Journal of Damand Hydroelectric PowerPlant
۶th Year / No. ۲۲ / December ۲۰۱۹

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال ششم / شماره بیست و دوم/ پاییز ۱۳۹۸

توسعه یک روش تجربی برای برآورد مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ‌های آهکی

محسن احمدلو[۱]
محمود بهنیا* [۲]
محسن شریفی بروجردی[۳]

چکیده

مدول تغییر شکل‌پذیری ازجمله مهم‌ترین پارامترهای توده‌سنگ به شمار می‌آید که برای اندازه‌گیری میزان تغییر شکل در بارگذاری‌ها به کار می‌رود. علاوه بر بارهای استاتیکی، بارهای دینامیکی نیز در مواردی مانند زلزله و انفجارها از اهمیت بالایی برخوردارند، بنابراین ضرورت تعیین پارامترهای دینامیکی به‌اندازه خصوصیات استاتیکی احساس می‌شود. مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ با استفاده از آزمایش‌های توموگرافی و شکست مرزی تعیین می‌گردد که این آزمایش‌ها اغلب زمان‌بر و هزینه‌بر بوده و بنابراین در تمامی پروژه‌ها امکان انجام آن‌ها وجود ندارد، درنتیجه می‌توان از روش‌های غیرمستقیم برای تخمین این پارامتر بهره گرفت. با توجه به ساده و فراگیر بودن استفاده از شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) در طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ و از طرفی اندازه‌گیری مدول دینامیکی آزمایشگاهی با هزینه و زمان بسیار کم در آزمایشگاه؛ در این پژوهش با استفاده از آزمایش‌های دینامیکی برجا و آزمایشگاهی انجام‌شده در پنج طرح بزرگ برقابی در ایران و طبقه‌بندی GSI، مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ‌های آهکی برآورد گردیده است. تحلیل رگرسیون چند متغیره نشان داد که می‌توان مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ را با استفاده از شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) و مدول دینامیکی آزمایشگاهی با دقت قابل‌قبولی تخمین زد.

واژه‌های کلیدی:
مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی، شاخص مقاومت زمین‌شناسی، آزمایش توموگرافی، رگرسیون چند متغیره

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن- مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی اصفهان. mohsen_ahmadloo@yahoo.com
۲*. استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان. Behnia@cc.iut.ac.ir
۳. کارشناس ارشد مکانیک سنگ شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس. msh_sharifi@yahoo.com

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۶۸/۰۳/۲۶

مقدمه

مدول تغییر شکل‌پذیری ازجمله مهم‌ترین پارامترهایی است که رفتار مکانیکی توده‌سنگ را تحت بارهای وارده، به‌خوبی نشان می‌دهد (پالمسترم[۱]،۲۰۰۱). این پارامتر دارای کاربرد گسترده‌ای در تمام پروژه‌های ژئوتکنیکی و عمرانی است که شامل مدول تغییرشکل‌پذیری استاتیکی و دینامیکی می‌شود و برای سنجش میزان جابه‌جایی در بارگذاری‌ها به کار می‌رود. این پارامتر به‌اندازه‌ای اهمیت دارد که میلر[۲] پیشنهاد می‌کند می‌توان از آن، همراه با تنش‌ها و فشارهای برجا به‌عنوان یک معیار برای ارزیابی پایداری توده‌سنگ استفاده کرد (میلر،۱۹۷۴). در طراحی برخی از سازه‌های مهندسی در شرایط بارگذاری لرزه‌ای همچون انفجار و زلزله، به مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی نیاز است؛ بنابراین استخراج این پارامتر از توده‌سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. لازم به ذکر است این پارامتر در توده‌سنگ با استفاده از نتایج آزمایش‌های ژئوفیزیکی بزرگ‌مقیاس نظیر توموگرافی[۳] و شکست مرزی[۴] محاسبه می‌شوند. در مهروموم‌های اخیر استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در مهندسی سنگ، کاربرد زیادی پیداکرده است. با توجه به اینکه آزمایش‌های ذکرشده فقط در پروژه‌های خاص انجام می‌شوند و عمدتاً زمان‌بر و هزینه‌بر هستند، بنابراین با تخمین غیرمستقیم این پارامتر با استفاده از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ می‌توان در زمان و هزینه‌ها صرفه‌جویی کرد.

تاکنون پژوهشگران مختلفی ارتباط بین روش‌های طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ را با تغییر سرعت امواج لرزه‌ای در توده‌سنگ موردمطالعه قرار داده‌اند (جدول (۱)). هرچند ضرایب تعیین ارائه‌شده برای این روابط عمدتاً دارای مقادیر بالایی نیستند ولی پژوهش‌های صورت گرفته، دقت مناسب این پارامترها و همچنین وابستگی آن‌ها به همدیگر را نشان می‌دهد.

علاوه بر این پژوهشگران از روش‌های لرزه‌ای برجا، همانند توموگرافی برای تخمین ویژگی‌هایی از توده‌سنگ بهره گرفته‌اند که خلاصه‌ای از مهم‌ترین این پژوهش‌ها در جدول (۲) ارائه‌شده است. به لحاظ اینکه پارامتر تغییر شکل در مواد وابسته به‌سرعت انتشار امواج در درون آن‌ها می‌باشند بسیاری از روش‌ها بر اساس سرعت امواج توسعه داده‌شده‌اند (کریستاکوآ[۵] و پانلدو[۶]، ۱۹۹۵). همچنین زلاتکو[۷] رابطه‌ی تجربی میان مدول تغییر شکل‌پذیری استاتیکی و دینامیکی در توده‌سنگ را به‌صورت زیر ارائه کرد (زلاتکو ۲۰۱۲):

$$E_{dyn} = 1.5318E^{0.8829} \qquad R2=۰/۵۹۸$$

جدول (۱): روابط میان طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ و سرعت امواج

محقق	رابطه	سال	R^2
ایلناگا[۸] (۱۹۹۶)	$RQD=36.7\times V_P^{0.52}$	۱۹۹۶	۰/۶۰۸
ایلناگا (۱۹۹۶)	$RMR=18.05\times[100\frac{V_F}{V_L}]^{0.26}$	۱۹۹۶	۰/۷۰۵
ایلناگا (۱۹۹۶)	$LnQ=0.03\times[100\frac{V_F}{V_L}]^{0.97}$	۱۹۹۶	۰/۶۰۸
بارتن[۹] (۱۹۹۱)	$V_P=3.5\log_{10}Q$	۱۹۹۱	-
دی‌یر[۳] (۱۹۹۶)	$RQD=100\frac{V_{Field}}{V_{Lab}}$	۱۹۹۶	-
بری و ساد[۱۰] (۲۰۱۲)	$RQD = 0.97\frac{V_{Field}}{V_{Lab}}$	۲۰۱۲	۰/۹۷۸
بری و ساد (۲۰۱۲)	$V_P=21.951\ (RQD)+0.1368$	۲۰۱۲	۰/۸۳۷
زلاتکو (۲۰۱۲)	$RMR=0.0161\ V_p\ +1.4973$	۲۰۱۲	۰/۷۹۴
نورانی (۲۰۱۶)	$RQD=0.924\frac{V_{PF}}{V_{PL}}+0.172$	۲۰۱۶	۰/۶۷۶
فاطمی (۲۰۱۹)	$Q = 0.0905V_P^{3.24}$	۲۰۱۹	۰/۴۲

[۱] Palmström
[۲] Miller
[۳] Tomography
[۴] Seismic Refraction
[۵] Kristakova
[۶] Pandula
[۷] Zelatco
[۸] El-Naqa
[۹] Barton
[۱۰] Bery & Saad

شاخص مقاومت زمین‌شناسی[۱] (GSI) که در سال ۱۹۹۵ توسط هوک[۲] به‌عنوان معیاری برای ارزیابی مقاومت و میزان تغییر شکل‌پذیری توده‌های سنگی ارائه گردید به دلیل سهولت به‌طور گسترده برای برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ مورداستفاده قرارگرفته است. لازم به ذکر است که این طبقه‌بندی با ترکیبی از شاخص‌های زمین‌شناسی ازجمله هوازدگی، پرشدگی و زبری درزه‌ها و نیز با ملاحظات بصری توسعه‌یافته است (مارینوس[۳]، ۲۰۰۵).

در جدول (۳) روابطی ارائه‌شده‌اند که در آن از شاخص مقاومت زمین‌شناسی به‌عنوان یک پارامتر ورودی برای تخمین سایر پارامترهای سنگ استفاده‌شده است؛ بنابراین استفاده از این روش طبقه‌بندی برای برآورد پارامترهای توده‌سنگ معمول است. ازاین‌بین می‌توان به اسگوئی[۴] اشاره کرد که روشی تجربی برای طراحی پیچ سنگ‌های تزریقی با استفاده از شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) ارائه کرده است (اسگوئی،۲۰۰۹).

جدول (۲): استفاده از نتایج آزمایش‌های لرزه‌ای برجا برای تخمین ویژگی‌های توده‌سنگ

هدف	محقق
استفاده از نتایج توموگرافی برای پیش‌بینی پدیده ترکش در ذغال‌سنگ	گانگ[۵] (۲۰۱۹)
تخمین RCI در سنگ‌های گرانیتی با استفاده از سرعت امواج طولی $RCI = 7.2V_p + 6.7 \quad R^2 = 0.74$	لین[۶] (۲۰۱۷)
بهره‌گیری از سرعت امواج طولی برجا برای تخمین مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ	رادووانویک[۷] (۲۰۱۷)
استفاده از نتایج توموگرافی لرزه‌ای برای تعیین توزیع مجدد تنش در حفاری تونل	وستمن[۸](۲۰۰۳)
تخمین مدول استاتیکی آزمایشگاهی با استفاده از مدول دینامیکی برجا $E_s = 0.69E_d + 6.4 \quad R^2 = 0.75$	کن[۹](۱۹۹۲)

جدول (۳): روابط ارائه‌شده بین GSI و سایر پارامترهای سنگ

R^2	سال	رابطه	محقق
/۲۷۲ ۰	۲۰۱۸	$E_P = 25.309GSI + 211.58$ مدول تغییر شکل‌پذیری:Ep	ابراهیم فرید[۱۰](۲۰۱۸)
-	۲۰۱۶	$V_p(m/s)=4520-\frac{1920}{1+e^{(GSI-47.5)/7.4}}$ سرعت موج طولی برجا:Vp	اگلیاردی[۱۱] (۲۰۱۶)
–	۲۰۰۶	$\frac{E_m}{E_r} = 0.02 + \frac{1-D/2}{1+e^{(60+15D-GSI)/11}}$ مدول تغییر شکل‌پذیری:Em مدول یانگ آزمایشگاهی:Er فاکتور تخریب :D	هوک (۲۰۰۶)
–	۱۹۸۳	$E_m = \left(1-\frac{D}{2}\right)-\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}10^{\frac{GSI-10}{40}}$	سرافیم[۱۲] (۱۹۸۳)

همان‌گونه که بیان شد روابطی میان سرعت موج برجا و طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ به‌منظور ارزیابی کیفیت توده‌سنگ ارائه‌شده است، اما ارتباط بین مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ و مدول دینامیکی آزمایشگاهی با لحاظ کردن شرایط توده‌سنگ و استفاده از طبقه‌بندی مهندسی موردمطالعه قرار نگرفته است. توده‌سنگ از دو قسمت سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها

---

۱ Geological Strength Index
۲ Hoek
۳ Marinos
۴ Osgoui
۵ Gong
۶ Lin
۷ Radovanovic
۸ Westman
۹ Caan
۱۰ İbrahim
۱۱ Agliardi
۱۲ Serafim

تشکیل‌شده است، اگر طبقه‌بندی مهندسی (در اینجا شاخص مقاومت زمین‌شناسی) را به‌عنوان نماینده ناپیوستگی‌ها و نتایج آزمایشگاهی (در اینجا مدول دینامیکی آزمایشگاهی) را به‌عنوان نماینده سنگ بکر در نظر بگیرد، با ادغام این دو پارامتر می‌توان تخمین قابل‌قبولی از مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ به دست آورد. لازم به ذکر است از نتایج آزمایش‌های دینامیکی در آزمایشگاه که با هزینه و زمان بسیار کم‌تر نسبت به آزمایش‌های دینامیکی بزرگ‌مقیاس، مانند توموگرافی قابل انجام می‌باشند به‌صورت محدود استفاده‌شده است. ازاین‌رو در این پژوهش با ترکیب نتایج مدول دینامیکی آزمایشگاهی و طبقه‌بندی‌های مهندسی توده‌سنگ تلاش شده تا تخمین قابل‌قبولی از مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ ارائه گردد.

توموگرافی لرزه‌ای

توموگرافی لرزه‌ای روشی است که در آن برای بررسی ویژگی‌های اجسام، آن‌ها را به یک سری سلول[۱] تقسیم‌بندی کرده و ویژگی‌های هر سلول را در آن به دست می‌آورند و با جمع یا انتگرال‌گیری روی کل سلول‌ها تصویر کاملی از ویژگی‌های یک جسم به دست می‌آید (کاکس[۲]، ۱۹۹۹). در این روش، طول‌موج باید به‌اندازه کافی کوچک باشد تا امواج انرژی لازم را برای انتشار درون جسم دارا باشند، بنابراین نتیجه و کیفیت یک تصویر حاصل از آزمایش توموگرافی به طول‌موج امواجی که فرستاده می‌شوند، بستگی دارد (اسکات[۳]، ۱۹۹۷). توموگرافی بر اساس منبع موج به بخش فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شود. در توموگرافی فعال منبع موج به‌صورت مصنوعی ایجاد می‌شود که می‌توان استفاده از چکش‌ها و مواد منفجره را نام برد. درحالی‌که در توموگرافی غیرفعال از منابعی که اختلالی در کار ایجاد نمی‌کنند مانند استفاده از لرزش ماشین‌های حفاری که در حال کار می‌باشند استفاده می‌شود (هاردی[۴]، ۲۰۰۵)؛ اما محدودیت‌های اصلی در استفاده از منبع غیرفعال، عدم کنترل بر موج مانند میزان زمان و مکان انتشار آن است. توموگرافی لرزه‌ای بر اساس یک رابطه ساده بنانهاده شده است که به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد. زمان سیر امواج با انتگرال‌گیری بر روی معکوس سرعت از فرستنده تا گیرنده با رابطه (۲) محاسبه می‌شود (لاکسبچر[۵]، ۲۰۰۸).

$$V = \frac{L}{t} \rightarrow Vt = L \qquad (۱)$$

$$t = \int_S^R \frac{1}{v}\, dL = \int_S^R P\, dL$$
$$t_i = \sum_{j=1}^{M} P_j L_{ij} \quad (i = 1, 2, ..., n) \qquad (۲)$$

که در آن V سرعت موج، L فاصله بین گیرنده و فرستنده موج، t زمان سیر موج، P کندی یا عکس سرعت موج، n تعداد پرتوهای موج، M تعداد تمامی سلول‌های موجود، t_i زمان سیر i امین پرتو، P_j کندی[۶] در j امین سلول و L_{ij} فاصله پرتو iام در سلول jام است. برای حل این معادلات اگر فاصله، زمان و کندی برای هر سلول به‌صورت ماتریس بیان شوند بر اساس تئوری معکوس سازی به‌صورت رابطه‌ی (۳) قابل‌حل خواهد بود:

$$T = LP \rightarrow P = L^{-1}T \qquad (۳)$$

T ماتریس زمان سیر امواج با بعد $(N*۱)$ و L ماتریس فاصله با بعد $(M*N)$ و P ماتریس کندی با بعد $(M*۱)$ است. برای حل این معادله از یک سری فرآیندهای تکراری استفاده می‌شود که معروف‌ترین آن فن بازسازی تکرار هم‌زمان[۷](SIRT) است. برای آگاهی از جزئیات بیشتر درباره این روش و فن محاسباتی مذکور می‌توان به (تارانتولا[۸]، ۲۰۰۵) و (حسینی[۹]، ۲۰۱۷) مراجعه کرد.

---

[۱] Cell
[۲] Cox
[۳] Scott
[۴] Hardy
[۵] Luxbacher
[۶] slowness
[۷] Simultaneous Iterative Reconstruction Technique
[۸] Tarantola
[۹] Hosseini

تحلیل رگرسیون

تجزیه‌وتحلیل رگرسیون یک روش آماری برای بررسی و مدل‌سازی رابطه بین متغیرها است و ترکیبی از ریاضیات پایه و نظریه‌های آماری است که به‌خوبی در کنار هم توسعه‌یافته‌اند. استفاده موفق از تحلیل رگرسیون نیاز به فهم هر دو نظریه مورداشاره دارد. در روش رگرسیون‌گیری دو نمونه از خطا به نام‌های خطای جذر میانگین مربعات[۱] و خطای میانگین مطلق[۲] مطرح می‌شود. چای[۳] برخلاف نظر ویلموت[۴] و همکارانش معتقد است که در بسیاری از شرایط استفاده از خطای جذر میانگین مربعات برای ارائه نحوه عملکرد مدل بهتر از خطای مطلق است. چای اشاره می‌کند که هنگامی‌که تعداد داده‌ها زیاد باشد استفاده از خطای جذر میانگین مربعات می‌تواند قابل‌اعتمادتر باشد (چای، ۲۰۱۴) و (ویلموت ۲۰۰۹). خطای جذر میانگین مربعات و خطای مطلق به ترتیب با استفاده از روابط (۴) و (۵) به‌دست می‌آیند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} e_i^{\,2}}{n}} \qquad (۴)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |e_i|}{n} \qquad (۵)$$

همچنین در تحلیل رگرسیون ضریب تعیین[۵] (R^2) را می‌توان تعریف کرد که بیانگر میزان احتمال هم‌بستگی میان دو دسته داده است. این ضریب درواقع تقریب پارامتر موردنظر را در مدل ریاضی مفروض بیان می‌دارد و همواره عددی بین ۰ و ۱ است. اگر ضریب تعیین برابر با ۰ باشد، بدین معنی است که همبستگی بین متغیر مستقل و متغیر وابسته وجود ندارد و هرچقدر این ضریب به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی همبستگی بیشتر است.

معنی‌داری در وابستگی مدل رگرسیون

ازآنجاکه پژوهشگر نمی‌تواند تمامی متغیرهای نامربوط را کنترل کند سطحی از احتمال خطا را تعیین می‌کند و نتایج پژوهشی خود را با آن احتمال گزارش می‌نماید. بیشتر پژوهشگران از سطح معنی‌داری ۱٪ یا ۵٪ در تصمیم‌گیری برای رد فرضیه‌ی صفر استفاده می‌کنند. در بیشتر گزارش‌های پژوهشی برای گزارش معنی‌دار بودن تفاوت یا رابطه‌ی میان متغیرها از سطح معنی‌داری که معمولاً در علوم انسانی ۵٪ است، استفاده می‌کنند و با نماد P یا Sig آن‌ها را نمایش می‌دهند. اگر رابطه بین متغیرها کمتر از ۵٪ باشد، می‌توان گفت که احتمال شانسی بودن این رابطه خیلی کم است و می‌توان نتیجه گرفت که رابطه موردنظر معنی‌دار است. درصورتی‌که سطح معناداری بیشتر از ۵٪ باشد، پس احتمال شانسی بودن نتیجه زیاد است، در این صورت ارتباط‌ها معنی‌دار نیستند و فرضیه‌ی صفر پذیرفته و فرضیه‌ی یک (فرض موردقبول پژوهشگر) رد خواهد شد. مفهوم معنی‌داری در وابستگی دو متغیر این است که آیا وابستگی به‌دست‌آمده بین دو متغیر را می‌توان شانسی و تصادفی دانست یا واقعاً بین دو متغیر وابستگی وجود دارد. (کلانتری، ۱۳۸۹). فرضیه‌های صفر و مقابل آماری آزمون معنی‌داری مدل تحلیل رگرسیون به‌صورت زیر بیان می‌شود:

فرض صفر: رابطه بین دو متغیر وجود ندارد.

فرض مقابل: رابطه بین دو متغیر وجود دارد.

به‌طورکلی در تحلیل روابط تحلیل رگرسیون از مقدار (P-Value) یا (Sig) که بیانگر شانسی یا تصادفی بودن اختلاف یا ارتباط مشاهده‌شده می‌باشند، استفاده می‌شود. اگر مقدار معنی‌داری (Sig) کمتر از ۵ درصد باشد فرض صفر رد و فرض مقابل (H1) پذیرفته می‌شود. این بدان معنی است که وابستگی بین دو متغیر وجود دارد؛ اما اگر بزرگ‌تر از ۵ درصد باشد فرض (H1) قبول می‌شود و وابستگی بین دو متغیر شانسی قلمداد می‌گردد. در یک بررسی تنها ۵٪ تصادفی بودن رخداد قابل‌قبول است. چنانچه این مقدار کمتر از ۱٪ باشد وابستگی بین متغیرها در سطح ۹۹٪=P و اگر مابین ۱٪ تا ۵٪ باشد وابستگی بین متغیرها در سطح۹۵٪=P معنی‌دار خواهد بود (کلانتری۱۳۸۹).

---

[۱] Root-Mean-Square Error

[۲] Mean Absolute Error

[۳] Chai

[۴] Willmott

[۵] Coefficient of Determination

نحوه استخراج داده‌ها

با توجه به مقاطع موجود از آزمایش‌های توموگرافی و شکست مرزی که در چندین ساختگاه سد در غرب و جنوب غرب ایران انجام‌شده بود داده‌های مربوط به‌سرعت موج طولی و عرضی برجا، شاخص کیفیت توده‌سنگ و شاخص مقاومت زمین‌شناسی استخراج گردید. ساختگاه این سدها عمدتاً شامل سازندهای آسماری، امیران، تاربور و گچساران می‌باشد که طیفی از سنگ‌های رسوبی آهکی ازجمله مارن‌های آهکی، آهک‌های مارنی، آهک‌های دولومیتی و ... را در برمی‌گیرند. برای همسان بودن جنس سنگ‌ها به یکدیگر، داده‌ها از نقاطی از استخراج شدند که شامل سنگ‌های رسوبی آهکی بودند. همچنین نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی این ساختگاه‌ها ازجمله سرعت امواج برشی و طولی که در شرایط رطوبت طبیعی اندازه‌گیری شده بودند جمع‌آوری گردید. با توجه به اینکه آزمایش‌های برجا در حالت رطوبت طبیعی انجام‌شده‌اند سعی شد از داده‌های آزمایشگاهی دارای شرایط مشابه استفاده شود. هرچند که سرعت موج‌برشی از رطوبت تأثیر نپذیرفته و با توجه به تخلخل کم نمونه‌ها تأثیر رطوبت بر سرعت موج طولی هم قابل‌توجه نیست.

برای استخراج داده‌های شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) از اطلاعات حاصل از گمانه‌ها و گالری‌های اکتشافی حفرشده در این ساختگاه‌ها کمک گرفته شد. بدین‌صورت که ابتدا میزان RQD برای بازه‌های مختلف در گمانه‌ها به‌دست آمد و سپس شرایط این درزه‌ها (J_{cond}) شامل میزان بازشدگی، پرشدگی، هوازدگی، فاصله‌داری و زبری درزه‌ها از روی لاگ‌های موجود برای گمانه‌ها محاسبه شد. سپس شاخص مقاومت زمین‌شناسی با استفاده از رابطه (۶) محاسبه گردید (هوک، ۲۰۱۳).

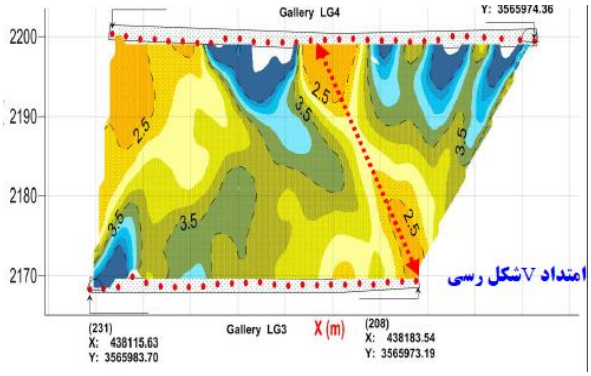
$$GSI = 1.5 J_{Cond} + \frac{RQD}{2} \qquad (۶)$$

در شکل (۱) تصاویری از مقاطع سرعت موج در آزمایش‌های توموگرافی بین گالری و شکست مرزی آورده شده است.

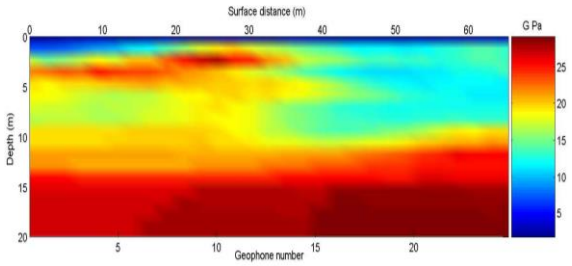
در ادامه با توجه به موقعیت قرارگیری گمانه‌ها در مقاطع سرعت امواج برجا، سرعت امواج طولی و عرضی در محل‌های موردنظر استخراج و مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ با استفاده از رابطه‌ی (۷) محاسبه گردید.

$$E_{dyn} = \rho V_s^2 \frac{(3 V_P^2 - 4 V_s^2)}{V_P^2 - V_s^2} \qquad (۷)$$

در شکل (۲) فلوچارت مربوط به نحوه‌ی استخراج داده‌ها آورده شده است. در این فلوچارت E_{dL} مدول تغیر شکل-پذیری آزمایشگاهی می‌باشد. علاوه بر این در جدول (۴) تحلیل آماری داده‌های مربوط به مدول دینامیکی آزمایشگاهی، مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ و شاخص مقاومت زمین‌شناسی و در جدول (۵) بازه‌ی تغییرات سرعت موج‌های طولی و عرضی برجا و مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی برای هر ساختگاه آورده شده است.

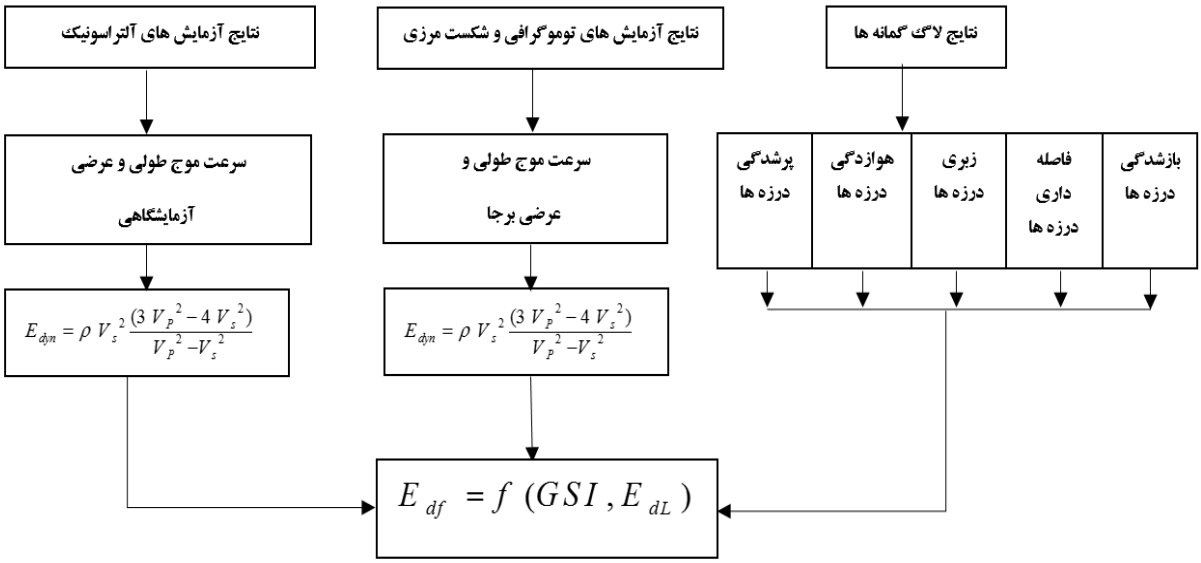


(الف)



(ب)

شکل (۱): تصاویر مقاطع مربوط به آزمایش‌های ژئوفیزیکی الف) توموگرافی بین گالری؛ب) شکست مرزی



شکل (۲): فلوچارت نحوه‌ی استخراج مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ

جدول (۴): تحلیل آماری داده‌های مورداستفاده در پژوهش

متغیر	تعداد داده	حداقل	حداکثر	میانگین	میانه	دامنه تغییرات	واریانس	انحراف معیار	ضریب تغییرات	کشیدگی	چولگی
E_{df} (GPa)	۱۶۴	۴	۷۴	۳۲/۵	۳۲/۵۲	۶۹/۹	۱۸۷/۹	۱۳/۷۱	۰/۴۲۱	۰/۷۴۳	۰/۵۱
E_{dL} (GPa)	۱۶۴	۱۳/۳	۹۰	۵۵/۷۷	۵۳/۵	۷۷/۵۹	۲۶۴/۲	۱۶/۲۵	۰/۲۹۱	-۰/۰۴۷	-۰/۰۱۸
GSI	۱۶۴	۴۲	۸۱	۶۴/۲۷	۶۵/۷	۳۹	۶۸/۵	۸/۲۷	۰/۱۲۸	-۰/۱۵۶	-۰/۵۴۴
V_{PL} (m/s)	۱۶۴	۲۵۷۸	۶۸۲۰	۵۲۴۷	۵۲۳۰	۲۴۶۷	۲۳۱۴۰۱	۸۲۱	۰/۱۵۶	۰/۹۴۸	-۰/۶۷۱
V_{SL} (m/s)	۱۶۴	۱۴۵۳	۳۷۳۰	۲۹۱۵	۲۸۸۴	۲۲۷۶	۱۹۶۹۰۲	۴۴۴	۰/۱۵۲	۱/۰۷	-۰/۶۸۱

جدول (۵): دامنه تغییرات داده‌های ورودی مربوط به توده‌سنگ در هر یک از ساختگاه‌ها

ساختگاه سد	سازند	جنس سنگ	سرعت موج طولی برجا (متر بر ثانیه)	سرعت موج عرضی برجا (متر بر ثانیه)	مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ (گیگاپاسکال)	GSI
تنگ معشوره	تاربور- امیران	آهک خاکستری- لای سنگ	۱۳۲۰-۵۴۰۰	۲۷۹۰-۷۹۷	۴-۵۹	۵۴-۷۳
رودبار لرستان	آسماری-پابده	آهک‌های رسی- مارن	۲۰۵۰-۵۹۹۰	۳۲۶۵-۱۱۱۷	۹-۷۴	۴۵-۸۰
خرسان۲	آسماری -گچساران	آهک - مارن	۳۸۵۰-۴۲۵۰	۲۳۳۴-۲۱۴۰	۲۰-۳۲	۵۴-۷۱
کوهرنگ ۳	سروک-ایلام	آهک‌های دولومیتی و مارنی	۱۹۲۰۰-۴۸۰۰	۲۵۳۴-۱۰۵۵	۸-۴۴	۴۲-۷۰
بختیاری	سروک	سنگ‌آهک -آهک مارنی	۲۱۱۰-۵۲۵۵	۲۸۱۲-۱۱۶۵	۹-۵۳	۵۳-۷۰

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

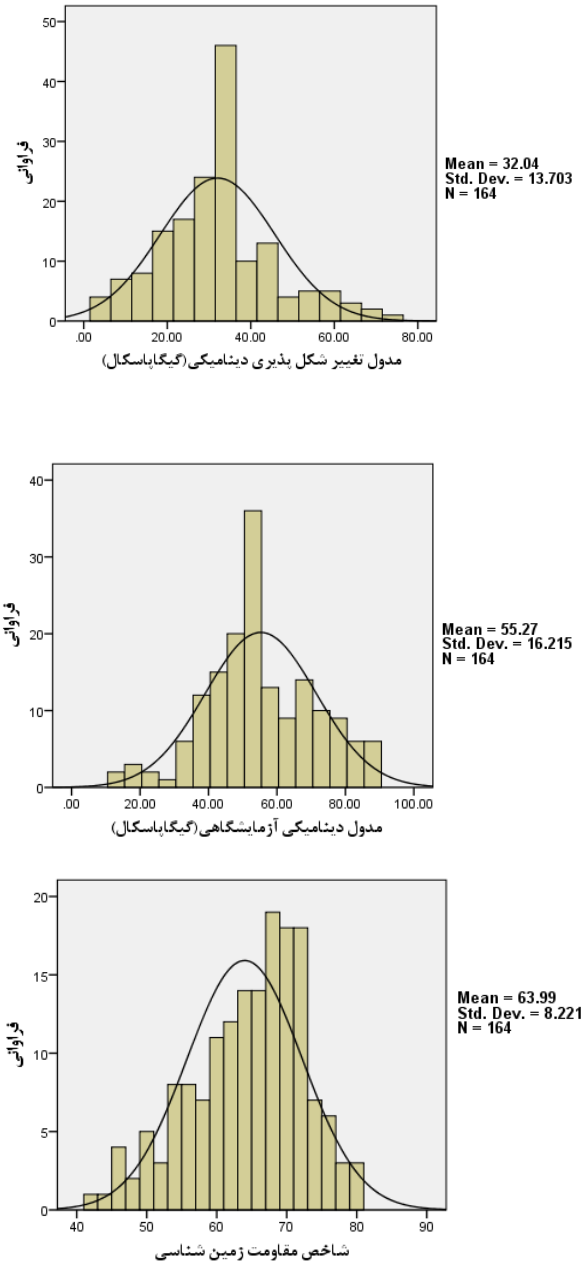
در این تحقیق درمجموع از ۱۶۴ داده شامل، مدول دینامیکی آزمایشگاهی، شاخص مقاومت زمین‌شناسی و مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ مربوط به ساختگاه‌های معرفی‌شده در بخش قبل استفاده گردید (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، مطالعات مکانیک سنگی و ژئوفیزیکی انجام‌شده در سدهای تنگ معشوره، رودبار لرستان، خرسان۲، کوهرنگ ۳، بختیاری).

در شکل (۳) هیستوگرام توزیع داده‌های مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی، شاخص مقاومت زمین‌شناسی و مدول دینامیکی آزمایشگاهی همراه با تابع توزیع آن‌ها ارائه‌شده است. همان‌گونه که از این نمودارها پیداست نحوه توزیع داده‌ها حول میانگین بوده و این بدان معناست که داده‌ها از توزیع تقریباً نرمال تبعیت می‌کنند.

برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS استفاده گردید و خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین به‌عنوان دو معیار برای انتخاب روابط قرار داده شد. هرچقدر میزان خطای جذر میانگین مربعات[۱] کمتر و میزان ضریب تعیین[۲] بیشتر باشد، رابطه حاصل از تحلیل رگرسیون از اعتبار بیشتری برخوردار می‌باشد.

بررسی تغییرات مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی نسبت به تغییرات GSI

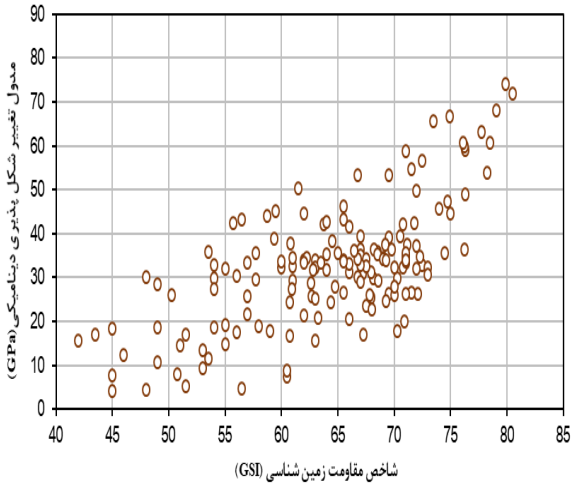
در گام اول برای بررسی نحوه تغییرات مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی نسبت به تغییرات شاخص مقاومت زمین‌شناسی نمودار شکل (۴) ارائه‌شده است. با توجه به نمودار ملاحظه می‌گردد که با بیشتر شدن میزان شاخص مقاومت زمین‌شناسی به تبعیت از آن میزان مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ نیز بیشتر می‌شود. دلیل این امر می‌تواند به این صورت تفسیر شود که چون شاخص مقاومت زمین‌شناسی که با استفاده از رابطه‌ی (۶) استخراج‌شده است از پنج پارامتر زبری، هوازدگی، پرشدگی، فاصله‌داری، دوام و میزان بازشدگی تأثیر می‌پذیرد و هرکدام از این عوامل نیز در تغییر سرعت موج و به‌تبع آن تغییر مدول دینامیکی توده‌سنگ تأثیرگذار هستند، بنابراین با تغییر شاخص مقاومت زمین‌شناسی، مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ نیز تغییر می‌کند.



شکل (۳): نمودار هیستوگرام مربوط به مدول دینامیکی آزمایشگاهی، مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی و شاخص مقاومت زمین‌شناس

---

[۲] Coefficient of Determination



شکل (۴): نمودار تغییرات مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ نسبت به تغییرات شاخص مقاومت زمین‌شناسی

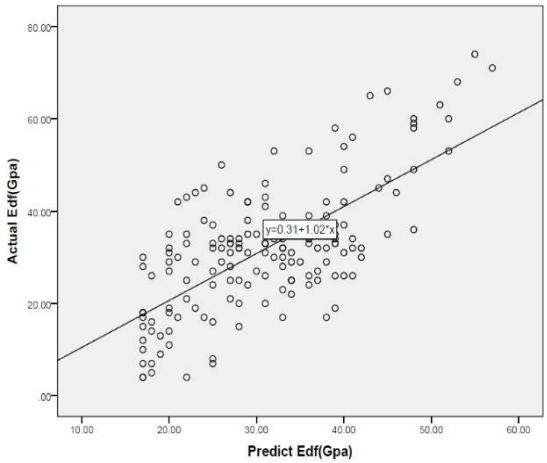
روابط میان GSI و مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ

با توجه به نمودار ارائه‌شده در بخش قبل ملاحظه گردید مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ با شاخص مقاومت زمین‌شناسی ارتباط مستقیم دارد.

در این بخش با استفاده از تحلیل رگرسیون نحوه این ارتباط موردمطالعه قرار گرفت؛ بنابراین برای بررسی صحت تحلیل رگرسیون انجام‌شده میزان سطح معنی‌داری نیز برای روابط به دست آمد. در جدول (۶) نتایج حاصل از رگرسیون‌گیری به‌همراه روابط به‌دست‌آمده نشان داده‌شده است. همچنین در شکل (۵) نمودار حاصل از رگرسیون‌گیری و نمودار مقایسه خروجی رگرسیون با مقادیر واقعی ارائه‌شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اگر تنها از طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ (GSI) برای تخمین مدول دینامیکی توده‌سنگ استفاده شود، رابطه برآورد شده دارای ضریب تعیین پایین بوده و نمی‌تواند قابل‌اطمینان باشد. ضریب تعیین برآورد شده در این حالت برابر با ۴۸ درصد می‌باشد؛ بنابراین ضروری است که با لحاظ نمودن پارامترهای دیگری که نشان‌دهنده جنس سنگ باشد، این روابط را بهبود بخشید. در ادامه از نتایج مدول دینامیکی آزمایشگاهی نیز برای تخمین روابط استفاده شد.

جدول (۶): روابط حاصل از تحلیل رگرسیون تک متغیره میان مدول دینامیکی توده‌سنگ و شاخص مقاومت زمین‌شناسی

شماره	معادله رگرسیون	(R^2)	Sig	RMSE
(۸)	$E_{dF} = 71.498 - 2.54GSI + 0.029\ GSI^2$	۰/۴۸	۰,۰	۹/۸۷



شکل (۵): نمودار مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده توسط رابطه (۸)

روابط میان GSI و مدول دینامیکی آزمایشگاهی با مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ

همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد توده‌سنگ از دو قسمت سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها تشکیل‌شده است و بنابراین مدول دینامیکی توده‌سنگ نیز تحت تأثیر هر دو قسمت قرار دارد، ازاین‌رو باید برای تخمین این پارامتر از توده‌سنگ از نتایج مربوط به هر قسمت بهره گرفت. به همین منظور در این تحقیق مدول دینامیکی آزمایشگاهی به‌عنوان نماینده سنگ بکر و طبقه‌بندی مهندسی GSI به‌عنوان نماینده قسمت ناپیوستگی‌ها مطرح می‌باشد.

برای این منظور ابتدا تحلیل رگرسیون خطی میان مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ، مدول دینامیکی

آزمایشگاهی و شاخص مقاومت زمین‌شناسی انجام شد که نتایج آن در جدول (۷) ارائه‌شده است.

جدول (۷): معادله حاصل از رگرسیون گیری خطی میان مدول دینامیکی آزمایشگاهی، مدول دینامیکی توده‌سنگ و شاخص مقاومت زمین‌شناسی

شماره	معادله رگرسیون	(R^2)	Sig	RMSE
(۹)	$E_{df} = -37.33 + 0.6933\,GSI + 0.4533E_{dL}$	۰/۷	۰/۰	۷/۵

همان‌گونه که از این جدول نیز مشخص است با ورود مدول دینامیکی آزمایشگاهی به محاسبات، ضریب تعیین رابطه افزایش پیداکرده و میزان خطای جذر میانگین مربعات کاهش پیدا می‌کند. با توجه به رابطه‌ی خطی برآورد شده ملاحظه می‌گردد که این رابطه نمی‌تواند تمام بازه‌های مربوط به شاخص مقاومت زمین‌شناسی را پوشش داده و به‌طور مثال زمانی که شاخص مقاومت زمین‌شناسی صفر شود مقدار مدول دینامیکی توده‌سنگ، منفی خواهد شد. ازاین‌رو تلاش شد در ادامه رابطه‌ای غیرخطی میان سه پارامتر مورداشاره در توده‌سنگ توسعه داده شود و همچنین تأثیر شاخص مقاومت زمین‌شناسی به‌عنوان یک پارامتر کاهنده بر مدول دینامیکی آزمایشگاهی موردبررسی قرار گیرد تا روابط با اعتبار بیشتری از نظر ضریب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات حاصل گردد.

تأثیر GSI به‌عنوان یک پارامتر کاهنده بر مدول دینامیکی آزمایشگاهی

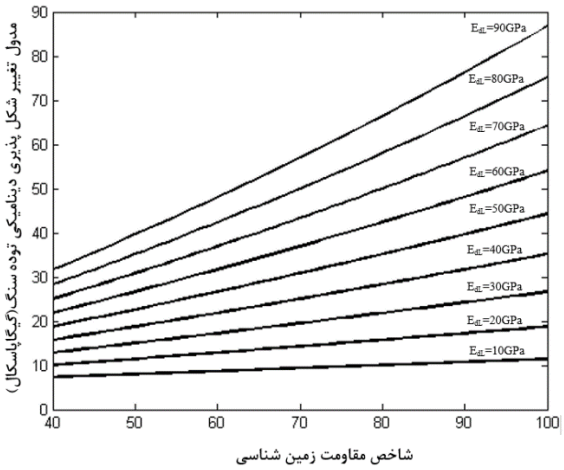
عاملی که توده‌سنگ و سنگ بکر را از یکدیگر متمایز می‌کند، اندازه‌ی نمونه و وجود ناپیوستگی‌های با شرایط سطحی مختلف در توده‌سنگ می‌باشد. اگر از GSI به‌عنوان عامل درزه‌داری و ضریب کاهنده استفاده شود می‌توان از روی نتایج آزمایشگاهی تخمین مناسبی برای نتایج برجا به دست آورد. به همین خاطر حاصل‌ضرب شاخص مقاومت زمین‌شناسی در مدول دینامیکی آزمایشگاهی تقسیم‌بر عدد ۱۰۰، که با نماد E'_{dl} معرفی‌شده است، برای انجام تحلیل رگرسیون مورداستفاده قرار گرفت لازم به ذکر است که در GSI برابر با ۱۰۰ مدول دینامیکی برجا برابر با مدول دینامیکی آزمایشگاهی خواهد شد و با کاهش مقدار GSI اختلاف پارامتر آزمایشگاهی و برجا افزایش می‌یابد. با تجزیه‌وتحلیل رگرسیون رابطه زیر حاصل گردید:

$$E_{dF} = 4.721 + 0.641(E'_{dL}) + 0.003(E'_{dL})^2 \qquad (۱۰)$$

R^2=۰/۷ RMSE=۷/۶

در این رابطه E_{df} مدول دینامیکی توده‌سنگ است. در نمودار ارائه‌شده در شکل (۶)، تغییرات مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ با در نظر گرفتن تغییر مدول دینامیکی آزمایشگاهی از ۱۰ تا ۹۰ گیگاپاسکال و شاخص مقاومت زمین‌شناسی از ۴۰ تا ۱۰۰ ترسیم‌شده است. همان‌گونه که از این نمودار نیز مشخص است رابطه برآورد شده برای تخمین مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ با استفاده از مدول دینامیکی آزمایشگاهی رابطه‌ای منطقی می‌باشد بدان معنا که در سطح پایین‌تر شاخص مقاومت زمین‌شناسی، مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی کم‌تر شده، درحالی‌که در سطح بالای شاخص مقاومت زمین‌شناسی مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ و مدول دینامیکی آزمایشگاهی به یکدیگر نزدیک می‌گردند. این بدان معناست که در میزان شاخص مقاومت زمین‌شناسی بیشتر از ۹۰ رفتار توده‌سنگ به سمت رفتار سنگ بکر میل می‌کند.

همچنین می‌توان ملاحظه کرد که از مدول دینامیکی آزمایشگاهی ۱۰ تا ۹۰ گیگاپاسکال نمودار شیب افزایشی دارد؛ بدان معنا که در مقادیر پایین مدول دینامیکی آزمایشگاهی، تأثیر افزایش GSI کمتر و در مقادیر بالاتر تأثیر آن بیشتر است.



شکل (۶): تغییرات مدول دینامیکی توده‌سنگ برحسب شاخص مقاومت زمین‌شناسی در رابطه (۹)

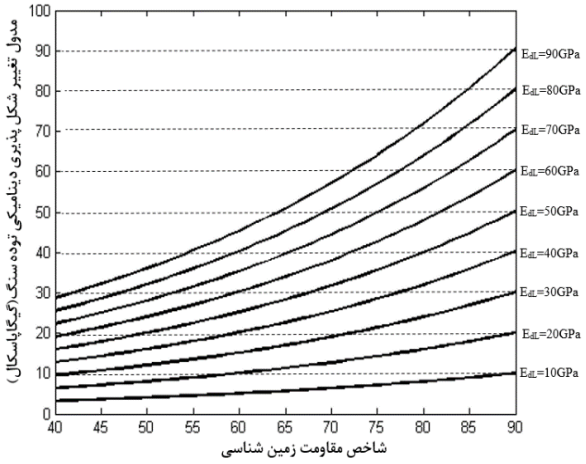
رابطه ارائه‌شده در این مرحله به‌صورت خطی است بنابراین در مرحله بعد روابطی که به‌صورت رگرسیون چندگانه غیرخطی می‌باشند استخراج شد (جدول (۸)).

جدول (۸): روابط غیرخطی چندگانه میان مدول دینامیکی توده‌سنگ، مدول دینامیکی آزمایشگاهی و شاخص مقاومت زمین‌شناسی

شماره	رابطه	ضریب تعیین	RMSE
(۱۱)	$E_{dF}=(0.127\times E_{dL})\, e^{0.023GSI}$	۰/۷۰	۷/۶
(۱۲)	$E_{dF}=94.548\, e^{\frac{-3733.46}{GSI\times E_{dL}}}$	۰/۶۳	۸/۶
(۱۳)	$E_{dF}=(2.512E_{dL})\, e^{\frac{-96.07}{GSI}}$	۰/۶۹	۷/۶

همچنین در شکل (۷) برای رابطه شماره (۱۱) نحوه تغییرات مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ برای تغییر شاخص مقاومت زمین‌شناسی از ۴۰ تا ۹۰ رسم شده است. همان‌طور که مشخص است در مقدار GSI تقریباً برابر ۹۰، میزان مدول دینامیکی آزمایشگاهی و مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ با یکدیگر برابر می‌شوند؛ به‌عبارت‌دیگر در این میزان GSI کیفیت توده‌سنگ تقریباً با سنگ بکر برابر شده و رفتار توده‌سنگ به‌سمت رفتار سنگ بکر میل می‌کند (خطوط خط‌چین).

در مقادیر GSI های پایین (نزدیک به ۴۰)، مقدار مدول دینامیکی برجا به‌صورت یک ضریب (کمتر از یک) از مقدار مدول دینامیکی آزمایشگاهی به دست می‌آید. علاوه بر این همان‌گونه که مشخص است در میزان مدول‌های دینامیکی آزمایشگاهی بالاتر، روند افزایشی نمودارها بیشتر است (شیب نمودار بیشتر) و این بدان معنی است که با افزایش مدول دینامیکی آزمایشگاهی، تأثیر GSI نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین با در دسترس بودن مدول دینامیکی آزمایشگاهی و شاخص مقاومت زمین‌شناسی، می‌توان ارزیابی قابل‌قبولی از مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ با توجه به این نمودار به دست آورد (تا میزان GSI =۹۰).



شکل (۷): تغییرات مدول دینامیکی توده‌سنگ برحسب شاخص مقاومت زمین‌شناسی در رابطه (۱۱)

نتیجه‌گیری و بحث

هدف از این پژوهش، برآورد مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ به‌صورت غیرمستقیم با استفاده از شاخص مقاومت زمین‌شناسی و مدول دینامیکی آزمایشگاهی برای توده‌سنگ‌های آهکی است. برای این منظور از نتایج آزمایش‌های توموگرافی و شکست مرزی به‌عنوان آزمایش‌های برجا، از آزمایش ماورای صوت به‌عنوان آزمایش دینامیکی آزمایشگاهی و از شاخص مقاومت زمین‌شناسی، برای کمی سازی کیفیت توده‌سنگ استفاده شد؛ بنابراین نتایج آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی صورت گرفته در سدهای خرسان ۲، کوهرنگ ۳، بختیاری،

تنگ معشوره و رودبار لرستان جمع‌آوری و موردمطالعه قرار گرفتند. ازجمله عواملی که می‌تواند در این نوع از تحقیق ایجاد خطا کند گسترش روابط به سایر نوع سنگ‌ها می‌باشد. همچنین برای تعیین محدوده شاخص مقاومت زمین‌شناسی و آزمایش‌های آزمایشگاهی تدابیر لازم به‌منظور حذف داده‌های پرت در نظر گرفته شد. درنهایت با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی و غیرخطی چندگانه روابطی برای تخمین مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ ارائه گردید. با توجه به روند موردمطالعه می‌توان موارد زیر را به‌عنوان نتایجی برای این پژوهش ارائه کرد:

نتایج بررسی‌ها نشان داد ازآنجایی‌که توده‌سنگ از دو قسمت سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها تشکیل‌شده است استفاده از شاخص مقاومت زمین‌شناسی به‌تنهایی نتایج قابل‌اطمینان ارائه نخواهد داد. درواقع هم‌زمان باید از نتایج مدول دینامیکی آزمایشگاهی به‌عنوان نماینده سنگ بکر و نتایج طبقه‌بندی مهندسی GSI به‌عنوان نماینده ناپیوستگی‌ها برای تحلیل رگرسیون استفاده گردد. به همین دلیل در مراحل بعد نتایج مدول دینامیکی آزمایشگاهی و طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ با یکدیگر استفاده شد تا بتوان مدول تغییر دینامیکی توده‌سنگ را با تقریب قابل‌قبول‌تر تخمین زد. همان‌گونه که از پژوهش-های پیشین صورت گرفته در این زمینه می‌توان فهمید، پارامترهای ورودی همانند طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ خود دارای عدم قطعیت بوده و بنابراین ضرایب تعیین حاصل از این روش‌ها نزدیک به یک نخواهد شد. در این تحقیق هم شاخص مقاومت زمین‌شناسی که از ترکیب RQD و شرایط سطحی ناپیوستگی‌ها حاصل می‌شود از این مسئله مستثنا نبوده و بر ضرایب تعیین حاصله تأثیرگذار می‌باشند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از تحلیل رگرسیون چند متغیره روابطی برای تخمین مدول تغییر شکل‌پذیری دینامیکی توده‌سنگ ارائه می‌کند که ضرایب تعیین برای این روابط در حدود ۰/۷ برآورد می‌شود که در مقایسه با پژوهش‌های پیشین از دقت قابل‌قبولی برخوردار می‌باشد.

از میان روابط برآورد شده دو رابطه که دارای خطای کمتر و ضریب تعیین بیشتر هستند برای تخمین مدول تغییر شکل دینامیکی پیشنهاد می‌گردند:

$$E_{dF} = (0.127 \times E_{dL})\, e^{0.023GSI}$$

$$E_{dF} = 4.721 + 0.641(E'_{dL}) + 0.003(E'_{dL})^2 .$$

تقدیر و تشکر:

از شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران و شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس به دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های مورداستفاده در این تحقیق تقدیر و تشکر می‌گردد.

مراجع

۱. کلانتری،خ،"پردازش و تحلیل داده‌ها در تحقیقات اجتماعی-اقتصادی".انتشارات مهندسین مشاور طرح و منظر.۱۳۸۹.

2. Agliardi, F. Sapigni, M. & Crosta, G. B. (2016). Rock mass characterization by high-resolution sonic and GSI borehole logging. Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(11), 4303-4318.

3. Barton, N. (2006). Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. CRC press.Book.

4. Bery, A. A. & Saad, R. (2012). Correlation of seismic P-wave velocities with engineering parameters (N value and rock quality) for tropical environmental study. International Journal of Geosciences, 3(04), 749.

5. Cox, M. (1999).Static corrections for seismic reflection surveys. Society of Exploration Geophysicists.Book.

6. Chai, T. & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?–Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific model development, 7(3), 1247-1250.

7. Deere, D. U. Hendron, A. J. Patton, F. D. & Cording, E. J. (1966), Design of surface and near-surface construction in rock. In The 8th US symposium on rock mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, Minneapolis, Minnesota.

8. El-Naqa, A. (1996). Assessment of geomechanical characterization of a rock mass using a seismic geophysical technique. Geotechnical & Geological Engineering, 14(4), 291-305.

9. Fatemi Aghda, S. M. Kianpour, M. & Talkhablou, M. (2019). Efficiency of seismic wave velocity and electrical resistivity in estimation of limestone rock

mass quality indices (Q, Qsrm)(Case study: Asmari formation, SW Iran). Journal of Mining and Environment, 10(2), 529-541.

10. Gong, S. Y. Li, J. Ju, F. Dou, L. M. He, J. & Tian, X. Y. (2019). Passive seismic tomography for rockburst risk identification based on adaptive-grid method. Tunnelling and Underground Space Technology, 86, 198-208.

11.Hardy Jr, H. R. (2005). Acoustic emission/microseismic activity: volume 1: rinciples, techniques and geotechnical applications (Vol. 1). CRC Press.

12. Hoek, E. & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. International journal of rock mechanics and mining sciences, 43(2), 203-215.

13. Hoek, E. Carter, T. G. & Diederichs, M. S. (2013, January). Quantification of the geological strength index chart. In 47th US rock mechanics/geomechanics symposium. American Rock Mechanics Association. 23-26 June, San Francisco, California

14. Hosseini, N. (2017). Evaluation of the rockburst potential in longwall coal mining using passive seismic velocity tomography and image subtraction technique. Journal of Seismology, 21(5), 1101-1110.

15. Iran Water And Power Resources Development company (IWPCO) (2014) Rock mechanic study report of Roodbar Lorestan dam and power plant. Ministry of energy. Tehran.

16. Iran Water And Power Resources Development company (IWPCO) (2009) Rock mechanic study report of Tangeh Mashure dam and power plant. Ministry of energy. Tehran.

17. Iran Water And Power Resources Development company (IWPCO) (2009) Rock mechanic study report of Bakhtiari dam and power plant. Ministry of energy. Tehran.

18. Iran Water And Power Resources Development company (IWPCO) (2016) Rock mechanic study report of Kuhrang 3 dam and power plant. Ministry of energy. Tehran.

19. Iran Water And Power Resources Development company (IWPCO) (2009) Rock mechanic study report of Khersan2 dam and power plant. Ministry of energy. Tehran.

20. Kristakova, Z. & Pandula, B. (1996). The Relation between Laboratory and in situ Determined Dynamic Moduli of Rock. ACTA MONTANA, 100, 201-206.

21. Luxbacher, K. Westman, E. Swanson, P. & Karfakis, M. (2008). Three-dimensional time-lapse velocity tomography of an underground longwall panel. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(4), 478-485.

22. Lin, D. Lou, F. Yuan, R. Shang, Y. Zhao, Y. Jilei, M. A. ... & Bao, W. (2017). Rock mass characterization for shallow granite by integrating rock core indices and seismic velocity. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 93, 130-137.

23. Marinos, V. I. I. I. Marinos, P. & Hoek, E. (2005). The geological strength index: applications and limitations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 64(1), 55-65.

24.McCann, D. M. & Entwisle, D. C. (1992). Determination of Young's modulus of the rock mass from geophysical well logs. Geological Society, London, Special Publications, 65(1), 317-325.

25. Miiller, L (1974). Rock mass Behavior- application in engineering practice".Proc.3 rd. Congr. Rock Mech. International Society for Rock Mechanics, Denver. Vol.1.pp.205-215.

26. Nourani, M. H. Moghadder, M. T. & Safari, M. (2017). Classification and assessment of rock mass parameters in Choghart iron mine using P-wave velocity. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 9(2), 318-328.

27. Osgoui, R. R. & Ünal, E. (2009). An empirical method for design of grouted bolts in rock tunnels based on the Geological Strength Index (GSI). Engineering geology, 107(3-4), 154-166.

28. Öge, İ. F. (2018). Determination of deformation modulus in a weak rock mass by using menard pressuremeter. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, ۱۱۲, ۲۵۲-۲۳۸.

29. Palmström, A. & Singh, R. (2001). The deformation modulus of rock masses—comparisons between in situ tests and indirect estimates. Tunnelling and Underground Space Technology, 16(2), 115-131.

30. Radovanović, S. Ranković, V. Anđelković, V. Divac, D. & Milivojević, N. (2018). Development of new models for the estimation of deformation moduli in rock masses based on in situ measurements. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 77(3), 1191-1202.

31. Scott, D. F. Williams, T. J. & Friedel, M. J. (1997). Investigation of a rockburst site, Sunshine mine, Kellogg, Idaho. In Proceedings of the Proceedings of the 4th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, Krakow, Poland (pp. 311-315).

32. Serafim, J. L. (1983). Consideration of the geomechanical classification of Bieniawski. In Proc. int. symp. on engineering geology and underground construction (Vol. 1, pp. 33-44).

33. Tarantola, A. (2005). Inverse problem theory and methods for model parameter estimation (Vol. 89). siam.

34. Westman, E. C. (2003, October). Use of tomography for inference of stress redistribution in rock. In 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003. (Vol. 3, pp. 1645-1650). IEEE.

35. Willmott, C. J. Matsuura, K. & Robeson, S. M. (2009). Ambiguities inherent in sums-of-squares-based error statistics. Atmospheric Environment, 43(3), 749-752.

36. Zafirovski, Z. Peševski, I. & Papić, J. B. (2012). Methodology for extrapolation of rock mass deformability parameters in tunneling. Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering, 10(3), 235-244.

The Development of a New Empirical Method for Estimating the Dynamic Deformation Modulus of Limeston Rock Masses

Mohsen ahmadloo*[۱]

Mahmoud behnia[۲]

Mohsen sharifi boroujerdi[۳]

Abstract

Deformation Modulus is one of the most important Rock Mass Parameters that is used to Measure the Amount of Deformation under loading. In addition to static loads, dynamic loads such as earthquakes and explosions are very important, therefore it is necessary the dynamic parameters are considered as static parameters. Dynamic deformation modulus of rock masses is determined by tomography and seismic refraction tests, which are time-consuming and expensive and it is not possible to do these tests in all projects. So indirect methods can be used to estimate this parameter. As regards, the measurement of the GSI classification is very easy, comprehensive and common in rock mechanics projects. Furthermore the ultrasonic test used for estimation of dynamic elasticity modulus is a common test in the laboratory . Then, in this study, the relation between the dynamic deformation modulus of rock mass with GSI and dynamic modulus of intact rock was investigated. The data were gathered from five hydroelectric projects in Iran. Multiple regression analysis showed that the dynamic deformation modulus of rock mass can be estimated by the geological strength index (GSI) and laboratory dynamic modulus.

Keyword

Dynamic Deformation Modulus, Geological Strength Index, Tomography, Seismic Velocity Tests, Multivariate Regression.

[۱] Graduated Master Degree of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, mohsen_ahmadloo@yahoo.com

[۲] Assistant Professor, Department of Rock Mechanics, Isfahan University of Technology, Behnia@cc.iut.ac.ir.

[۳] Mahab Ghodss Consulting Engineer, msh_sharifi@yahoo.com.

Received: 22/10/2018 Accepted: 16/06/2019