

مقایسه مدول تغییر شکل بدست آمده از آزمایش های برجای بارگذاری صفحه ای و دیلاتومتری

محسن رضائی^۱، محمد غفوری^۲، رسول اجل لوئیان^۳

۱- دانشجوی دکترای زمین شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه اصفهان

rezaei.eng@stu-mail.um.ac.ir

چکیده

مدول تغییر شکل توده سنگ، قابلیت تغییر شکل توده سنگ در برابر بارگذاری و باربرداری می باشد. این پارامتر از مهمترین پارامترها در طراحی های مهندسی توده سنگ می باشد. برای بدست آوردن مدول تغییر شکل توده سنگ، دو روش مستقیم و غیر مستقیم وجود دارد. در روش غیر مستقیم با استفاده از نتایج آزمایش های آزمایشگاهی و خصوصیات توده سنگ و با استفاده از روابط تجربی موجود، این پارامتر بدست می آید. در روش های مستقیم، با استفاده از آزمایش های برجای بارگذاری، مدول تغییر شکل توده سنگ برآورد می شود. از مهمترین معمولترین آزمایش های برجای بارگذاری صفحه ای و دیلاتومتری اشاره کرد. آزمایش های برجای بارگذاری به حجم توده سنگی که تحت تأثیر قرار می دهند، ممکن است نتایج متفاوتی را ارائه دهند. در این پژوهش مقایسه ای بین نتایج بدست آمده از آزمایش های بارگذاری صفحه ای و دیلاتومتری انجام شده در ساختگاه سد بختیاری صورت گرفته و با آزمون های آماری مناسب نتیجه گیری شده است که نتایج این دو روش آزمایش برجای بارگذاری، تفاوت معنی داری با هم نداشته و میانگین آنها با میزان خطای قابل قبولی با هم برابر می باشد.

کلمات کلیدی: مدول تغییر شکل، دیلاتومتری، بارگذاری صفحه ای، توده سنگ

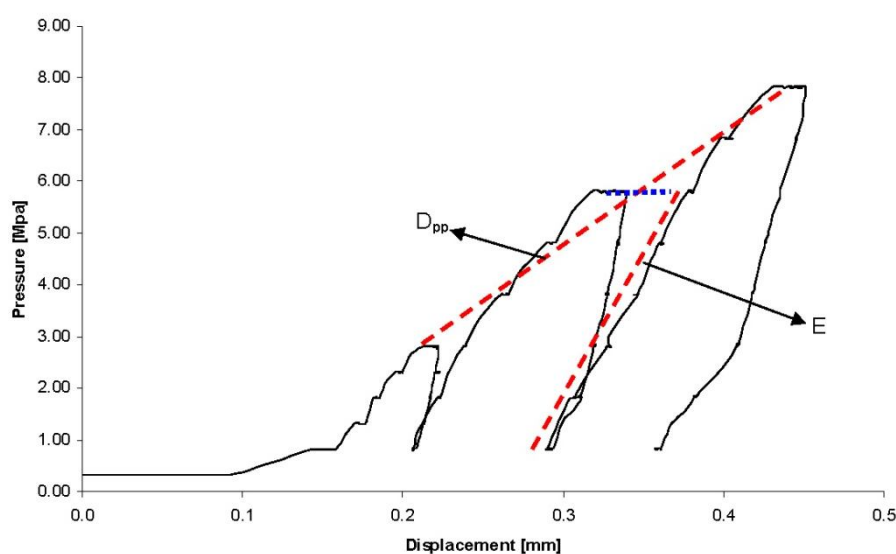
۱- مقدمه

تغییر شکل پذیری، طبق تعریف همان قابلیت سنگ در تغییر شکل یافتن در مقابل تنش های محیطی است. این تنش ها می توانند 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 می شود. با توجه به اینکه سنگ های در زده دار بصورت الاستیک رفتار نمی کنند، بجای مدول الاستیسیته، از مدول تغییر شکل برای آن استفاده می شود. مدول تغییر شکل استاتیک از جمله مناسب ترین پارامترهایی است که رفتار مکانیکی توده سنگ را توصیف می کند. این پارامتر در طراحی پروژه هایی که حتی نسبت به تغییر شکل های کم نیز حساس هستند اهمیت زیادی دارد. پروژه هایی همچون نیروگاه های هسته ای، سدهای قوسی، تونل های تحت فشار و برج های بزرگ مسکونی از جمله پروژه هایی هستند که باید در طول عمر مفیدشان حداقل تغییر شکل در آنها اتفاق بیفتد. در این نوع سازه ها، حتی زمانی که خطر گسیختگی وجود ندارد نیز، تغییر شکل سنگ بسیار نگران کننده است، چرا که تغییر شکل ناهمگن، حتی به مقدار جزئی، نیز می تواند باعث افزایش شدید تنش در سازه گردد.

برای بدست آوردن مدول تغییر شکل توده سنگ، دو روش مستقیم و غیر مستقیم وجود دارد. در روش غیر مستقیم با استفاده از نتایج آزمایش های آزمایشگاهی و خصوصیات توده سنگ و با استفاده از روابط تجربی موجود، این پارامتر بدست

می آید (Coon RF. and Merritt AH., ۱۹۷۰). در روش های مستقیم، مقدار مدول تغییر شکل توده سنگ، با استفاده از آزمایش ها برجا همچون بارگذاری صفحه ای، آزمایش ها درون چاهی و آزمایش های درون تونلی و همچنین آزمایش ها آزمایشگاهی بر روی نمونه ی سنگ بکر و سیستم طبقه بندی مهندسی تعیین می گردد (Ribacchi R., ۱۹۸۸). هر کدام از روش های یاد شده مزایا و معایبی دارند و روشی می تواند از نتایج مناسبی را ارائه دهد که بتواند حجم زیادی از سنگ را در مقایسه با سایر روش ها تحت بارگذاری قرار دهد. در پروژه های بزرگ ژئوتکنیکی، نتایج حاصل از آزمایش های آزمایشگاهی بر روی نمونه های کوچک، نمی تواند به عنوان معرف تغییر شکل پذیری در توده سنگ باشد، بنابراین انجام آزمایش های برجا توصیه می گردد. در بین روش های مختلف آزمایش های برجا در حال حاضر، آزمایش بارگذاری صفحه ای و آزمایش دیلاتومتری به عنوان رایج ترین آزمایش ها جهت تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ در نقاط مختلف دنیا استفاده می گردند (Palmstrom A, and Singh ۱۹۷۸, Bieniawski, Z. T., ۲۰۰۱, R.).

مدول تغییر شکل پذیری به صورت نسبت تنش به تغییر شکل ناشی از آن که هم رفتار الاستیک و هم رفتار پلاستیک توده سنگ را شامل می شود، تعریف می گردد. شیب خطی که ماکزیمم نقاط هر سیکل در منحنی های تنش - تغییر شکل را به هم متصل می کند، به عنوان مدول کلی یا اوج تا اوج در طول بارگذاری نامیده می شود و شیب خط آخرین سیکل بارگذاری بعنوان مدول الاستیک شناخته می شود. این وضعیت در شکل ۱ نشان داده شده است (ASTM, ۲۰۰۸).



شکل ۱ - نمودار تنش کرنش آزمایش های برجا و نحوه برآورد مدول ها

در این نوشتار سعی بر این است که با استفاده از نتایج آزمایش های دیلاتومتری و بارگذاری صفحه ای در تشکیلات و موقعیت مشابه، در ساختگاه سد بختیاری، مقایسه ای بین آنها صورت پذیرد.

۲- آزمایش بارگذاری صفحه ای

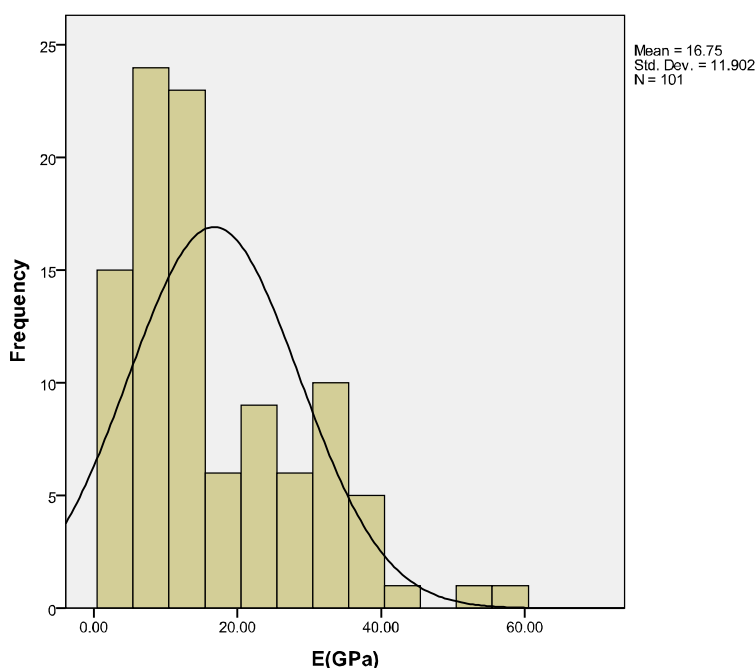
این آزمایش، معمولاً درون گالری های اکتشافی جهت اندازه گیری تغییر شکل پذیری توده سنگی انجام می شود. بدینصورت که، بار به صورت سیکل های بارگذاری - باربرداری، به طور مستقیم بر روی سنگ موجود در دیواره ها و یا سقف و کف تونل اعمال

می‌شود و مقدار جابجایی در سطح و درون توده سنگ در پشت محدوده بارگذاری توسط کشیدگی سنج‌های مکانیکی و یا دیجیتالی اندازه‌گیری می‌شود و نهایتاً با رسم منحنی‌های تنش-تغییر شکل، مدول تغییر شکل پذیری سنگ را تعیین می‌گردد. در مطالعه حاضر، محاسبه مدول تغییر شکل بر اساس رابطه پیشنهادی ASTM-۲۰۰۸ انجام گرفته است (رابطه ۱).

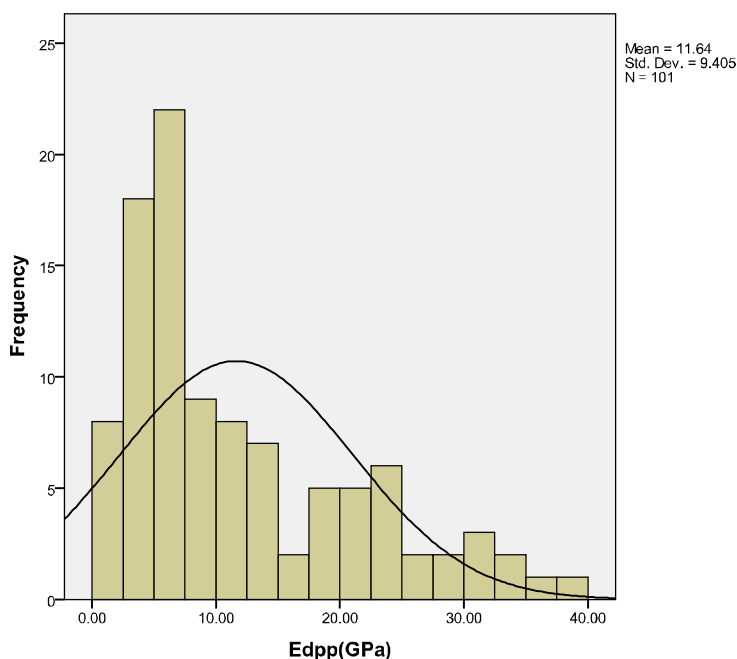
$$E = \frac{(1+\nu)P}{\pi WZR} \left[(\nu - \nu') \arccos \left(\frac{R}{(R^2 + Z^2)^{0.5}} \right) + \frac{RZ}{R^2 + Z^2} \right] \quad (1)$$

در این رابطه E مدول تغییر شکل، ν ضریب پواسون توده سنگ، P میزان بار اعمالی، WZ مقدار جابجایی در عمق R و Z شعاع صفحه بارگذاری می‌باشد.

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای دارای محدودیت‌هایی است که از جمله آنها می‌توان به اثر انفجار و حفاری تونل بر تغییر شکل پذیری توده سنگ و حجم کم توده سنگ تحت بارگذاری اشاره کرد (Kayabasi A et al., ۲۰۰۳). در این مطالعه، داده‌های تعداد ۱۰۱ آزمایش بارگذاری صفحه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است و مدول تغییر شکل اوج تا اوج توده سنگ و مدول الاستیک آن محاسبه شده است. در اشکال ۲ و ۳ توزیع فراوانی نتایج حاصله در مقایسه با منحنی نرمال ارائه شده است.



شکل ۲- فراوانی مدول الاستیک حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای



شکل ۳- فراوانی مدول تغییر شکل اوج تا اوج حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای

۳- آزمایش دیلاتومتری

این آزمایش جهت سنجش پارامترهای تغییر شکل پذیری توده سنگ، در داخل گمانه بکار می‌رود. بدین صورت که، بخشی از سنگ داخل یک گمانه توسط نیروی سیال و به واسطه یک غشاء انعطاف پذیر تحت تنش قرار داده می‌شود و این تنش باعث ایجاد یک کرنش می‌شود که متناسب با تغییر شکل پذیری توده سنگ است (Dershowitz WS et al., ۱۹۷۹).

با داشتن میزان کرنش در مقابل تنش اعمال شده و محاسبه شیب خط تنش-کرنش، می‌توان در جهاتی که سنسورهای جابجایی سنج بکار رفته است، مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ را با استفاده از رابطه ۲ محاسبه نمود (Jose, M. et al., ۲۰۰۵).

$$E_d = (1 + \nu_R) \cdot D \cdot \frac{\Delta P_i}{\Delta D} \quad (2)$$

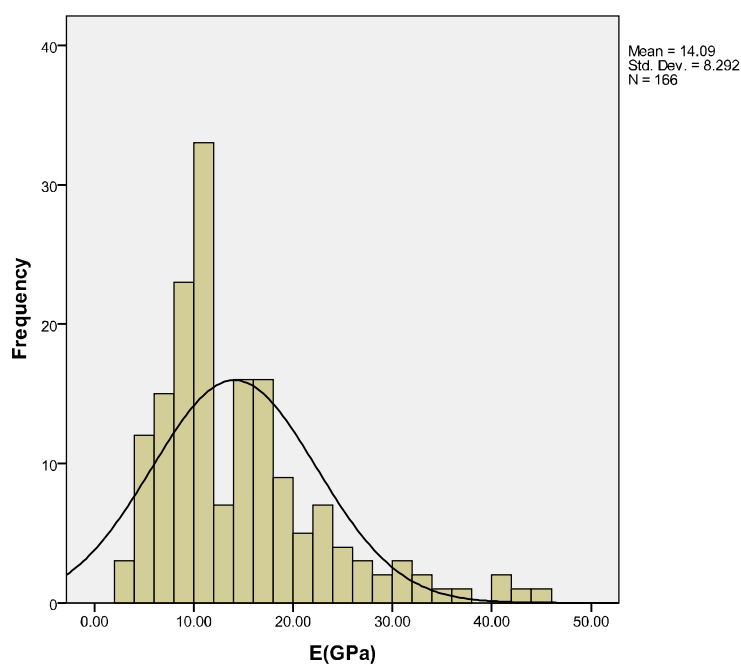
در این رابطه، E_d مدول تغییر شکل پذیری، ν_R نسبت پواسون توده سنگ، ΔP_i افزایش فشار در بخش مورد نظر، D قطر گمانه و ΔD میانگین تغییر قطر گمانه می‌باشد.

چنانچه آزمایش در توده سنگی با درزه و شکاف زیاد انجام گیرد و مقدار P_i از دو برابر متوسط فشار زمین اطراف گمانه بیشتر شود، کلیه ترک‌های شعاعی موجود باز خواهد شد و بنابراین رابطه ۳ جایگزین رابطه قبل می‌گردد (Jose, M. et al., ۲۰۰۵).

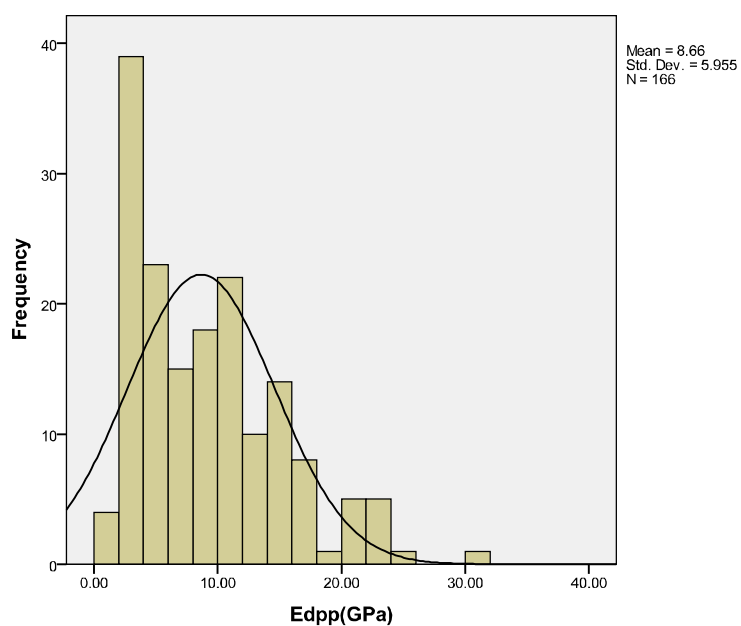
$$E_d = D \frac{P_i}{\Delta D} (1 + \nu_R) \left[(1 - \nu_R) \ln \left(\frac{P_i}{2P_o} \right) + 1 \right] \quad (3)$$

که P_i فشار اعمال شده، P_o : متوسط فشار برجا و ΔD متوسط افزایش قطر گمانه در اثر افزایش فشار از صفر به P_i است.

در این مطالعه نتایج تعداد ۱۶۶ آزمایش دیلاتومتری مورد استفاده قرار گرفته است. در اشکال ۴ و ۵ توزیع فراوانی مدول تغییر شکل اوج تا اوج و مدول الاستیک توده سنگ حاصل از آزمایش های دیلاتومتری و مقایسه آنها با منحنی نرمال نشان داده شده است.



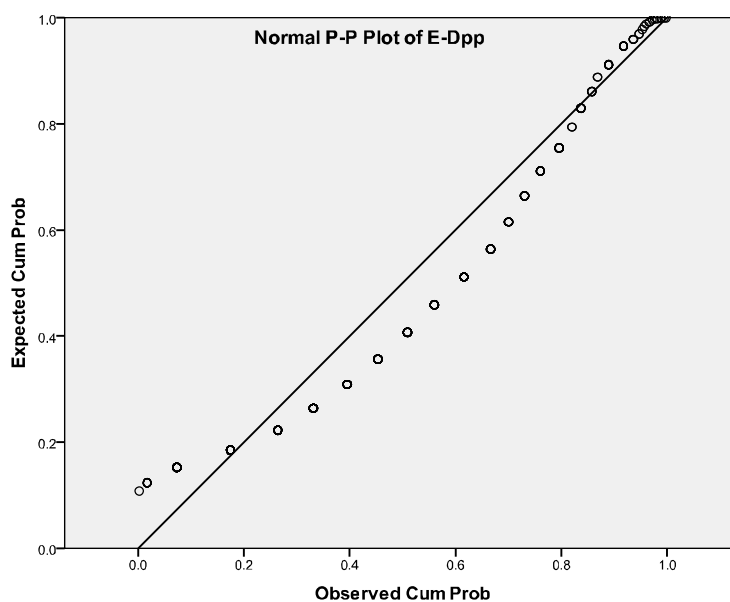
شکل ۴- فراوانی مدول تغییر شکل حاصل از آزمایش دیلاتومتری



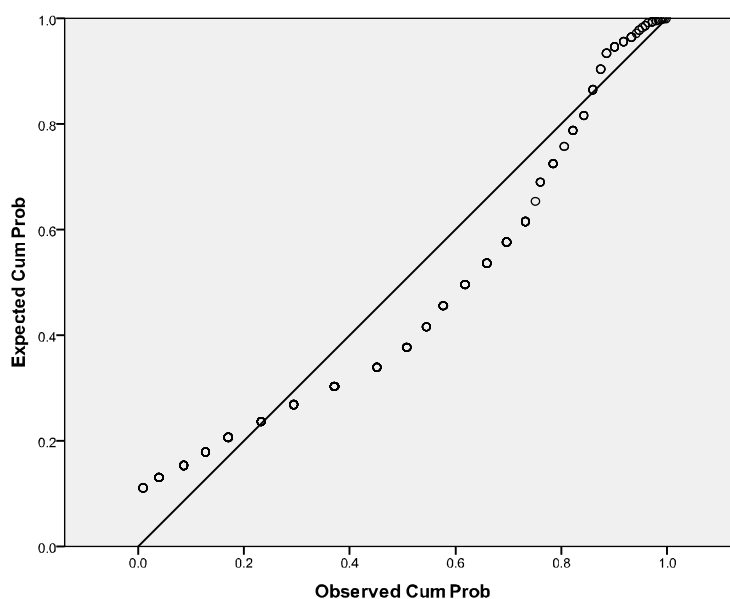
شکل ۵- فراوانی مدول تغییر شکل اوج تا اوج حاصل از آزمایش دیلاتومتری

۴- مقایسه نتایج آزمایش های بارگذاری صفحه ای و دیلاتومتری

برای مقایسه نتایج این آزمایش ها از آزمون های آماری مقایسه میانگین ها استفاده شد. با توجه به نرمال بودن یا نرمال نبودن داده ها و وابسته و یا غیر وابسته بودن آنها، نوع آزمون متفاوت می باشد. در این مطالعه داده ها غیر وابسته می باشند و بایستی از آزمون های داده های غیر وابسته استفاده شود. برای بررسی نرمال بودن داده ها از منحنی P-P استفاده شد که در اشکال ۶ و ۷ نتیجه این آزمون نشان داده شده است. با توجه به این اشکال، توزیع داده ها نرمال نمی باشد و بایستی از آزمون های ناپارامتری استفاده گردد. برای این مقایسه در نهایت، آزمون من-ویتی مورد استفاده قرار گرفت که نتایج آن در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.



شکل ۶- نمودار P-P مدول اوج تا اوج



شکل ۷- نمودار P-P مدول الاستیک

جدول ۱- نتایج آزمون من- ویتنی برای مدول اوج تا اوج

	E-Dpp
Mann-Whitney U	۷۱۹۸.۰
Wilcoxon W	۲۱۰۵۹.۰
Z	-۱.۹۴۰
Asymp. Sig. (۲-tailed)	۰.۰۵۲

جدول ۲- نتایج آزمون من- ویتنی برای مدول الاستیک

	E
Mann-Whitney U	۷۸۱۰.۰
Wilcoxon W	۲۱۶۷۱.۰
Z	-۰.۹۳۸
Asymp. Sig. (۲-tailed)	۰.۳۴۸

با توجه به نتایج آزمون من- ویتنی و مقدار sign بدست آمده که در جداول فوق ارائه شده است و در هر دو مورد بیشتر از ۰/۰۵ می باشد، دلیلی برای تفاوت میانگین داده های حاصل از دو آزمایش وجود ندارد.

۵- نتیجه گیری

مدول تغییر شکل توده سنگ از مهمترین پارامترهای ورودی در طراحی های عمرانی می باشد. با توجه به اینکه این مدول را بطور مستقیم در آزمایشگاه نمی توان بدست آورد، در پروژه های بزرگ معمولاً از آزمایش های برجا برای تعیین آن استفاده می شود. آزمایش های متداولی که برای این منظور مورد استفاده قرار می گیرند، بارگذاری صفحه ای و دیلاتومتری می باشند. نتایج این آزمایش ها با توجه به حجمی از سنگ که تحت تنش قرار می دهند، می تواند متفاوت باشد. در این پژوهش مطالعات آمار توصیفی نشان می دهد که مدول بدست آمده از آزمایش دیلاتومتری مقداری از مدول بدست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه ای پایین تر است. اما آیا این تفاوت معنی دار می باشد؟ برای این منظور از آزمون من- ویتنی استفاده شده است و نشان می دهد تفاوت مشاهده شده در نتایج این دو روش آزمایش بر جای تعیین مدول تغییر شکل توده سنگ، معنی دار نمی باشد و هر دو روش نتایج یکسانی را بدست می دهند.

منابع

- ASTM (۲۰۰۸) "Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Mass Using Rigid Plate Loading Method", Annual Book of ASTM, vol. ۰۴.۰۸.
- Bieniawski, Z.T. (۱۹۷۸) "Determining rock mass deformability: experience from case histories"; Int. J. Rock Mechanics Miner. Sci. Geomechanics Abstr. ۱۵, ۲۳۷.
- Coon RF and Merritt AH. (۱۹۷۰) "Predicting in situ modulus of deformation using rock quality indices. In: Determination of the In Situ Modulus of Deformation of Rock", ASTM STP ۴۷۷, Philadelphia, pp. ۱۰۴-۷۳.
- Dershowitz WS et al. (۱۹۷۹) " Prediction of rock mass deformability." In: Proceedings of the Fourth International Congress of the International Society for Rock Mechanics, vol. ۱, Montreal, Canada, pp. ۶۰۵-۱۱.
- Jose, M. et al. (۲۰۰۵) "Evaluation of the deformation modulus of rock masses: comparison of pressuremeter and dilatometer tests with RMR prediction", ISP-PRESSIO ۲۰۰۵ International Symposium.



- Kayabasi A et al. (۲۰۰۳) "Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study." *Int J Rock Mech Min Sci*, vol ۴۰, pp ۵۵-۶۳.
- Palmstrom A, Singh R. (۲۰۰۱) "The deformation modulus of rock masses: comparisons between in situ tests and indirect estimates." *Tunnelling Underground Space Technol*; vol. ۱۶, pp ۱۱۵-۳۱.
- Ribacchi R. (۱۹۸۸) "Rock mass deformability; in situ tests, their interpretation and typical results in Italy." In: Sakurai, editor. *Proceedings of the second international symposium on field measurements in geomechanics*. Balkema: Rotterdam.