‌ی پارامترهای چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی از نرم‌افزار Roclab کمک گرفته شده است. در این نرم‌افزار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

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 در واقع 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 سنج-سیرجان محدود شده است. این پهنه دارای روند شمال باختری جنوب خاوری  $N130^{\circ}$  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 بیومیکریتی، 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



شکل (۱): طرح شماتیک راستای سیستم ناپیوستگی‌ها  
آزمایش شکست هیدرولیکی

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

جدول (۴): پارامترهای ژئومکانیکی ماده سنگ (پویری، ۲۰۱۴)

زاویه اصطکاکی داخلی (Deg)	چسبندگی (MPa)	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	کمیت آماری
۴۵	۲/۳	۰/۲۲	۲۹/۱	۲/۷	میانگین
۱	۰/۶	۰/۰۱	۵/۵	۰/۰۴	انحراف معیار

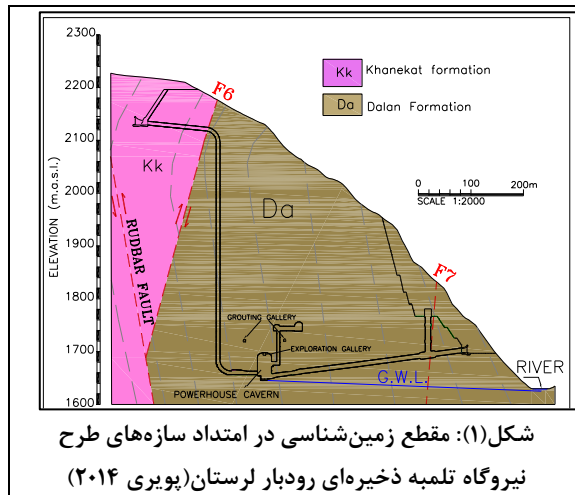
جدول (۵): مقادیر و راستای تنش‌های اصلی در تراز مغار نیروگاه ۸- (پویری، ۲۰۱۴)

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 در مجموع دو گمانه (Poyry, 2014)

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

بر منحنی غیرخطی هوک- براون برآزش داده شده 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)

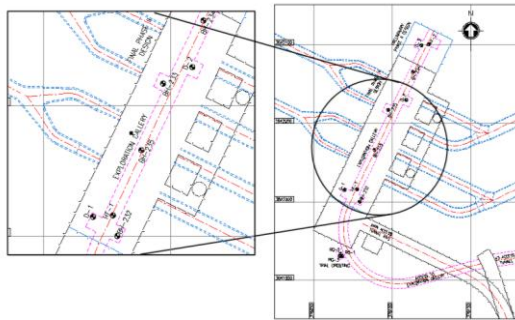
جدول (۳): مشخصات سیستم ناپیوستگی‌های برداشت شده در گالری اکتشافی مغار نیروگاه (پویری ۲۰۱۴)

نوع ناپیوستگی	شیب (Deg)	شیب (Deg)	فاصله داری (m)	پایابی (m)	بازشدگی (mm)
لایه بندی	۸۰ - ۶۵	۰۳۹ - ۰۲۹	۶ - ۶۰	> ۲۰	۲/۵ - ۰/۲۵
دسته درزه J1	۴۲ - ۳۰	۲۹۹ - ۲۷۳	۲۰ - ۶۰	< ۳	۲/۵ - ۰/۲۵
دسته درزه J2	۸۱ - ۶۷	۱۳۴ - ۱۲۶	۲۰ - ۶۰	< ۳	۲/۵ - ۰/۲۵
دسته درزه J3	۷۵ - ۶۰	۰۸۰ - ۰۶۵	۲۰ - ۶۰	< ۳	۲/۵ - ۰/۲۵

<sup>۱</sup>.Hydraulic fracture

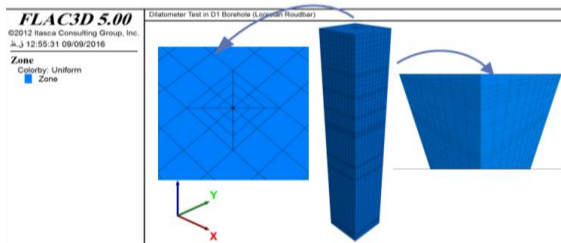
<sup>۲</sup>.Hydraulic Test on Pre-existing Fractures

استفاده شده است.

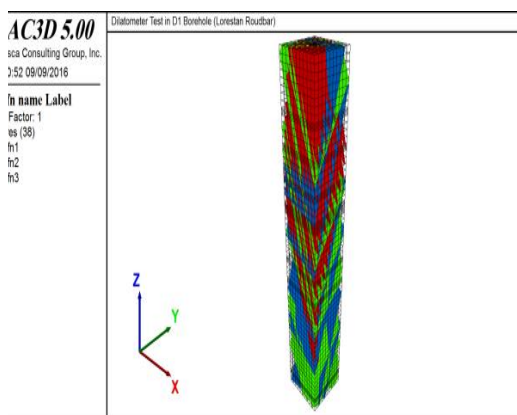


شکل (۳): موقعیت گمانه‌های اکتشافی و انجام آزمایش‌های برجا در داخل گالری اکتشافی مغار نیروگاه

برای تأثیر ناهمسانگردی در خصوصیات مواد، شبکه‌ی ناپیوستگی‌های مجزا (DFN) تولید شده است. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌گردد، به دلیل استفاده از خصوصیات دسته‌درزه‌ی J1 در مدل رفتاری، تنها سه شبکه‌ی ناپیوستگی ایجاد شده که به لایه‌بندی، دسته‌درزه‌ی J2 و دسته‌درزه‌ی J3 اختصاص داده شده است. ویژگی‌های ذکر شده‌ی ناپیوستگی‌ها در **Error! Unknown switch argument.** و **Error! Unknown switch argument.** نشان داده شده‌اند.



شکل (۴): نمای سه‌بعدی از هندسه‌ی شبکه



شکل (۵): شبکه‌ی ناپیوستگی‌های مجزای تولید شده

برای توده‌سنگ، مدل ناهمسانگرد درزه موجود در همه‌جا

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 اهر بر) و برداشت‌های انجام شده در گالری اکتشافی استفاده شده است.

جدول (۷): پارامترهای مقاومت برشی سطوح ناپیوستگی‌ها-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<sup>۱</sup> صورت گرفته است که در فرض پیوسته‌ی معادل توده‌سنگ درزه‌دار به صورت پیوسته و ناهمسانگرد تلقی می‌گردد. در محیط‌های شبه پیوسته<sup>۲</sup> 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، ایجاد شده 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<sup>۳</sup> به ابعاد ۶۰m × ۲m × ۲m و از آنجا به بعد از شبکه‌ی مکعبی<sup>۴</sup> با ابعاد مش ۱ m در سه راستا

<sup>۱</sup>.Equivalent Continuum

<sup>۲</sup>.Pseudo Continuum

<sup>۳</sup>.Radcylinder

<sup>۴</sup>.Brick

۳۱..... تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ آهک سازند دالان به روش عددی

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) شناسایی شده در محدوده‌ی مغار نیروگاه انتخاب شده است. پارامترهای این مدل رفتاری

است. در رابطه‌ی **Error! Reference source not found**

به جای **found**،  $k$  متوسط نسبت تنش افقی حداکثر و حداقل به قائم در تراز مغار نیروگاه به کاررفته است تا نسبت پواسون به دست آید.

$$K = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (1)$$

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 ارائه شده، استفاده می‌شود.

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

$$\nu_m = \left( \frac{1 + 5\nu_r}{9 + 5\nu_r} \right) \quad (3)$$

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 داده شده است.

جدول (۸): پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ

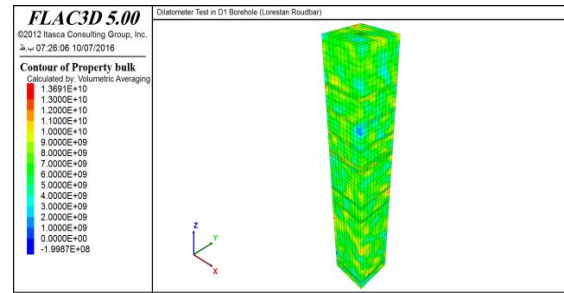
کمیت آماری	مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاکی داخلی (Deg)	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )
میانگین	۸/۷۳	۰/۲۷	۲/۳	۴۵	۲/۷
انحراف معیار	۲/۹۲	۰/۰۳	۰/۶	۱	۰/۰۴

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

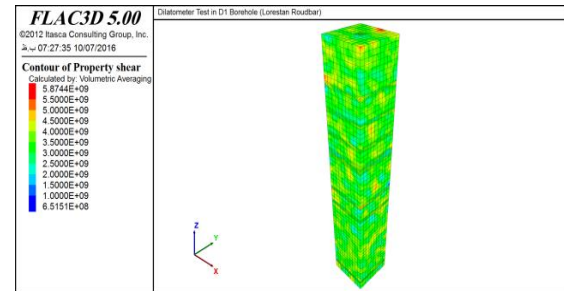
مدول یانگ و نسبت پواسون توده‌سنگ درزه‌دار ناهمگن است و از فاصله‌داری خیلی زیاد تا فاصله‌داری خیلی کم ناپیوستگی‌ها کاهش می‌یابد. برای توزیع ناهمگن مدول یانگ و نسبت پواسون در **Error! Unknown switch argument** استفاده شده است. مقدار حداکثر مدول یانگ و نسبت پواسون توده‌سنگ در فاصله‌داری خیلی زیاد ناپیوستگی‌ها معادل مدول الاستیک و نسبت پواسون ماده‌سنگ است در صورتی که 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 تزرافی و ریچارت (رابطه‌ی **Error! Reference source not found**) استفاده شده

راستای محور گالری (موازی محور X) به مرز بالایی شبکه وارد شده 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.



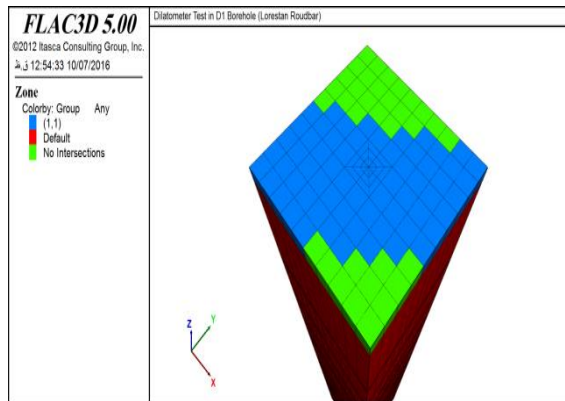
شکل (۶): تغییرات مدول بالک نمایانگر ساختار ناهمگن

توده‌سنگ



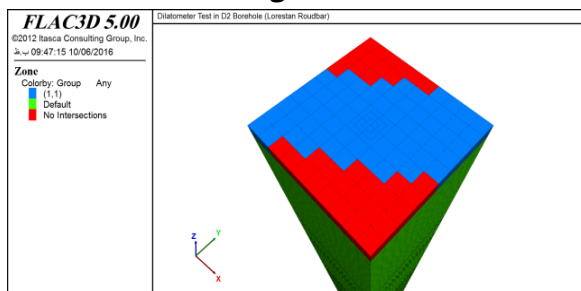
شکل (۷): تغییرات مدول برشی نمایانگر ساختار ناهمگن

توده‌سنگ



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

اکتشافی



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

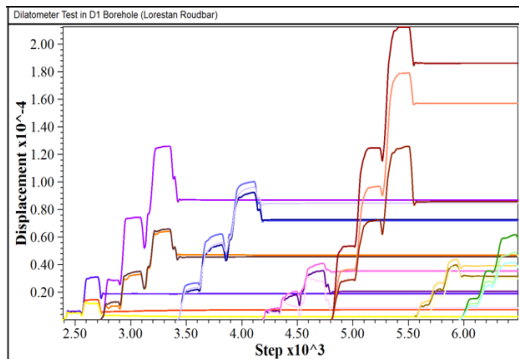
اکتشافی

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، میزان جابجایی‌ها در نقاط گرهی واقع بر دیواره‌ی گمانه صفر می‌شود. سپس آزمایش دیلاتومتری در

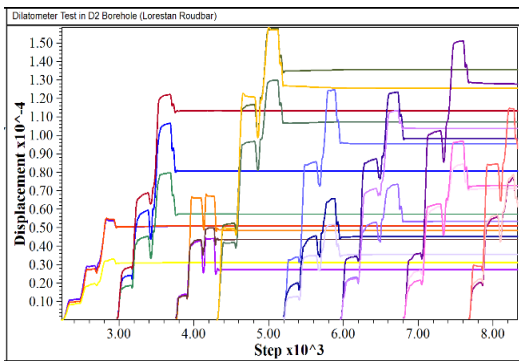
شرایط اولیه که بیانگر تنش‌های برجای طبیعی در منطقه هستند به صورت حاصل ضرب چگالی مواد در شتاب گرانش و ارتفاع در مدل‌ها ایجاد شده است. راستای تنش افقی حداکثر در محدوده‌ی آزیموت ۱۴۰ درجه قرار دارد که امتداد تنش افقی حداقل در راستای محور X و امتداد تنش افقی حداکثر در راستای محور Y منظور شده است؛ بنابراین 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 به صورت تنش ثقیلی<sup>۱</sup> به مرز بالایی شبکه اثر می‌گذارد. بیشینه و کمینه مقدار روباره در این محدوده برابر ۴۴۳ و ۴۲۷ متر می‌باشد که به صورت بار مثلی (غیریکنواخت) در خلاف

<sup>۱</sup>. Gravitational Stress

انجام شده؛ لذا در مدل گمانه‌ی D-1 در این عمق تنها دو چرخه شبیه‌سازی شده است که کاهش میز آنجابجایی در آن نسبت به دیگر اعماق مربوط به همین موضوع می‌باشد.



شکل (۱۰): نمودار جابجایی نقاط 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 ناپوستگی‌های مجزا و وجود تنش افقی حداکثر و حداقل است.

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

کمیت آماری	مدول تغییر شکل پذیری 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 شکل پذیری 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

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.

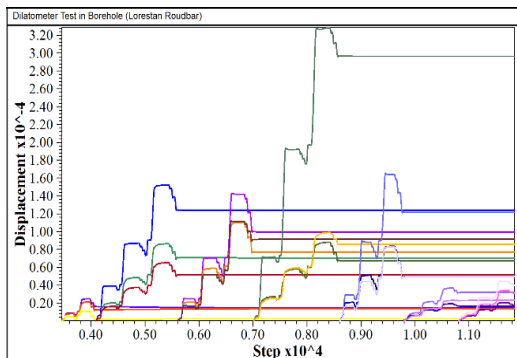
$$E_d = D \cdot \frac{\Delta p_i}{\Delta D} \cdot (1 + V_R) \quad (4)$$

### توده‌سنگ ناهمگن و ناهمسانگرد

مدول تغییر شکل به‌دست‌آمده از میزان جابجایی‌های نشان داده شده در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به‌ترتیب در جدول (۹)

جدول (۹) آورده شده است. از آنجایی که در عمق ۸/۵ متر گمانه‌ی D-1 آزمایش بر جای دیلاتومتری در دو چرخه

پیرامون فضای زیرزمینی تا شعاعی تحت تأثیر به هم خوردگی تنش‌های برجای طبیعی قرار دارد که بعد از این شعاع تغییرات مدول به مقدار اولیه 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.

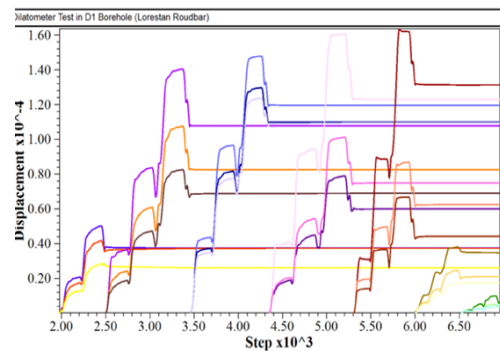


شکل (۱۳): نمودار جابجایی نقاط گرهی اعماق مورد آزمایش در گمانه‌ی فرضی بدون سطح آزاد

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. در صورتی که 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.

میانگین مدول تغییر شکل کل به‌دست‌آمده حاصل از مدلسازی عددی دو گمانه با میانگین کل نتایج آزمایش برجای دیلاتومتری در جدول (۱)، 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 (۱۴): نمودار جابجایی 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

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ محدوده‌ی مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان به‌طور غیرمستقیم توسط روش عددی تفاضل محدود با تکیه بر 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 شکل پذیری توده سنگ 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

- 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 assessments *Engineering 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. Rahmannedjad, 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). Roudbar Lorestan 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.
  - 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,