

گزارش فنی:

تأثیر میزان تنش و ابعاد صفحه بر مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای

محسن رضائی^۱، محمد غفوری^{۲*}، رسول اجل لوثیان^۳

۱- دانشجوی دکترای زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان

(دریافت: مهر ۱۳۹۴، پذیرش: آذر ۱۳۹۵)

چکیده

مدول تغییر شکل توده سنگ که از مهم‌ترین پارامترهای توده سنگ در طراحی‌های مهندسی سنگ است، به دو روش مستقیم (با استفاده از روابط تجربی) و غیر مستقیم (با استفاده از آزمایش‌های برجا) به دست می‌آید. آزمایش بارگذاری صفحه‌ای با توجه به حجم نسبتاً بزرگی از سنگ، که تحت تأثیر قرار می‌دهد و نیز روش انجام ساده‌تر آن، از معمول‌ترین آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری مدول تغییر شکل پذیری بر جای توده سنگ است. این آزمایش‌ها بسته به هدف آزمایش و کاربرد نتایج آن، با تنش‌های متفاوت و اندازه صفحات بارگذاری متفاوت انجام می‌شوند. در این پژوهش، مقایسه‌ای بین نتایج آزمایش‌های انجام شده با دو تنش مختلف و همچنین صفحات با قطر متفاوت صورت گرفته است. در این مقایسه از روش‌های آماری تحلیل همبستگی و آزمون t با زوج داده‌ها استفاده گردید. نتایج تحلیل‌های انجام شده بر روی آزمایش‌های با حداکثر تنش‌های ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال، نشان می‌دهد که بین نتایج آزمایش با بارهای مختلف، اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و میزان بیشینه تنش وارده بر سنگ، بر مدول تغییر شکل پذیری به دست آمده از آزمایش، تأثیری نداشته است ولی نتایج حاصل از آزمایش‌هایی که با دو صفحه با قطرهای متفاوت در یک موقعیت انجام شده‌اند، نشان می‌دهد که، اختلاف معنی‌داری بین آنها وجود دارد و مدول تغییر شکل پذیری به دست آمده از آزمایش با صفحات با قطر بزرگ‌تر، در توده سنگ‌های با کیفیت بالا، بزرگ‌تر از صفحات با قطر کم‌تر بوده و در توده سنگ‌های ضعیف، برعکس است. به نظر می‌رسد، این اختلاف ناشی از تأثیر نسبت ابعاد صفحه بارگذاری به ابعاد گالری آزمایش باشد.

کلمات کلیدی

مدول تغییر شکل پذیری، توده سنگ، آزمایش بارگذاری صفحه‌ای، تنش

۱- مقدمه

تغییر شکل پذیری، طبق تعریف، قابلیت سنگ در تغییر شکل یافتن در مقابل تنش‌های محیطی است. این تنش‌ها می‌توانند بارگذاری و یا باربرداری باشند. تغییر شکل پذیری به وسیله یک مدول که ارتباط بین بار اعمال شده و کرنش منتج از آن است، توصیف می‌شود. با توجه به اینکه سنگ‌های درزه‌دار به صورت الاستیک رفتار نمی‌کنند، به جای مدول الاستیسیته، از مدول تغییر شکل پذیری برای آن استفاده می‌شود. مدول تغییر شکل پذیری توده‌سنگ، یکی از مهم‌ترین پارامترها برای تحلیل‌های عددی و طراحی‌ها در مکانیک سنگ است که شامل مجموع مدول الاستیک و پلاستیک است و نسبت به پارامترهای دیگر، توصیف بهتری را از وضعیت مقاومتی توده‌سنگ، ارائه می‌کند. این پارامتر در طراحی پروژه‌هایی که نسبت به تغییر شکل‌های کم نیز حساس هستند، اهمیت زیادی دارد. پروژه‌هایی همچون نیروگاه‌های هسته‌ای، سدهای قوسی، تونل‌های تحت فشار و برج‌های مسکونی از جمله پروژه‌هایی هستند که باید در طول عمر مفیدشان حداقل تغییر شکل در آنها اتفاق بیفتد. در این نوع سازه‌ها، حتی زمانی که خطر گسیختگی وجود ندارد نیز، تغییر شکل سنگ بسیار نگران کننده است، چرا که تغییر شکل ناهمگن حتی به مقدار جزئی می‌تواند باعث افزایش شدید تنش در سازه شود [۱].

مدول تغییر شکل پذیری توده‌سنگ به دو روش مستقیم و غیر مستقیم به دست می‌آید. در روش غیر مستقیم، با استفاده از روابط تجربی ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف و با استفاده از پارامترهای توده‌سنگ و مشخصات سنگ بکر، تخمین زده می‌شود. در دهه‌های گذشته تعداد زیادی از رابطه‌های تجربی برای برآورد مدول تغییر شکل پذیری توده‌سنگ، با استفاده از طبقه‌بندی‌های مختلف توده‌سنگ، مانند طبقه‌بندی ژئومکانیکی [۲]، شاخص مقاومت زمین‌شناسی [۳]، شاخص تونل‌زنی [۴] و شاخص توده‌سنگ [۵، ۱] پیشنهاد شدند. پژوهشگران دیگر رابطه‌هایی را بر پایه پارامترهای تعیین کننده کیفیت توده‌سنگ مانند شاخص کیفی توده‌سنگ [۶-۸] و درجه هوازدگی [۷، ۹] پیشنهاد نمودند که مهم‌ترین این رابطه‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

این رابطه‌ها، تخمین‌های مختلفی از مدول تغییر شکل پذیری توده‌سنگ را ارائه می‌دهند. بعنوان مثال، رابطه گوکچه اوغلو و همکاران [۷] بر پایه شاخص کیفی توده‌سنگ و درجه هوازدگی، در برخی موارد، مدول بسیار بالایی را به دست می‌دهد. از طرف دیگر مدول‌های پایین، با استفاده از رابطه نجاتی [۱۱] به دست می‌آید.

در روش مستقیم با انجام آزمایش‌های برجا مانند بارگذاری صفحه‌ای، دیلاتومتری، جک تخت، اتاقک فشار و غیره که طی آنها سنگ تحت چند مرحله بارگذاری و باربرداری قرار می‌گیرد، اندازه‌گیری می‌شود.

به طور کلی، آزمایش‌های برجای اندازه‌گیری مدول تغییر شکل پذیری توده‌سنگ، با توجه به حجمی از توده‌سنگ که در حین آزمایش‌های برجا مورد تنش قرار می‌دهند، به دو دسته بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس تقسیم می‌شوند. آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای و بارگذاری شعاعی در دسته آزمایش‌های بزرگ مقیاس و آزمایش‌های دیلاتومتری، جک گمانه‌ای و جک تخت در دسته آزمایش‌های کوچک مقیاس هستند. نتایج حاصل از آزمایش‌های بزرگ مقیاس نسبت به آزمایش‌های کوچک مقیاس، معرف بهتری برای رفتار توده‌سنگ هستند [۱۷، ۱۸].

از معمول‌ترین آزمایش‌های برجایی که در پروژه‌های مختلف، برای اندازه‌گیری مدول تغییر شکل پذیری توده‌سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد، آزمایش بارگذاری صفحه‌ای است که توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ ارائه شده است [۱۹]. آزمایش بارگذاری صفحه‌ای به دو روش بارگذاری با صفحات صلب [۲۰] و انعطاف‌پذیر [۲۱، ۲۲] انجام می‌شود. در این آزمایش‌ها، بار اعمالی توسط یک پمپ هیدرولیک تأمین شده و به جک‌ها منتقل می‌شود. در آزمایش بارگذاری با صفحه انعطاف‌پذیر، بار توسط یک جفت جک تخت که ستون صلبی بین آنها قرار گرفته به سطح بارگذاری وارد شده و باعث تغییر شکل توده‌سنگ می‌شود. اما در روش صفحه صلب، بار به وسیله یک جک هیدرولیکی به صفحات باربری صلب که بر روی سطح توده‌سنگ قرار گرفته‌اند، وارد می‌شود (شکل ۱). در این آزمایش دو منطقه در داخل گالری که در امتداد قطر آن و در دو جهت مخالف قرار دارند، به طور همزمان و در چندین چرخه، بارگذاری و باربرداری می‌شوند (شکل ۲).

جدول ۱: مهم‌ترین رابطه‌های تجربی ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف برای برآورد مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ

محدودیت‌ها	رابطه تجربی	پژوهشگر
	$E_m / E_r = 10^{0.0186 \times RQD - 1.91}$	Zhang[8]
	$E_m = \sqrt{0.01 \sigma_c} \times 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)}$	Hoek et al.[10]
	$E_m = E_i 10^{[(RMR-100)(100-RMR)/4000 \exp(-RMR/100)]}$	Sonmez et al. [2]
	$E_m = -7.192 + 0.06469 UCS + 0.20481 RQD + 0.3097 J_s + 0.38384 J_c + 0.01716 GW$	Nejati et al. [11]
	$E_m = 10 Q_c^{1/3}$, $Q_c = Q 0.01 \sigma_{ci}$	Barton [4]
$RMi < 0.1$	$E_m = 5.6 RMi^{0.375}$	Palmstrom[12]
$UCS < 100$ MPa	$E_m = (1 - 0.5D) \sqrt{\sigma_{ci}/100} \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$	Hoek et al.[10]
$UCS > 100$ MPa	$E_m = (1 - 0.5D) \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$	
	$E_m = 0.135 \left[\frac{E_i(1 + 0.01 RQD)}{WD} \right]^{1.1811}$	Kayabasi et al.[9]
	$E_m = 0.001 \left[\frac{(E_i / UCS)(1 + 0.01 RQD)}{WD} \right]^{1.5528}$	Gokceoglu et al.[7]
	$E_m = E_i \left(0.02 + \frac{1 - 0.5D}{1 + e^{\left(\frac{60+15D-GSI}{11}\right)}} \right)$	Hoek and Diederichs[3]
	$E_m = E_i (s^a)^{0.4}$ $s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right)$ $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \exp\left(-\frac{GSI}{15}\right) - \exp\left(-\frac{20}{3}\right)$	Sonmez et al.[13]
	$E_m = E_i s^{0.24}$ $s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right)$	Carvalho [14]
	$E_m = 110 e^{-\left(\frac{RMR-110}{37}\right)^2}$	Shen et al. [15]
	$E_m = 1.14 E_i e^{-\left(\frac{RMR-116}{41}\right)^2}$	
$RMR \leq 56$	$E_m = 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)}$	Lowson & Bieniawski [16]
$RMR > 56$	$E_m = 14 + (E_i - 14) \left[1 - \left(\frac{100 - RMR}{44} \right)^{\frac{RMR}{70}} \right]$	

در اعماق مختلف اندازه‌گیری شوند، به این آزمایش، جک صفحه‌ای گفته می‌شود [۱]. تجهیزات اندازه‌گیری جابجایی در آزمایش جک صفحه‌ای، شامل پکرهای فولادی مکانیکی و جابجایی‌سنج‌های با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر هستند که پس از انجام کالیبراسیون در آغاز هر آزمایش، در داخل گمانه، در عمق‌های مختلف قرار داده می‌شوند و از طریق یک رابط به کامپیوتر متصل می‌گردند تا قرائت‌ها در فواصل زمانی تعیین شده، ثبت گردند.

در هر مرحله از بارگذاری، بار با نرخ آرام و یکنواخت به صورت پله‌هایی افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به میزان مورد نظر، به مدت زمان تعیین شده، ثابت نگه داشته شده و سپس، به آرامی و به صورت پله ای کاهش می‌یابد. تغییر مکان در جهت بارگذاری، توسط جابجایی‌سنج‌ها اندازه‌گیری می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در صورتی که اندازه‌گیری جابجایی در پشت صفحه بارگذاری انجام شود، بارگذاری صفحه‌ای نامیده شده و اگر جابجایی‌ها در داخل گمانه‌ای که پشت نواحی بارگذاری حفاری شده‌اند،

آن سنگ تحت چند مرحله بارگذاری و باربرداری قرار می‌گیرد، به دست می‌آید. برای تعیین مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ می‌توان از روش‌های وتری، مماسی و بازیافتی استفاده کرد (شکل ۴) که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

مدول تغییرشکل‌پذیری وتری: شیب خطی که مبدأ مختصات را به هر نقطه از منحنی تنش- کرنش متصل می‌کند. این مدول به شدت تحت تأثیر بسته شدن ناپیوستگی‌ها قرار دارد.

مدول تغییرشکل‌پذیری مماسی: شیب خط مماس بر منحنی تنش- کرنش در عنصر کوچکی از منحنی بارگذاری که بهترین معرف برای رفتار الاستیک باشد. مدول مماسی را می‌توان از هم از منحنی بارگذاری و هم از منحنی باربرداری به دست آورد که معمولاً در حالت باربرداری بیشتر از بارگذاری است.

مدول تغییرشکل‌پذیری بازیافتی: مدول مماسی مربوط به منحنی تنش- کرنش مرحله باربرداری را گویند. این مدول معمولاً بیشتر از سایر مدول‌ها بوده و در محاسبات مربوط به مرحله باربرداری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدول تغییرشکل‌پذیری اوج تا اوج: مدول خطی که نقاط اوج منحنی‌های تنش کرنش در مراحل بارگذاری و باربرداری را به هم وصل می‌کند (شکل ۲).

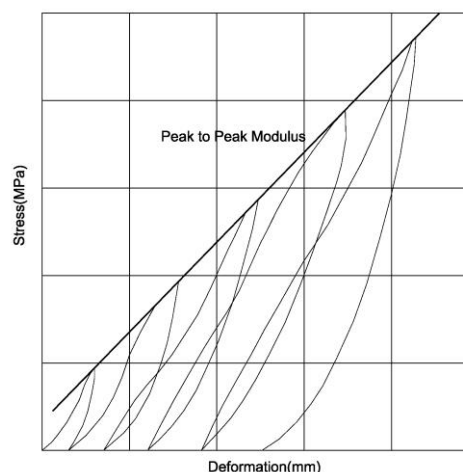
مدول تغییرشکل‌پذیری اندازه‌گیری شده سنگ، به عوامل متعددی از جمله وضعیت فضایی ناپیوستگی‌ها، شرایط سطح ناپیوستگی‌ها، مقدار تنش وارد شده به سنگ، مدول الاستیسیته سنگ بکر، ضریب پواسون، قطر صفحات بارگذاری و عمق اندازه‌گیری جابجایی بستگی دارد. در اکثر توده‌سنگ‌ها به دلیل توزیع غیر یکنواخت ناپیوستگی‌ها، مدول تغییرشکل‌پذیری در جهت‌های مختلف متفاوت است [۲۰].

آزمایش بارگذاری و یا جک صفحه‌ای با تمام مزایایی که دارد، با سه مشکل و مانع اساسی زیر روبرو است [۱]:

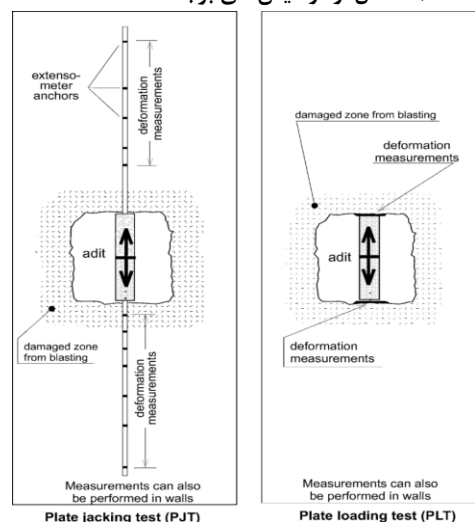
- ۱- با توجه به اینکه تنش اعمال شده در سنگ و جابجایی منتج از این تنش، با افزایش عمق کاهش می‌یابد، ممکن است مدول‌های به دست آمده در عمق، غیر واقعی باشند.



شکل ۱: نمایی از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای به صورت قائم



شکل ۲: چرخه‌های بارگذاری و باربرداری و مدول تغییر شکل اوج تا اوج (DPP) حاصل از آزمایش‌های برجا [۲۰]



شکل ۳: تصویری شماتیک از آزمایش‌های بارگذاری و جک صفحه‌ای [۱]

مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ، که مجموع مدول الاستیک و پلاستیک است، با انجام آزمایش‌های برجا که طی

بتن بین صفحه بارگذاری و سنگ، ساخته می‌شود و پس از اینکه بالشتک بتنی به بیشینه مقاومت خود رسید، آزمایش بارگذاری انجام می‌شود.

برای اندازه‌گیری جابجایی‌های منتج از بارگذاری و باربرداری، یا در سطح بارگذاری سنسورهایی قرار داده شده و اندازه‌گیری جابجایی انجام می‌شود و یا در مرکز محدوده بارگذاری گمانه‌ای حفاری شده و در داخل آن تعداد ۶ سنسور در فواصل معین قرار داده می‌شود که سنسور ششم در انتهای گمانه، در جایی که جابجایی صفر است، قرار داده می‌شود و جابجایی اتفاق افتاده در توده سنگ نسبت به این سنسور سنجیده می‌شود. در این پژوهش از این روش استفاده شده است.

برای محاسبه مدول تغییرشکل‌پذیری توده سنگ با استفاده از این آزمایش روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که روش اونا[۲۳]، روش انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ[۱۹] و روش انجمن آزمون و مواد آمریکا[۲۰، ۲۲] از جمله مهم‌ترین آنها است. روش انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای آزمایش بارگذاری با صفحه انعطاف‌پذیر و روش‌های اونا و انجمن آزمایش و مواد آمریکا برای صفحه صلب ارائه شده‌اند. آخرین نسخه مورد اخیر، که به صورت استاندارد برای این آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد و در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفته است، در سال ۲۰۰۸ به صورت رابطه (۱) ارائه شده است[۲۰] که برای محاسبه مدول تغییر شکل توده سنگ، هنگامی که جابجایی‌ها درون گمانه پشت صفحه بارگذاری، اندازه‌گیری می‌شود (آزمایش جک صفحه‌ای)، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$E_m = \frac{(1+\nu)P}{2\pi W_z R} \left[(2-2\nu) \arcsin\left(\frac{R}{(R^2+Z^2)^{0.5}}\right) + \frac{RZ}{R^2+Z^2} \right] \quad (1)$$

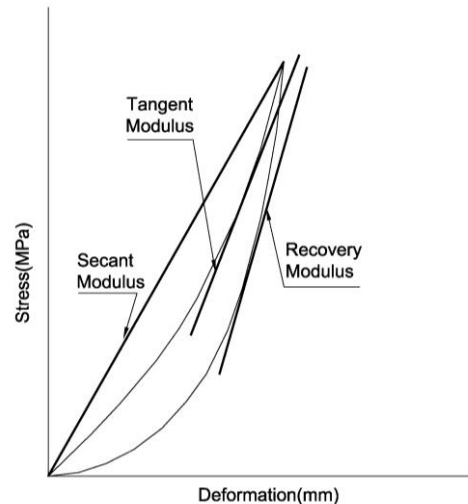
که در آن:

E_m : مدول تغییرشکل‌پذیری توده سنگ (GPa)، P : فشار وارده بر سطح بارگذاری (KN)، R : شعاع صفحه بارگذاری (mm)، Z : عمق نقطه اندازه‌گیری جابجایی در داخل توده سنگ (mm)، W_z : تغییر مکان اندازه‌گیری شده در هر عمق (mm) و ν : ضریب پواسون توده سنگ هستند.

پایه و اساس رابطه مورد استفاده در محاسبات بارگذاری صفحه‌ای، بر حل الاستیک بارگذاری یکنواخت روی سطح دایروی یک محیط الاستیک همسانگرد نیمه بیکران استوار است[۲۰]. در این تئوری ماده مورد نظر به صورت ماده الاستیک، همسان و همگن و نیمه متناهی فرض می‌شود و

۲- قرار دادن ابزارهای اندازه‌گیری تغییرشکل در داخل توده سنگ، آشفتگی‌هایی را در داخل آن به وجود می‌آورد.

۳- در سنگ‌هایی که مدول تغییرشکل‌پذیری بالایی دارند، ممکن است دقت ابزارهای اندازه‌گیری، برای حصول نتایج مناسب، کافی نباشد.



شکل ۴: تعاریف انواع مدول تغییر شکل توده سنگ[۲۰]

با وجود تمامی این محدودیت‌ها، روش بارگذاری صفحه‌ای یکی از رایج‌ترین روش‌های تعیین مدول تغییرشکل‌پذیری توده سنگ برجا است. این آزمایش به دو روش با استفاده از صفحه‌های بارگذاری صلب و انعطاف‌پذیر انجام می‌شود. در روش بارگذاری با صفحات انعطاف‌پذیر، بار توسط دو عدد جک تخت که ستون صلبی بین آنها قرار گرفته است، به وسیله صفحه‌هایی انعطاف‌پذیر به توده سنگ وارد می‌شود اما در روش بارگذاری با صفحه‌های صلب، بار وارده توسط یک جک هیدرولیک، به وسیله صفحه‌هایی صلب به توده سنگ وارد می‌گردد. آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در سنگ، معمولاً در داخل گالری انجام می‌شود. برای این منظور، یک گالری به ابعاد مناسب در داخل توده سنگ حفاری شده و در دو دیواره روبروی این گالری محدوده‌هایی به قطر یک و نیم تا دو برابر قطر صفحات بارگذاری آماده‌سازی می‌گردد[۱۹]. برای آماده‌سازی محدوده بارگذاری، قسمت‌های سست و شکسته سطح سنگ، برداشته شده و سطح سنگ به گونه‌ای پرداخت می‌شود که اختلاف بین پستی و بلندی‌های آن از ۲۵ میلی‌متر بیش‌تر نباشد. سپس بر روی سطح کاملاً تمیز شده، بالشتک بتنی در حالتی که صفحه بارگذاری در جای خود قرار گرفته است، با ریختن

صفحه‌ای یک بار با صفحه ۹۱۵ میلی‌متری و تنش بیشینه ۲۰ مگاپاسکال در ۵ چرخه و یک بار با صفحه ۶۵۰ میلی‌متری در ۳ چرخه و تنش بیشینه ۴۰ مگاپاسکال انجام شده است.

در این نوشتار، با استفاده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای انجام شده در ساختگاه سد بختیاری، به موضوع تأثیر میزان تنش اعمال شده و ابعاد صفحه بارگذاری، بر مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ اندازه‌گیری شده، پرداخته شده است.

ساختگاه سد بختیاری، در استان لرستان و ۶۵ کیلومتری جنوب غربی شهر دورود به مختصات ۴۸ درجه و ۴۵/۵ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۵۷/۵ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. موقعیت ساختگاه سد بختیاری در شکل ۵ نشان داده شده است.

آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای در ساختگاه سد بختیاری، با استفاده از دو صفحه بارگذاری با قطرهای متفاوت و نیز میزان تنش متفاوت انجام شده‌اند. قطر صفحه‌های بارگذاری مورد استفاده در این ساختگاه ۹۱۵ و ۶۵۰ میلی‌متر و تنش بیشینه اعمال شده به ترتیب برابر ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال بوده است. در برخی نقاط بارگذاری، آزمایش‌ها با استفاده از هر دو نوع صفحه در یک فاصله زمانی ۳ ساله انجام شده و نتایج متفاوتی را داشته است. در این مقاله نتیجه‌های به دست آمده بررسی شده است.

۲- بررسی‌های ژئوتکنیکی

ساختگاه سد بختیاری در پهنه زاگرس چین خورده و در دره ۷ شکلی، عمود بر محور طاق‌دیس سیاه کوه قرار دارد و توده‌سنگ‌های رخنمون یافته در محدوده ساختگاه سد، بخش‌هایی از تشکیلات سروک است. سازند سروک در این منطقه به ۷ بخش (Sv1 تا Sv7) تقسیم شده است و در محل ساختگاه سد بخش‌های ۲ تا ۶ رخنمون دارند. در داخل واحد ۳، بخش به هم ریخته‌ای وجود دارد که بر اثر چین خوردگی شدید ایجاد شده است. این واحد با توجه به پارامترهای مقاومتی ضعیف‌تر آن، به صورت جداگانه تحت عنوان Sv3-KB نام‌گذاری شده است. نقشه زمین‌شناسی ساختگاه سد بختیاری در شکل ۶ ارائه شده است.

در راستای بررسی‌های ژئوتکنیکی ساختگاه سد، با درزبرداری در بخش‌های مختلف ساختگاه و نیز انجام

معادله‌های مربوطه برای تحلیل نتایج بر پایه حل الاستیک برای توزیع بار یکنواخت بر روی سطح دایره‌ای شکل در یک محیط الاستیک همسانگرد و نیمه متناهی ارائه شده‌اند. اما شرایط توده‌سنگ تحت آزمایش به طور کامل منطبق با فرضیه‌های در نظر گرفته شده در این تئوری نیست و رابطه‌های موجود تنها به دلیل سادگی برای نمایش تقریبی شرایط محلی به کار گرفته می‌شوند. برخی عوامل ساختاری مانند درزه‌ها یا وجود لایه‌بندی می‌توانند بر نتایج آزمایش تأثیر داشته باشند. وجود ناپیوستگی‌ها در سنگ باعث ایجاد تفاوت در الگوی توزیع بار و جابجایی‌ها می‌شود که میزان این تأثیر، به تعداد، جهت و ویژگی‌های مقاومتی و مکانیکی آنها بستگی دارد.

عرض گالری یا ارتفاع آن در آزمون‌های افقی باید در کم‌ترین حالت ۱/۵ تا ۲ برابر قطر صفحه بارگذاری باشد، تا محیط نیمه بیکران محسوب شده و از اثرات محدود کننده ابعاد گالری جلوگیری شود. بر اساس مدلسازی المان محدود، در نسبت ابعاد گالری به ابعاد صفحه بارگذاری برابر ۶ تا ۱۰، مقادیر جابجایی در اعماق مختلف تحت تأثیر ابعاد گالری قرار نمی‌گیرد ولی برای نسبت ۲ و کم‌تر از آن، جابجایی‌ها در عمق، از جدار گالری تأثیر زیادی می‌گیرند [۲۱].

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای بسته به هدف و موقعیت انجام آن، با بارهای متفاوت و نیز ابعاد صفحه بارگذاری متفاوت انجام می‌شوند که ممکن است در مدول تغییرشکل‌پذیری به دست آمده، تأثیرگذار باشند. با توجه به اینکه کم‌تر پیش می‌آید در یک نقطه، یک نوع آزمایش برجا، با توجه به هزینه بالا و زمان‌بر بودن آن، با تنش‌ها و اندازه صفحات متفاوت تکرار شود، مقایسه تأثیر این پارامترها در مدول تغییرشکل توده‌سنگ به راحتی امکان‌پذیر نیست.

در ساختگاه سد بختیاری، بنا به شرایطی، در برخی نقاط، آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای در دو مرحله و با تنش و قطر صفحه بارگذاری متفاوت انجام شده است. تعدادی از این آزمایش‌ها با صفحه‌ای به قطر ۹۱۵ میلی‌متر، در ۵ چرخه و با بیشینه تنش وارد شده برابر ۲۰ مگاپاسکال و تعدادی نیز با صفحه‌ای با قطر ۶۵۰ میلی‌متر، در ۷ چرخه و با بیشینه تنش برابر ۴۰ مگاپاسکال؛ انجام شده‌اند که تا چرخه پنجم، آزمایش دقیقاً مانند آزمایش قبلی بوده و از آن به بعد تنش در دو مرحله تا ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال افزایش یافته است. همچنین، در برخی از موقعیت‌ها، آزمایش بارگذاری

آزمایش‌های آزمایشگاهی مختلف بر روی سنگ بکر (جدول ۲)، طبقه‌بندی توده‌سنگ انجام پذیرفت [۶، ۸، ۲۴-۲۶] که خلاصه نتایج آن در واحدهای سنگی مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۵: موقعیت جغرافیایی ساختگاه سد بختيار

جدول ۲: خلاصه نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های سنگ بکر

واحد سنگی	پارامتر	شرایط خشک				شرایط اشباع			
		تعداد	کمینه	بیشینه	میانگین	تعداد	کمینه	بیشینه	میانگین
Sv2	UCS(MPa)	۱۰	۸۲	۱۶۴	۱۲۸	۱۰	۷۲	۱۴۱	۱۰۶
	E (GPa)	۱۲	۵۹	۷۸	۷۱	۱۵	۳۶	۸۲	۶۴
Sv3	UCS(MPa)	۲۰	۷۰	۲۴۸	۱۳۲	۲۱	۸۰	۱۷۶	۱۲۱
	E (GPa)	۱۸	۴۳	۸۰	۶۶	۲۴	۴۳	۸۵	۶۸
Sv3-KB	UCS(MPa)	۱			۸۵	۱			۶۵
	E (GPa)	۱			۴۰				
Sv4	UCS(MPa)	۴	۷۰	۱۱۸	۸۶	۵	۷۰	۱۰۹	۸۱
	E (GPa)	۶	۶۱	۷۶	۶۶	۶	۵۳	۷۹	۶۸
Sv5	UCS(MPa)	۸	۷۴	۱۹۵	۱۲۵	۶	۷۰	۱۳۱	۹۹
	E (GPa)	۹	۴۲	۸۳	۶۶	۹	۳۸	۷۵	۶۳
Sv6	UCS(MPa)	۱۲	۷۵	۱۸۸	۱۲۵	۹	۹۱	۱۶۷	۱۲۴
	E (GPa)	۱۴	۵۰	۸۲	۶۴	۱۴	۴۸	۸۰	۶۸

جدول ۳: طبقه‌بندی توده‌سنگ در واحدهای سنگی مختلف

واحد سنگی	RQD	GSI	RMi	RMR	Q
Sv2	۷۳	۶۱	۳/۷	۵۲	۷/۹
Sv3	۶۲	۵۵	۳/۳	۴۷	۵/۴
Sv3-KB	۵۲	۵۰	۱/۶	۴۳	۵/۶
Sv4	۶۴	۵۴	۱/۱	۳۹	۳/۹
Sv5	۹۷	۷۳	۱۱/۹	۵۹	۸/۴
Sv6	۸۷	۷۱	۸/۶	۶۵	۹/۵
کل داده‌ها	۶۶	۵۷	۳/۸	۴۸	۵/۹

برای تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده‌سنگ، آزمایش‌های برجای مختلف از جمله آزمایش‌های جک صفحه‌ای در داخل گالری‌های حفاری شده، در واحدهای سنگی مختلف ساختگاه سد انجام گرفته‌اند. خلاصه نتایج حاصل از آزمایش‌های جک صفحه‌ای در جدول ۴ ارائه شده است.

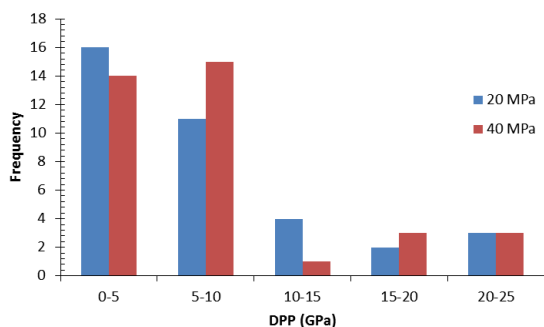
جدول ۴: خلاصه نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای در ساختگاه سد

واحد سنگی	Sv2	Sv3	Sv3-Kb	Sv4	Sv5	Sv6	کل داده‌ها
تعداد آزمایش	۶	۵۵	۶	۱۰	۴	۸	۸۹
مانگین مدول تغییر شکل اوج تا اوج	۱۲/۳	۸/۷	۴/۲	۴/۶	۲۲/۴	۲۳/۷	۱۰/۱

مورد محاسبه قرار گرفت که هیستوگرام نتایج به دست آمده در شکل ۷ و نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها به همراه مقدار GSI توده‌سنگ محل بارگذاری در شکل ۸ ارائه شده است. سپس با استفاده از تحلیل همبستگی و آزمون t ، میزان اختلاف دو گروه داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۶: خلاصه بررسی آماری آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای با قطرهای ۶۵۰ و ۹۱۵ میلی‌متر

نسبت مدول ۶۵۰ به ۹۱۵	قطر ۶۵۰ میلی‌متر	قطر ۹۱۵ میلی‌متر	نسبت مدول
تعداد	۱۰	۱۰	۱۰
میانگین (GPa)	۸/۶	۱۰/۷	۰/۸
انحراف معیار	۳/۲	۴/۳	۰/۷
واریانس	۱۰	۱۸	۰/۶
کشیدگی	-۰/۵	-۰/۳	-۰/۳
چولگی	۰/۵	-۰/۱	-۰/۱
کمینه	۴/۱	۳/۹	۱/۱
بیشینه	۱۴/۵	۱۶/۹	۰/۹



شکل ۷: هیستوگرام مدول تغییرشکل‌پذیری اوج تا اوج با تنش‌های بیشینه ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال

۴-۱- تحلیل همبستگی

نتایج به دست آمده از محاسبه مدول تغییر شکل اوج تا اوج با هر دو مقدار تنش اعمالی مورد مقایسه آماری قرار گرفتند و تحلیل همبستگی مطابق رابطه ۲، بر روی آنها انجام گردید [۲۷] که نتیجه آن در شکل ۹ ارائه شده است.

۳- تحلیل آماری مدول تغییرشکل‌پذیری اوج تا اوج توده‌سنگ

از میان تمام آزمایش‌هایی که برای اندازه‌گیری مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ انجام شده بودند که خلاصه آنها در جدول ۴ ارائه گردید، در ۳۶ آزمایش مدول تغییرشکل‌پذیری برای بیشینه تنش‌های ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری شدند. همچنین در ۱۰ مورد آزمایش، مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ در طی دو مرحله و با صفحه‌های ۶۵۰ و ۹۱۵ میلی‌متری اندازه‌گیری شد. در جدول‌های ۵ و ۶ نتایج بررسی‌های آماری آنها ارائه شده است.

جدول ۵: خلاصه بررسی آماری آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای با تنش‌های بیشینه ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال

تنش ۲۰ مگاپاسکال	تنش ۴۰ مگاپاسکال	نسبت مدول ۴۰ به ۲۰
تعداد	۳۶	۳۶
میانگین (GPa)	۷/۶	۷/۸
انحراف معیار	۵/۹	۶/۴
واریانس	۳۵	۴۱
کشیدگی	۱/۰	۱/۲
چولگی	۱/۳	۱/۴
کمینه	۰/۹	۱/۵
بیشینه	۲۳/۸	۲۵/۴

۴- بررسی تأثیر بیشینه تنش اعمال شده بر مدول تغییر شکل توده‌سنگ

برای بررسی تأثیر بیشینه تنش اعمال شده در طی آزمایش، بر مدول تغییرشکل‌پذیری برجای توده‌سنگ، بدین صورت عمل گردید که در آزمایش‌هایی که با تنش بیشینه ۴۰ مگاپاسکال انجام شده بودند، مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ، یک بار تا تنش بیشینه ۲۰ مگاپاسکال محاسبه گردید و بار دیگر این مدول با تنش بیشینه ۴۰ مگاپاسکال

$$t = \frac{\bar{d}}{\sqrt{s^2/n}} \quad (3)$$

در این رابطه، \bar{d} ، میانگین اختلاف بین دو نمونه، s^2 ، واریانس نمونه، n ، تعداد داده‌ها و t ، آزمون t با $n-1$ درجه آزادی هستند.

جدول ۷: نتایج آزمون t مدول تغییر شکل‌پذیری به دست آمده از آزمایش‌های با دو تنش بیشینه ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال

پارامتر	مقدار
t Stat	-۱/۰۲
P(T<=t) two-tail	۰/۳۱

همان‌گونه که در شکل‌های ۷ و ۹ مشاهده می‌شود، همبستگی خوبی با ضریب همبستگی پیرسون برابر ۰/۹۷۳ بین نتایج حاصله مشاهده می‌شود و خط برازش شده به آنها نیز با خط ۱ به ۱ تطابق خوبی دارد و جدول ۷ نشان می‌دهد، با توجه به اینکه مقدار p حاصل از آزمون t بیش‌تر از ۰/۰۵ است، میانگین مدول تغییر شکل‌پذیری اوج تا اوج به دست آمده با هر دو مقدار تنش، تقریباً برابر هستند ($p\text{-value} = 0.31$) و می‌توان گفت که میانگین نتایج به دست آمده با استفاده از تنش‌های بیشینه ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال که به ترتیب برابر ۷/۶۰ و ۷/۸۶ گیگاپاسکال هستند، تفاوت معناداری با هم ندارند. از مقایسه مدول‌های تغییر شکل‌پذیری به دست آمده با مقدار شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده‌سنگ نیز مشخص می‌شود که نتیجه‌های به دست آمده از هر کدام از دو آزمایش، فارغ از کیفیت توده‌سنگ، می‌توانند اندکی بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از دیگری باشد.

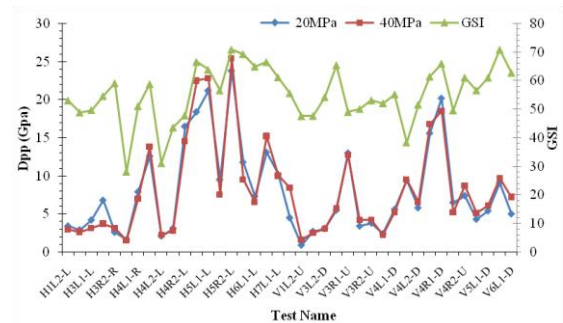
۵- بررسی تأثیر اندازه صفحه بارگذاری بر مدول

تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ

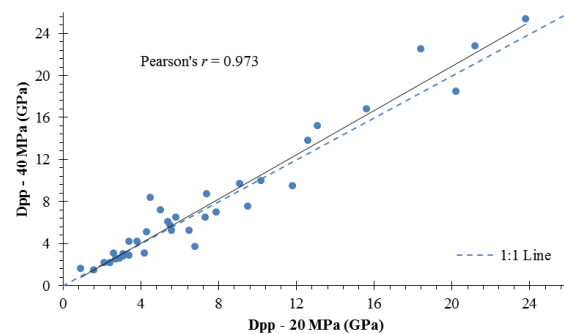
پس از مشخص شدن تأثیر ناچیز بیشینه تنش اعمال شده، بر مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ، تأثیر اندازه صفحه بارگذاری بر مدول تغییر شکل‌پذیری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، موقعیت‌هایی که آزمایش در آنها یک بار با صفحه با قطر ۹۱۵ میلی‌متر و یک بار با صفحه ۶۵۰ میلی‌متر انجام شده بود، انتخاب و مورد مقایسه قرار گرفتند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). برای این مقایسه نیز تحلیل

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

در این رابطه، r ، ضریب همبستگی پیرسون، n ، تعداد داده‌ها، X_i و Y_i ، داده‌های i ام متغیرها و \bar{X} و \bar{Y} میانگین متغیرها هستند.



شکل ۸: مقایسه مدول تغییر شکل‌پذیری به دست آمده با تنش بیشینه ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال در هر آزمایش



شکل ۹: همبستگی مدول تغییر شکل‌پذیری به دست آمده با تنش بیشینه ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال

ضریب همبستگی پیرسون، میزان همبستگی بین دو متغیر را محاسبه می‌کند و مقدار آن بین ۱+ و ۱- است. اگر مقدار به دست آمده مثبت باشد، با افزایش در هر متغیر، متغیر دیگر نیز افزایش می‌یابد و برعکس، اگر مقدار r منفی شد یعنی اینکه دو متغیر در جهت عکس هم عمل می‌کنند. اگر مقدار به دست آمده صفر شد نشان می‌دهد که هیچ رابطه‌ای بین دو متغیر وجود ندارد و اگر ۱+ شد همبستگی مثبت کامل و اگر ۱- شد همبستگی کامل و منفی است.

۴-۲- آزمون t

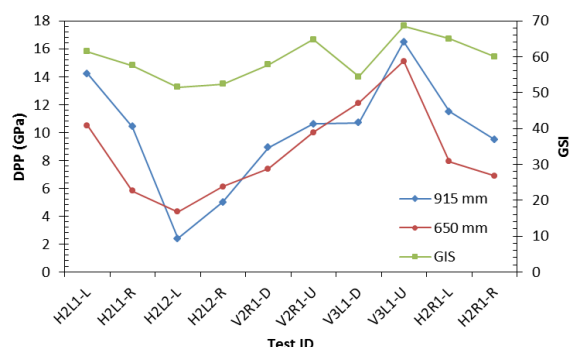
برای مقایسه میزان اختلاف اندازه‌گیری مدول تغییر شکل‌پذیری اوج تا اوج با دو مقدار تنش متفاوت، آزمون t با داده‌های زوج (رابطه ۳) بر روی نتایج مدول اوج تا اوج به دست آمده، انجام شد [۲۸] که نتایج آزمون t در جدول ۷ ارائه شده است.

بارگذاری با قطرهای ۶۵۰ و ۹۱۵ میلی‌متر، با ضریب همبستگی پیرسون برابر ۰/۸۳، همبستگی نسبتاً خوبی با هم دارند اما خط برازش شده به آنها، با خط ۱ به ۱ منطبق نیست. همچنین، آزمون t (جدول ۸) نشان می‌دهد که نتایج دو روش اندازه‌گیری با هم برابر نبوده و با توجه به مقدار p که کمتر از ۰/۰۵ است، تفاوت بین آنها معنی‌دار است ($p\text{-value} = 0.02$). این نتایج نشان می‌دهند که میانگین مدول‌های به دست آمده از آزمایش با صفحه بارگذاری با قطر ۹۱۵ میلی‌متر، بزرگ‌تر از صفحه بارگذاری با قطر ۶۵۰ میلی‌متر است. این موضوع، به دلیل تأثیر نسبت ابعاد گالری به ابعاد صفحه بارگذاری بر روی میزان جابجایی توده‌سنگ در عمق است. با استفاده از صفحه ۹۱۵ میلی‌متری نسبت ابعاد گالری به ابعاد صفحه بارگذاری در مقایسه با صفحه ۶۵۰ میلی‌متری، کوچک‌تر شده و در نتیجه جابجایی توده‌سنگ در عمق، تحت تأثیر تنش، کم‌تر می‌شود و مدول تغییرشکل‌پذیری محاسبه شده بیش‌تر خواهد شد. مقایسه یک به یک داده‌های به دست آمده که در شکل ۸ ارائه شده‌اند، نشان می‌دهد که از تعداد ۱۰ زوج آزمایش انجام شده، در ۷ مورد، مدول به دست آمده از صفحه ۹۱۵ میلی‌متری، بزرگ‌تر است و در ۳ مورد نتیجه برعکس است. مقایسه نتایج آزمایش‌ها و نیز اختلاف بین دو روش با طبقه‌بندی شاخص مقاومت زمین‌شناسی (شکل‌های ۸ و ۹)، نشان می‌دهد، آزمایش‌هایی که در آنها مدول به دست آمده از آزمایش با صفحه ۶۵۰ میلی‌متری بزرگ‌تر از مدول صفحه ۹۱۵ میلی‌متری هستند، دارای مقدار GSI کم‌تری نسبت به سایر آزمایش‌ها هستند. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که نسبت مورد قبول ابعاد گالری به ابعاد صفحه بارگذاری به شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی محل انجام آزمایش بستگی دارد و هر چه توده‌سنگ دارای کیفیت بالاتری باشد، برای حصول به نتیجه واقعی‌تر، این نسبت باید بزرگ‌تر باشد.

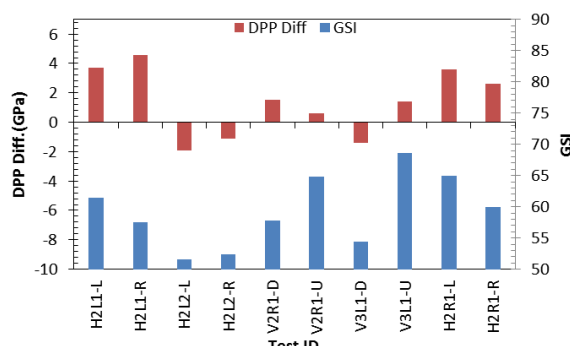
۶- نتیجه‌گیری

مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ، یکی از پارامترهای ورودی مهم در تحلیل‌ها و طراحی‌های مهندسی سنگ است. این پارامتر به دو روش غیرمستقیم؛ با استفاده از رابطه‌های تجربی؛ و مستقیم؛ با استفاده از آزمایش‌های برجا؛ به دست می‌آید. از جمله معمول‌ترین آزمایش‌های برجا برای اندازه‌گیری مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ، آزمایش

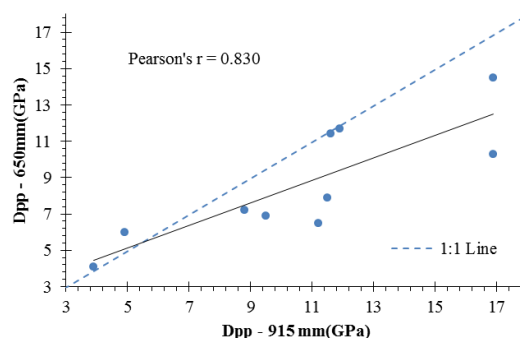
همبستگی (شکل ۱۲) و آزمون t (جدول ۸) مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۱۰: مقایسه مدول تغییرشکل‌پذیری به دست آمده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای با قطر ۹۱۵ و ۶۵۰ میلی‌متر



شکل ۱۱: مقایسه شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده‌سنگ و اختلاف مدول تغییرشکل‌پذیری به دست آمده از آزمایش‌های با صفحه‌های ۹۱۵ و ۶۵۰ میلی‌متر



شکل ۱۲: همبستگی مدول تغییرشکل‌پذیری به دست آمده از آزمایش‌های با صفحه‌های ۹۱۵ و ۶۵۰ میلی‌متر
جدول ۸- مقایسه آماری مدول تغییرشکل‌پذیری به دست آمده از آزمایش‌های با دو قطر متفاوت

پارامتر	مقدار
t Stat	۲/۷۰
P(T<=t) two-tail	۰/۰۲

در شکل ۱۰، نتیجه تحلیل همبستگی نشان می‌دهد، نتایج آزمایش‌های جک صفحه‌ای حاصل از دو صفحه

صفحه ۶۵۰ میلی‌متری بزرگ‌تر از مدول آزمایش به دست آمده از صفحه ۹۱۵ میلی‌متری بوده است. این اختلاف را می‌توان ناشی از تأثیر شرایط ژئوتکنیکی توده‌سنگ بر مقدار مورد قبول نسبت ابعاد گالری آزمایش به ابعاد صفحه بارگذاری دانست یعنی، در توده‌سنگ‌های ضعیف‌تر، جابجایی‌های ناشی از بارگذاری، تحت تنش یکسان، منطقه کوچک‌تری را تحت تأثیر قرار می‌دهند و نسبت ابعاد گالری آزمایش به قطر صفحه بارگذاری، می‌تواند کوچک‌تر بوده و از صفحه بزرگ‌تر در گالری کوچک‌تر استفاده کرد.

مراجع

- [1] Palmstrom, A. and R. Singh, (2001), "The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(3), 115-131.
- [2] Sonmez, H., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H. A., & Kayabasi, A., (2006), "Estimation of rock modulus: For intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 224-235.
- [3] Hoek, E. and M. S. Diederichs, (2006), "Empirical estimation of rock mass modulus", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 203-215.
- [4] Barton, N., (2002), "Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 185-216.
- [5] Palmstrom, A., (1996), "Characterizing rock masses by R_{Mi} for use in practical rock engineering(Part1: the development of the rock mass index(R_{Mi}))", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2), 175-188.
- [6] Deere, D. U. (1989). "Rock quality designation(RQD) after twenty years ", *U.S. Army crops of engineering*: 67.
- [7] Gokceoglu, C., Sonmez, H., & Kayabasi, A., (2003), "Predicting the deformation moduli of rock masses", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 701-710.
- [8] Zhang, L. and H. H. Einstein, (2004), "Using RQD to estimate the deformation modulus of rock masses", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 337-341.
- [9] Kayabasi, A., Kayabasi, A., Gokceoglu, C., & Ercanoglu, M., (2003), "Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative

بارگذاری صفحه‌ای است که با استفاده از صفحات بارگذاری صلب و انعطاف‌پذیر با اندازه‌های مختلف و نیز مقادیر تنش متفاوت انجام می‌شود. در این پژوهش، مقایسه‌ای بین نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای انجام شده به روش بارگذاری با صفحه‌های صلب، با دو مقدار تنش ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال و همچنین صفحه‌های با قطر ۶۵۰ و ۹۱۵ میلی‌متر صورت پذیرفته است.

مقایسه بین نتایج ۳۶ زوج آزمایش انجام شده با بیشینه تنش ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال که به روش‌های تحلیل همبستگی و نیز آزمون t انجام شد، به ترتیب، ضریب همبستگی برابر ۰/۹۷ و مقدار p-value برابر ۰/۳۱ را نتیجه داد. این مقادیر نشان می‌دهند بین نتایج آزمایش با بارهای مختلف، اختلاف معنی‌داری وجود نداشته و مقدار تنش اعمال شده بر مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ، تأثیری نداشته است.

پس از حصول نتیجه بالا در مورد تأثیر میزان تنش اعمال شده بر آزمایش‌ها، نتیجه‌های آزمایش‌ها در ۱۰ موقعیتی که آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در آنها با دو صفحه با قطرهای ۶۵۰ و ۹۱۵ میلی‌متر انجام شده بودند، با هم مورد مقایسه قرار گرفتند. برای مقایسه این زوج داده‌ها نیز از آزمون‌های آماری گفته شده استفاده گردید. نتایج تحلیل همبستگی و آزمون t در مورد این داده‌ها به صورت ضریب همبستگی برابر ۰/۸۳ و مقدار p-value برابر ۰/۰۲ است. این نتیجه‌ها نشان می‌دهد، علیرغم همبستگی نسبتاً خوب بین داده‌ها، اختلاف معنی‌داری بین آنها وجود دارد و میانگین مدول اوج تا اوج به دست آمده، برای صفحات ۹۱۵ و ۶۵۰ میلی‌متری؛ به ترتیب ۱۰/۷ و ۸/۶ گیگاپاسکال؛ از نظر آماری تفاوت معنی‌داری دارند و میانگین مدول به دست آمده از آزمایش با صفحه ۹۱۵ میلی‌متری بزرگ‌تر از صفحه ۶۵۰ میلی‌متری است.

مقایسه نتایج هر یک از زوج آزمایش‌ها با هم نشان می‌دهد، از تعداد ۱۰ زوج آزمایشی که با هر دو صفحه انجام شده بودند، در ۷ مورد، آزمایش‌های با صفحه ۹۱۵ میلی‌متر، مدول تغییرشکل‌پذیری بزرگ‌تری داشته‌اند و در ۳ مورد برعکس بوده است. برای بررسی دقیق‌تر اختلاف‌ها و دلیل اختلاف‌ها، مدول‌های به دست آمده از هر زوج آزمایش، با مقدار طبقه‌بندی GSI توده‌سنگ، در محل آزمایش، مورد مقایسه قرار گرفتند. این مقایسه نشان می‌دهد، در توده‌سنگ‌های با مقدار GSI پایین‌تر، مدول به دست آمده از

- Mechanics Mining Sciences and Geomechanics, 16, 197-202.
- [22] ASTM, (1998), "Standard Test Method for Determining the In Situ Modulus of Deformation of Rock Mass Using the Flexible Plate Loading Method", West Conshohocken, United States, D 4395 – 98.
- [23] Unal, E., (1997), "Determination of in-situ deformation modulus: New approaches for plate loading tests", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34, 897-915.
- [24] Palmstrom, A. (2009). "Combining the RMR, Q, and Rmi classification systems." from www.rockmass.net.
- [25] Singh, B. and R. K. Goel, (2011), "Engineering Rock Mass Classification, Tunneling, Foundations, and Landslides", Waltham, Elsevier Inc.
- [26] Hoek, E., Carter, T. G., & Diederichs, M. S., (2013), "Quantification of the Geological Strength Index Chart", 47th U.S. Rock Mechanics /Geomechanics Symposium, San Francisco, California American Rock Mechanics Association.
- [27] Rahimi, B., Shahriar, K., & Sharifzadeh, M., (2014), "Evaluation of rock mass engineering geological properties using statistical analysis and selecting proper tunnel design approach in Qazvin–Rasht railway tunnel", Tunneling and Underground Space Technology, 41, 206-222.
- [28] David, H. A. and J. L. Gunnink, (1997), "The Paired t Test Under Artificial Pairing", The American Statistician, 51(1), 9-12.
- study", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40, 55-63.
- [10] Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B., (2002), "Hoek- Brown failure criterion- 2002 edition", North American Rock Mechanics Society Meeting, Toronto, Canada.
- [11] Nejati, H. R., Ghazvinian, A., Moosavi, S. A., & Sarfarazi, V., (2014), "On the use of the RMR system for estimation of rock mass deformation modulus", Bulletin of Engineering Geology and Environment, 73(2), 531-540.
- [12] Palmstrom, A. (1995). "Rmi - a rock mass characterization system for rock engineering purposes", Oslo, University of Oslo, Ph.D: 381.
- [13] Sonmez, H., Gokceoglu, C., & Ulusay, R., (2004), "Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses based on the GSI system", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 849–857.
- [14] Carvalho, J., (2004), "Estimation of rock mass modulus", Personal communication.
- [15] Shen, J., Karakus, M., & Xu, C., (2012), "A comparative study for empirical equations in estimating deformation modulus of rock masses", Tunneling and Underground Space Technology, 32, 245-250.
- [16] Lowson, A. R. and Z. T. Bieniawski (2013). "Critical Assessment of RMR based Tunnel Design Practices: a Practical Engineer's Approach", RAPID EXCAVATION & TUNNELING, Washington, DC: 180-189.
- [17] Goodman, R. E., Van, T. K., & Heuze, F. E., (1968), "Measurement Of Rock Deformability In Boreholes", The 10th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Austin, Texas.
- [18] Kavur, B., Cvitanović, N. Š., & Hrženjak, P., (2015), "Comparison between plate jacking and large flat jack test results of rock mass deformation modulus", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 73, 102-114.
- [19] ISRM, (1978), "Suggested Methods for Determining In Situ Deformability of Rock", ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests,
- [20] ASTM, (2008), "Standard Test Method for Determining the In Situ Modulus of Deformation of Rock Mass Using the Rigid Plate Loading Method", West Conshohocken, United States, D 4394 – 08.
- [21] ISRM, (1979), "Suggested methods for determining in-situ deformability of rock- Part I: Suggested method for deformability determination using a plate test", International Journal of Rock