ارزیابی خصوصیات تغییرشکل‌پذیری توده سنگ با استفاده از آزمایش دیلاتومتری

صابر اکبری

شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک

چکیده

مدول دگرشکلی توده‌سنگ در طراحی بسیاری از سازه‌های سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد و دارای اهمیت زیادی در مکانیک سنگ می‌باشد. آزمایش دیلاتومتری یکی از آزمایش‌های برجا در مکانیک سنگ است که خروجی آن مدول دگرشکلی توده‌سنگ می‌باشد. با توجه به اینکه آزمایش‌های برجا، سنگ را در محیط طبیعی آن، همراه با درزه‌ها و ناپیوستگی‌های موجود مورد آزمایش قرار می‌دهند، نتیجه حاصل در مقایسه با روش‌های دیگر به رفتار واقعی توده‌سنگ نزدیک‌تر است. در مقاله حاضر آزمایش دیلاتومتری و کاربردهای آن با نگرش به آزمایش انجام شده در پروژه سد صفارود کرمان مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- مقدمه‌ای بر تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ

پارامتر تغییرشکل‌پذیری[1]، نشان دهنده میزان تغییرشکل توده سنگ در پاسخ به بارگذاری و باربرداری می‌باشد. این پارامتر در طراحی حفریات زیرزمینی و پی‌های سنگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پروژه‌هایی همچون نیروگاه‌های هسته‌ای، سدهای قوسی، تونل‌های تحت فشار، تونل‌های راه و برج‌های مسکونی از جمله پروژه‌هایی هستند که باید در طول عمر مفیدشان تغییرشکل کمی (کمتر از حد قابل تحمل برای سازه) در آنها اتفاق بیفتد. در این نوع سازه‌ها، حتی زمانی که خطر گسیختگی وجود ندارد، تغییرشکل می‌تواند نگران کننده باشد، چرا که تغییرشکل ناهمگن (حتی به مقدار جزئی) می‌تواند باعث افزایش شدید تنش و ایجاد تنش‌های برشی و کششی در سازه گردد.

ایجاد تغییرشکل در توده‌سنگ، ناشی از بسته شدن درزه و ترک‌ها و تغییرشکل‌های الاستیک و پلاستیک ماده سنگ تشکیل دهنده آن می‌باشد. شاخص و معیار تغییرشکل‌پذیری در سنگ بکر «مدول الاستیسیته» یا «مدول یانگ» است. اما از آنجا که توده‌های سنگی معمولاً علاوه بر رفتار الاستیک، در محدوده پلاستیک نیز تغییرشکل می‌دهند، از واژه مدول تغییرشکل‌پذیری برای توده‌سنگ استفاده می‌شود. طبق تعریف مدول تغییرشکل‌پذیری برابر با نسبت تنش به تغییرشکل نسبی متناظر آن در طی بارگذاری توده‌سنگ است. بسیاری از سنگ‌ها در مقیاس آزمایشگاهی الاستیک تلقی می‌شوند، ولی در مقیاس صحرایی به دلیل حضور درزه و ترک‌ها، صفحات لایه‌بندی، مناطق دگرگون شده و لایه‌های رسی، دارای ویژگی‌های پلاستیک می‌باشند. میزان تغییرشکل غیرقابل برگشت (پلاستیک) توده‌سنگ در طراحی دارای اهمیت فراوانی است.

[1] Deformability

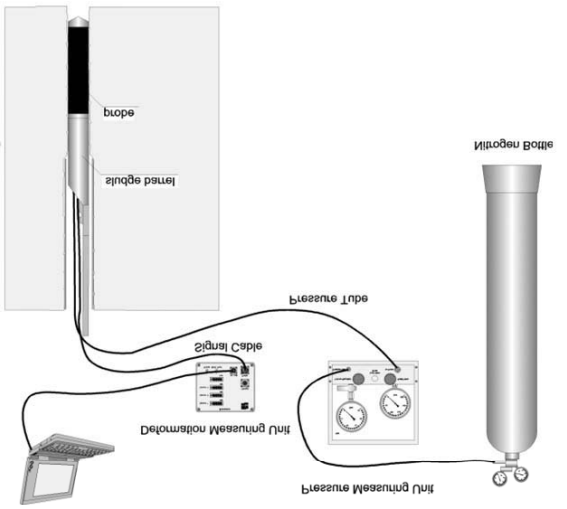
۲- اهمیت اندازه‌گیری‌های برجای خصوصیات توده‌سنگ

خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ به واسطه وجود ریزشکستگی‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی از قبیل گسل‌ها، لایه بندی‌ها، حضور آبهای زیرزمینی، تاثیرات اندازه و ... دارای تفاوت قابل ملاحظه‌ای با خصوصیات مکانیکی سنگ بکر است. لذا اندازه‌گیری خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ به صورت برجا دارای اهمیت فراوان در مکانیک سنگ می‌باشد. روش‌های مختلفی برای ارزیابی خصوصیات تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ به صورت برجا وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های بارگذاری صفحه‌ای، جک شعاعی، جک مسطح، دیلاتومتر و ... اشاره کرد. در مقاله حاضر روش دیلاتومتری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳- آزمایش دیلاتومتری

آزمایش دیلاتومتری یکی از آزمایش‌های درون گمانه‌ای متداول برای تعیین خصوصیات تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ است. در این آزمایش مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ با اعمال فشار به دیواره گمانه توسط دیلاتومتر انعطاف پذیر تعیین می‌گردد. انبساط ایجاد شده در گمانه یا به طور مستقیم توسط سنسورهای الکتریکی نصب شده بر روی دستگاه و یا با اندازه‌گیری تغییر حجم مایع پمپاژ شده به داخل پراب دیلاتومتر اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به رابطه بین فشار و اتساع، مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ در عمقی که دیلاتومتر نصب شده است، محاسبه می‌شود. دستگاه دیلاتومتر موجود در شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک مدل IF096 ساخت شرکت اینترفلس آلمان با قطر خارجی ۹۶ میلی‌متر و به طول ۱ متر است. دستگاه مجهز به سه سنسور اندازه‌گیری تغییرشکل در مرکز می‌باشد که به فاصله ۷۵ میلی‌متر در امتداد قائم با زاویه ۱۲۰ درجه به صورت افقی نصب گردیده‌اند. علایم ارسالی از سنسورهای تغییرشکل از طریق کابل الکتریکی به دستگاه قرائت دیجیتالی منتقل و در زمان‌های موردنظر بر روی رایانه ثبت و ذخیره می‌شوند.

انبساط پکر دستگاه به صورت پنوماتیکی و با استفاده از فشار گاز نیتروژن انجام می‌گیرد. نمایی از دستگاه در شکل ۱ و محدوده عملکرد دستگاه در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- تجهیزات دستگاه دیلاتومتر

جدول۱- محدوده عملکرد دستگاه دیلاتومتر IF096 ساخت شرکت اینترفلس

اندازه‌گیری جابجایی	تا ۲۰ میلی‌متر
فشار اعمالی	تا ۱۰۰ بار (۱۰ مگاپاسکال)
محدوده قابل اندازه‌گیری مدول تغییرشکل‌پذیری	از ۵ مگاپاسکال به بالا
قطر گمانه	۱۰۱ میلی‌متر
عمق انجام آزمایش	حداکثر ۱۰۰ متر
طول درگیری پکر با دیواره گمانه	۵۷۰ میلی‌متر

۳-۱- اهمیت و موارد استفاده

با توجه به اهمیت زیاد مدول دگرشکلی توده‌سنگ به عنوان پارامتر ورودی در نرم‌افزارهای عددی به منظور

بررسی رفتار تنش- کرنش توده‌سنگ درونگیر، پارامتر مذکور در بررسی‌های ژئوتکنیکی پی‌ها، سدها، تونل‌ها، مغارها و ... استفاده می‌شود.

۳-۲- مزایا و معایب آزمایش دیلاتومتری

از مزایای آزمایش دیلاتومتری می‌توان به قابلیت تعیین مدول الاستیک و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ با اعمال بار و اندازه‌گیری اتساع حاصل از آن، تعیین ویژگی‌های خزشی (تغییرشکل در طول زمان تحت بار ثابت) برای سنگ‌هایی نظیر شیل‌های نفتی، نمک و پتاس، تعیین ویژگی‌های مقاومتی کوتاه‌مدت در سنگ‌های سست به وسیله منحنی‌های غیرخطی فشار- حجم و بررسی تغییرات در میزان تغییرشکل‌پذیری در مقایسه با تغییرات کیفی سنگ‌ها نسبت به عمق اشاره کرد. در مقابل، معایبی نظیر حجم کم سنگ تحت تنش (حدود۱/۳ متر مکعب) و لزوم انجام تصحیحات روی نتایج حاصله را می‌توان برای آزمایش دیلاتومتری در سنگ ذکر نمود.

۳-۳-شرایط مورد نیاز برای انجام آزمایش

در حفر گمانه‌های آزمایش دیلاتومتری باید دقت فراوان مبذول گردد تا پایداری آنها تضمین شود. اگر مصالح سنگی حین آزمایش ناخواسته بین پراب دیلاتومتر و دیواره گمانه قرار گیرند، ممکن است سبب گیر کردن دائمی یا آسیب دیدن پراب گردند. قطر گمانه ۰/۵ تا ۳ میلیمتر بزرگتر از قطر پراب دیلاتومتر در حالت منقبض شده است. این رقم بر حسب عمق گمانه تغییر می‌کند، ولی نباید از ۵ میلی‌متر بیشتر باشد. برای انجام آزمایش در پروژه سد صفارود کرمان دو گمانه به نام D-1 در جناح راست و D-2 در جناح چپ در پایین‌دست بدنه سد حفر گردید. این گمانه‌ها با قطر خارجی ۱۰۱ میلی‌متر و عمق نهایی ۵۰ متر حفاری شدند. با توجه به پتانسیل فرسایش‌پذیری و کیفیت پایین توده‌سنگ، گمانه‌ها بصورت غیرپیوسته و متناسب با عمق مقطع آزمایش حفاری می‌شدند. به عبارت دیگر حفاری گمانه تا ۳ متر پایین‌تر از عمق آزمایش متوقف و پس از پایان آزمایش، تا رسیدن به مقطع بعدی ادامه می‌یافت.

۳-۴-کالیبراسیون دستگاه

کالیبراسیون دیلاتومتر پیش از هر سری آزمایش و پس از تعویض غشاء و یا تعمیرات عمده انجام می‌گیرد. پس از نشت‌گیری دستگاه که با اعمال حداکثر فشار مورد نیاز در آزمایش اصلی به پراب دیلاتومتر قرار گرفته در داخل لوله سخت و حصول اطمینان از عدم وجود نشتی در اتصالات تحت فشار سیستم بعد از گذشت مدت زمانی مشخص انجام می‌شود، اعمال فشار حذف و کالیبراسیون دستگاه با استفاده از اعمال بار و افزایش پله‌ای آن به دستگاه قرارگرفته در داخل لوله سخت و قرائت تغییرشکل‌های متناظر هر پله بار انجام می‌شود. با استفاده از مقادیر قرائت شده، منحنی فشار در مقابل جابجایی نسبی ترسیم و شیب آن که نمایانگر مدول یانگ است محاسبه می‌گردد. مدول بدست آمده به مدول یانگ لوله کالیبراسیون که در آزمایشگاه تعیین می‌شود، تقسیم و از آن به عنوان ضریب کالیبراسیون استفاده می‌گردد. سنسورهای جابجایی تعبیه شده بر روی دیلاتومتر نیز با استفاده از ورنیه کالیبره می‌شوند. در پروژه سد صفارود، در حالی که دیلاتومتر داخل استوانه کالیبراسیون قرار داشت، فشار۵۰ بار در مدت زمان نیم ساعت تا ٤٥ دقیقه به سیستم اعمال شده و نشتی و ثابت ماندن فشار کنترل‌شد. در ادامه، اعمال فشار حذف و مجدداً بارگذاری پله‌ای به صورت سیکل‌های بارگذاری و باربرداری انجام شد تا مدول به دست آمده از تئوری الاستیسیته با مدول واقعی لوله مقایسه گردد. با توجه به نزدیکی مدول‌های بدست آمده از بارگذاری چرخه‌ای و مدول آزمایشگاهی لوله کالیبراسیون، ضریب کالیبراسیون در پروژه مذکور ۱ در نظر گرفته شد.

۳-۵-روند انجام آزمایش

بعد از کنترل تمیزی و صافی دیواره گمانه توسط لوله قطرسنج مخصوص، پراب دیلاتومتر به منظور شروع آزمایش با استفاده از میله‌های[2] مخصوص در داخل گمانه پایین داده می‌شود تا در عمق موردنظر قرار گیرد. در مرحله بعد ابتدا با اعمال فشار اولیه به پراب دستگاه و بعد از حصول اطمینان از اتصال غشای انعطاف‌پذیر با دیواره گمانه، فشار به صورت پله‌ای افزایش داده‌شد. در هر پله فشار، قرائت سنسورهای جابجایی در زمان‌های تعیین شده انجام می‌گیرد. بعد از رسیدن به سقف فشار مورد نظر در آزمایش، فشار به صورت پله‌ای کاهش داده می‌شود و تغییرشکل‌های متناظر هر پله فشار در زمان‌های تعیین شده قرائت می‌شود. در حالت معمول ۳ سیکل بارگذاری و باربرداری انجام می‌شود.

روش انجام آزمایش در پروژه سد صفارود بدین صورت بود که با توجه به مغزه‌های بازیافتی، مقطع مناسب انتخاب‌شد. سپس دیلاتومتر در عمق مورد نظر مستقر و با اعمال فشار اولیه ٤ تا ٦ بار در مقطع نصب شد. آزمایش در سه سیکل بارگذاری و باربرداری انجام گردید. به دلیل نرم بودن مصالح، حداکثر فشار در هر سیکل بارگذاری به ترتیب ۱۲، ۲٤ و ۱۸ بار انتخاب گردید. سیکل‌های بارگذاری و باربرداری هر آزمایش به شرح زیر بود:

سیکل اول: ٤-٦-٨-١٠-١٢-١٠-٨-٦-٤

سیکل دوم: ٤-٨-١٠-١٢-١٤-١٦-١٨-١٦-١٤-١٢-١٠-٨-٤

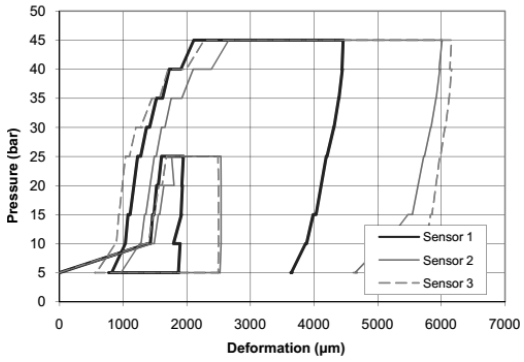
سیکل سوم: ٤-٨-١٢-١٤-١٦-١٨-٢٠-٢٢-٢٤-٢٢-٢٠-١٨-١٦-١٤-١٢-٨-٤

در مجموع تعداد ۱۱ آزمایش در ۲ گمانه قائم D-1 و D-2 به عمق ۵۰ متر انجام شد. در جدول ۲ مشخصات مقاطع آزمایش ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات مقاطع آزمایش دیلاتومتر

گمانه	مقطع	عمق (متر)	جنس سنگ
D1	D1-1	١٦/٥	مارن سیلت‌دار
	D1-2	٢٠/٥	مارن سیلت‌دار
	D1-3	٢٤/٢	مارن سیلت‌دار
	D1-4	٣١/٦	مارن سیلت‌دار
	D1-5	٣٩/٢	ماسه‌سنگ سیلت‌دار
	D1-6	٤٠/٩	مارن سیلت‌دار
	D1-7	٤٦/١	ماسه‌سنگ
D2	D1-1	١٧/٨	مارن سیلت‌دار
	D1-2	٢٢/٠	سیلت‌استون
	D1-3	٤٠/٠	سیلت‌استون
	D1-4	٤٢/٥	سیلت‌استون

در دستورالعمل اولیه حداکثر فشار آزمایش در سیکل‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۲۵، ٤٥ و ٦٥ بار در نظر گرفته شده بود. با توجه به ماهیت ضعیف سنگ، اعمال فشارهای مذکور در مقاطع D2-1 و D2-2 سبب بروز تغییرشکل‌های زیاد گردید. از آنجا که تغییرشکل‌ها به دلیل زیاد بودن فشار وارده به سنگ عمدتاً ماهیتی غیرالاستیک و وابسته به زمان داشتند (به نمودار فشار- جابجایی مقطع D2-1 در شکل ۲ توجه شود) در ادامه کار فشارهای آزمایش مطابق مقادیر فوق الذکر اصلاح گردید.

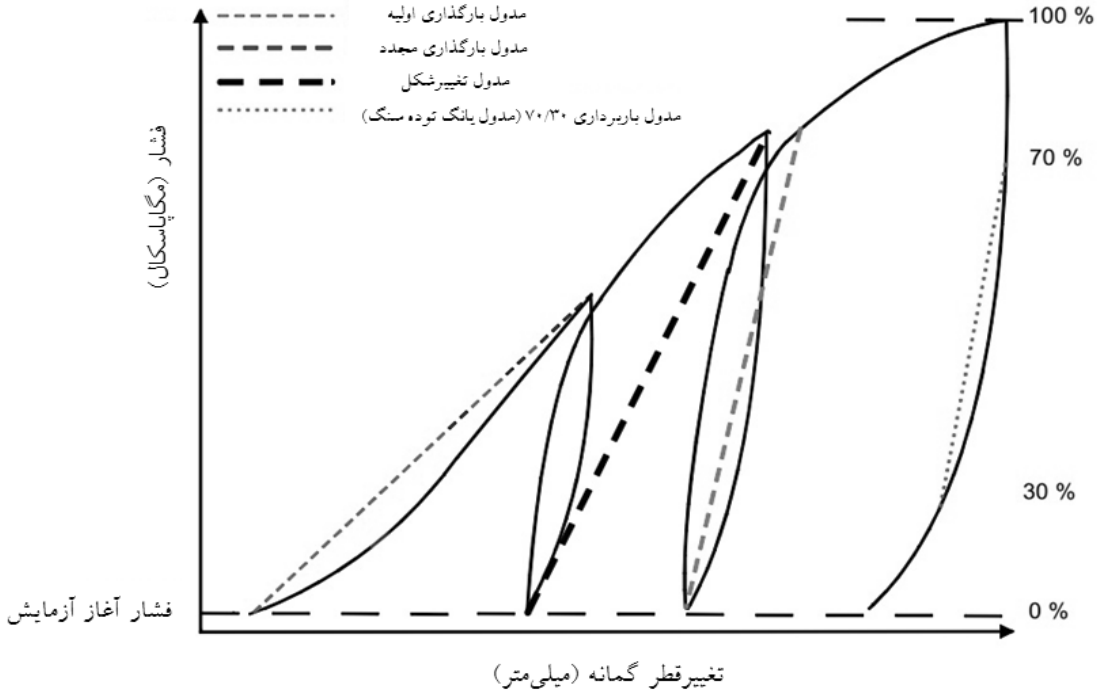


شکل ۲- نمودار فشار- جابجایی مقطع D2-1

[2] Rods

۳-۶- تحلیل نتایج

بعد از قرائت تغییرشکل‌های متناظر با بارهای اعمال شده، منحنی فشار در مقابل تغییرشکل ترسیم می‌گردد. این منحنی به صورت شماتیک در شکل ۳ نمایش داده شده است. مدول‌های قابل استخراج برای توده‌سنگ در آزمایش دیلاتومتری در این شکل مشخص شده‌اند.



شکل ۳: نمودار فشار- تغییرشکل و مدول های قابل استخراج

برای محاسبه مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ در حالت درزه‌داری کم از رابطه ۱ و در حالت درزه‌داری زیاد از رابطه ۲ استفاده می‌شود.

$$E_d = (1+\nu_R) D \frac{\Delta P_i}{\Delta D} \qquad (۱)$$

$$E_d = D \frac{P_i}{\Delta D}(1+\nu_R)\left[(1-\nu_R)\ln\left(\frac{P_i}{2P_0}\right)+1\right] \qquad (۲)$$

در روابط فوق،

E_d: مدول تغییرشکل‌پذیری (مگاپاسکال)

ν_R: نسبت پواسون توده سنگ

D: قطر اولیه گمانه (متر)

ΔP_i: افزایش فشار در قطعه مورد نظر (مگاپاسکال)

ΔD: تغییر در قطر گمانه (متر)

P_i: فشار وارده (مگاپاسکال)

P_0: فشار افقی متوسط زمین در عمق مورد نظر در اطراف گمانه (مگاپاسکال)

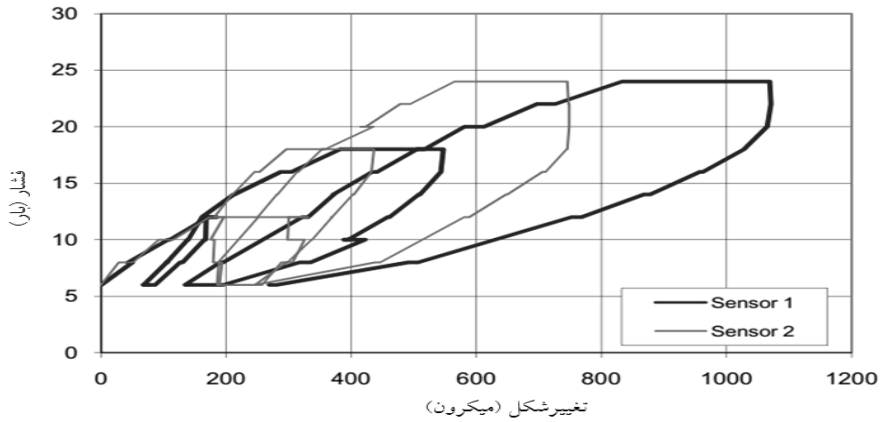
برای تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش دیلاتومتری سد صفارود، مقادیری که خارج از محدوده منطقی مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ‌ها قرار داشت و یا اینکه منحنی آزمایش روند مناسب و صحیحی را نشان نمی‌داد از مجموعه نتایج حذف گردید. نتایج آزمایش شامل مدول‌های تغییرشکل‌پذیری است که در شرایط بارگذاری و باربرداری و همچنین مدول کلی بارگذاری[3] برای هر سنسور محاسبه گردید. مدول‌های اندازه‌گیری شده شامل

[3] Total Deformation Modulus

مدول بارگذاری و باربرداری در هر سیکل آزمایش به همراه مدول تغییر شکل‌پذیری کل مربوط به گمانه D1 به ترتیب در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین نمونه‌ای از نمودارهای فشار- جابجایی در شکل ٤ نشان داده شده است.

جدول ۳- نتایج آزمایش دیلاتومتری در گمانه D-1 بر حسب مگاپاسکال

عمق (متر)	شماره سنسور	سیکل اول ۱/۲ مگاپاسکال		سیکل دوم ۱/۸ مگاپاسکال			سیکل سوم ۲/٤ مگاپاسکال			مدول کل
		بارگذاری	باربرداری	بارگذاری	بارگذاری مجدد	باربرداری	بارگذاری	بارگذاری مجدد	باربرداری	
۱٦/٥	۱	۲۲٤	۳۷٥۰	٥٤۰	۱۰۲۰	۱٤۰۰	٤۷۰	۷۸۰		۲۸۰
	۲	۲۰۰	۱۷٥۰	٤٥۰	۷۱۰	۱۰٦۰	٤۸۰	٦٥۰	۹۲۰	۲۸۰
۲۰/٥	۱	٤۷۰	۱۲٥۰	۳۳۰	۸٥۰	۸٤۰	۲٥۰	٤۱۰	٥۰۰	۲۲۰
	۲	۲٦۰	٤۳۸۰	٦٤۰	–	۱۰٥۰	٤۲۲	۹۱۰	۹٥٥	۳۲۰
۲٤/۲	۱	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	۲	٦٤۰	–	۲۰۲۰	۲۳۹۰	۱۹۱۰	۹٥۰	۱٥٥۰	۷۸۸۰	۷٦۰
۳۹/۲	۱	–	٥۲٥۰	۱٦٦۰	۳۰۳۰	۳٥۰۰	۸۷۰	۱٦۱۰	۱۷۹۰	۱٦۰۰
	۲	–	–	–	–	–	–	–	–	–
٤۰/۹	۱	۱٦۸۰	۲۱۰۰	۳۸۰	۲٦۰	۳٥۰۰	٥٥۹	٤۸۰	۲۷۷۰	۷۲٥
	۲	۳٦٥	۱۳۱۳۰	۸۱۰	٥٤۰	۱۷٥۰۰	۱۲۳۰	۱۱۸۰	٦۰٦۰	٦٤۰
٤٦/۱	۱	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	۲	۱۰۷	–	۱۰۰۰	۱۰۲۰	–	۱٦۸۰	۲۱۰۰	–	۷۱۰



شکل ٤- نمونه‌ای از نمودارهای فشار- جابجایی

با توجه به تغییرات اعداد درج شده در جدول ۳ برای مدول تغییرشکل توده‌سنگ در اعماق مختلف گمانه، می‌توان دریافت که خصوصیات تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ درون گمانه در اعماق مختلف گمانه متفاوت است. دلیل این تفاوت را می‌توان عمدتاً با جنس سنگ بکر تشکیل دهنده توده‌سنگ و میزان درزه‌داری توده‌سنگ و خصوصیات درزه‌ها از جمله توجیه فضایی، فاصله‌داری، بازشدگی و ... مرتبط دانست. تحلیل آماری نتایج مدول تغییرشکل‌پذیری کل بر اساس جنس سنگ بکر تشکیل دهنده توده‌سنگ، در جدول ٤ درج شده است.

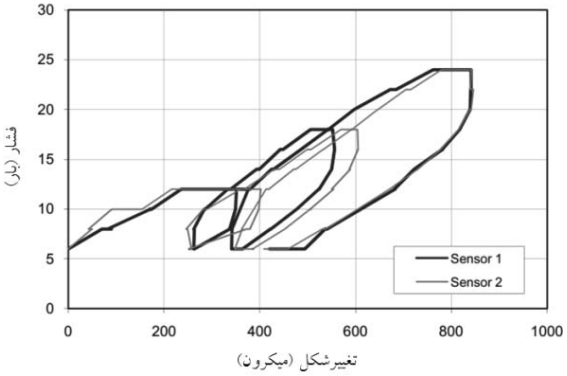
جدول ٤- نتایج مدول تغییرشکل‌پذیری کل بر اساس جنس سنگ بکر تشکیل دهنده توده‌سنگ

نوع سنگ	تعداد آزمایش	میانگین	حداقل	حداکثر
مارن و گلسنگ	٤	٤٦٠	٢٢٠	٧٦٠
سیلت‌استون	٣	٧٢٠	٣٦٠	١١٠٠
ماسه‌سنگ	٢	١١٥٠	٧١٠	١٦٠٠

با توجه به نتایج درج شده در جدول ٤ برای مدول تغییرشکل‌پذیری، می‌توان مشاهده نمود که سنگ‌های مقاوم‌تر دارای مدول تغییرشکل‌پذیری و به تبع آن صلبیت بالاتری می‌باشند.

٣-٧-رفتار وابسته به زمان

از دیگر نکات قابل توجه در نتایج آزمایش دیلاتومتری پروژه سد صفارود، وجود رفتار وابسته به زمان یا خزش در سنگ‌های مارن و مارن سیلت‌دار بود. با توجه به نمودار فشار- جابجایی نمایش داده شده در شکل ٥، می‌توان دید که حتی در پایان سیکل اول بارگذاری که فشار وارده ١٢ بار است، توده سنگ رفتار خزشی از خود نشان می‌دهد.



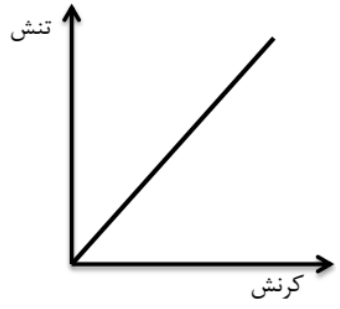
شکل ٥- نمودار فشار- جابجایی مقطع D1-1 در عمق ١٦/٥ متر

٣-٨- تفسیر نمودارهای تنش-کرنش

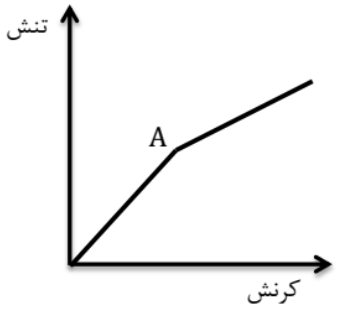
شکل منحنی تنش- کرنش (تنش- جابجایی) اطلاعات مهمی از رفتار تغییرشکل‌پذیری و ساختاری توده‌سنگ ارائه می‌دهد. شکل ٦ پوش منحنی تنش- کرنش توده‌های سنگی با رفتارهای مختلف را نشان می‌دهد. منحنی پوش نشان داده شده در شکل a-٦ توده‌سنگ با مقاومت و مدول تغییرشکل زیاد را نشان می‌دهد. این توده‌سنگ تحت بارگذاری چرخه‌ای، مشابه بارگذاری انجام شده در پروژه سد صفارود، دچار افت مقاومت نمی‌گردد. منحنی شکل b-٦ پوش ناپیوسته‌ای با نقطه A به عنوان نقطه محتمل شکست داخلی یا برش توده‌سنگ را نشان می‌دهد که مدول تغییرشکل به صورت قابل توجهی در آن نقطه کاهش می‌یابد. منحنی شکل c-٦ نشان دهنده انحراف پوش از حالت خطی می‌باشد که بیان کننده تغییرشکل‌های پلاستیک در توده‌سنگ است. برخی سنگ های دگرگونی مانند فیلیت و کوارتزیت (شکل d-٦)، دارای دو نقطه انحنا در A و B می‌باشند که این نقاط نشان دهنده حدود رفتار الاستیک در مراحل مختلف برای سنگ‌های دگرگونی پیچیده هستند.

شکل ٧ منحنی‌های تنش- جابجایی برای انواع مختلفی از توده‌های سنگی در بارگذاری چرخه‌ای را نشان می‌دهد. توده‌سنگ نوع ١ دارای کیفیت خوب، مدول دگرشکلی بالا و تغییرشکل ماندگار کم در باربرداری می‌باشد. در طی باربرداری هنگامی که بار با سرعت زیاد، بدون تناسب با سرعت کاهش جابجایی‌ها، کاهش می‌یابد، امکان ایجاد ناپیوستگی یا شکست‌های داخلی وجود دارد. توده سنگ نوع ٢ دارای مقاومت متوسط با پوش منحنی تنش- کرنش محدب- مقعر می‌باشد که نشان دهنده بهبود کیفیت توده‌سنگ بعد از اولین چرخه بارگذاری است. این نوع توده‌سنگ دارای مدول تغییرشکل متوسط می‌باشد. توده‌سنگ نوع ٣، سنگ با مقاومت پایین می‌باشد که دارای مدول تغییرشکل بسیار پایین است. این نوع سنگ دارای پوش تنش- جابجایی به شکل S خوابیده است که نشان دهنده فشردگی سنگ طی مراحل اولیه بارگذاری می‌باشد. این مرحله با رفتار خطی پوش منحنی تنش- جابجایی در محدوده بار متوسط دنبال می‌شود و در نهایت پوش مذکور

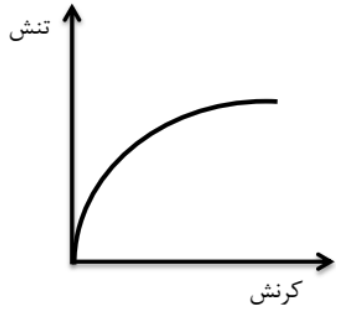
به شکل افقی در می‌آید که نشان دهنده شروع شکست توده‌سنگ مورد نظر است. این نوع توده‌سنگ تغییرشکل ماندگار قابل توجهی دارد. منحنی‌های باربرداری در این نوع سنگ، نشان دهنده بازیابی آهسته تغییرشکل‌های الاستیک است که بیان کننده حضور توده‌سنگ ناپیوسته یا شکست داخلی می‌باشد. این موضوع همچنین نشان دهنده این است که یک سری سطوح شکستگی داخلی بعد از تسلیم، دیگر رفتار الاستیک ندارند. سنگ نوع ٤ دارای پوش منحنی تنش- جابجایی مقعر می‌باشد که نشان دهنده بهبود رفتار تغییرشکل توده‌سنگ بعد از بارگذاری اولیه است. منحنی تنش- جابجایی سنگ نوع ٥ در ابتدا دارای شکل محدب و سپس خط مستقیم می‌باشد.



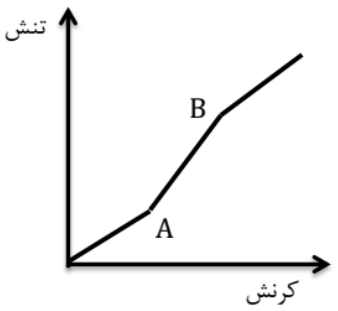
(a) رفتار خطی



(b) رفتار ناپیوسته



(c) رفتار پلاستیک



(d) دارای دو انحنا

شکل ٦- انواع پوش منحنی‌های تنش- کرنش

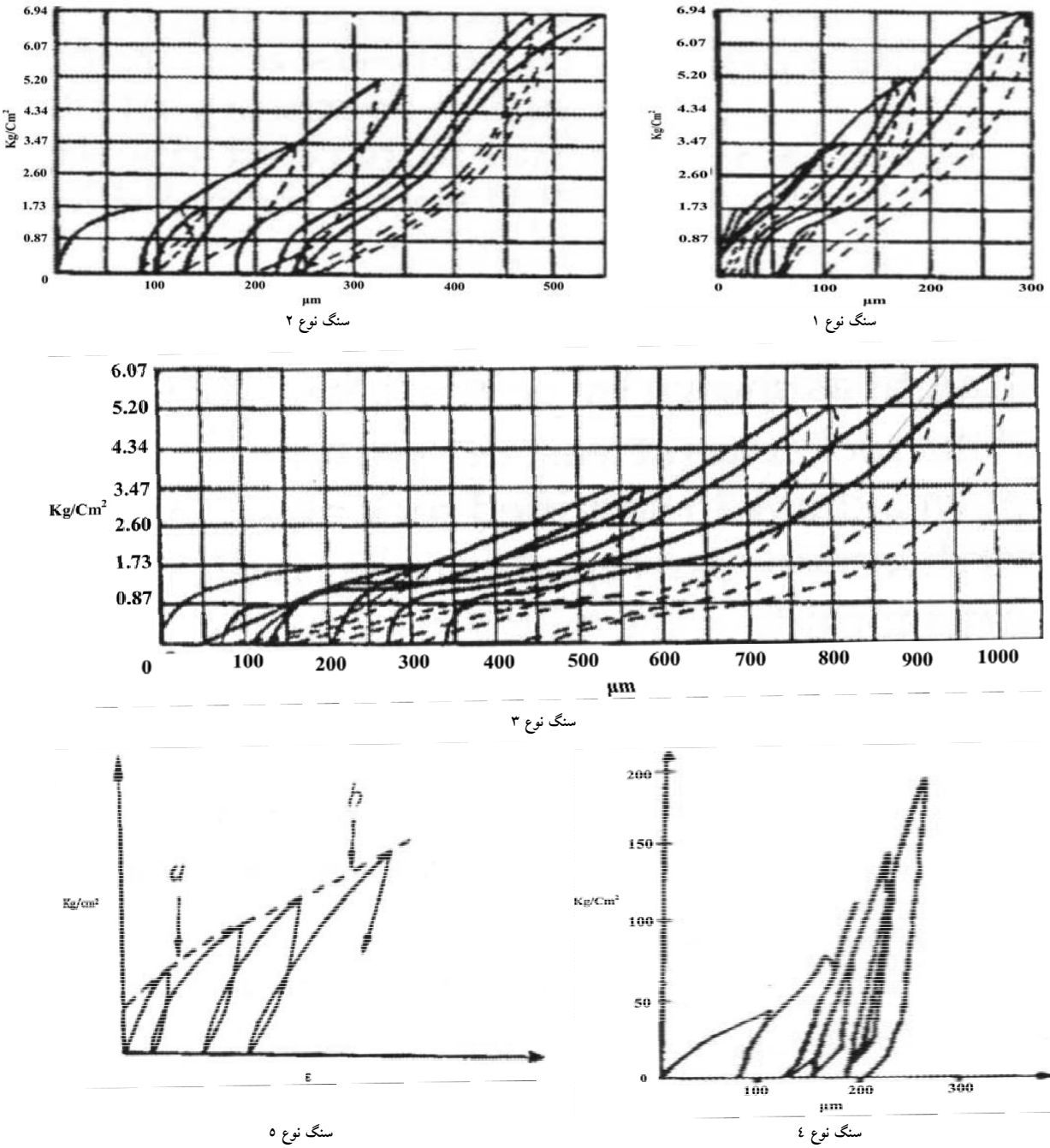
دو مورد از نمودارهای تنش- جابجایی مربوط به پروژه سد صفارود در شکل های ٨ و ٩ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن مطالب ذکر شده و با توجه به نمودارهای تنش و جابجایی نشان داده شده در شکل‌های ٨ و٩، توده‌سنگ مورد نظر در پروژه سد صفارود کرمان عمدتاً در محدوده گروه b و c قرار می‌گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت پارامتر مدول تغییرشکل در طراحی سازه‌های سنگی، تعیین این پارامتر در مکانیک سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به نقش ساختارهای زمین‌شناسی از جمله ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها، لایه بندی‌ها و ... در خصوصیات مکانیکی سنگ، آزمایش‌های برجا نسبت به آزمایش‌های آزمایشگاهی نمونه‌های فاقد ساختارهای

زمین‌شناسی، نتایج نزدیکتری به واقعیت دارند. در مقاله حاضر آزمایش دیلاتومتری مورد بررسی قرار گرفت. هر چند این آزمایش دارای معایبی از جمله محدوده تاثیر کم بار، لزوم تصحیح نتایج و ... می‌باشد، لیکن نتایج بهتری در مقایسه با نتایج آزمایش بر روی مغزه سنگ بدست می‌دهد.

مدول تغییرشکل توده‌سنگ خروجی آزمایش دیلاتومتری است که از آن به همراه شکل منحنی فشار- جابجایی حاصله از آزمایش، برای ارزیابی تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ استفاده می‌شود.

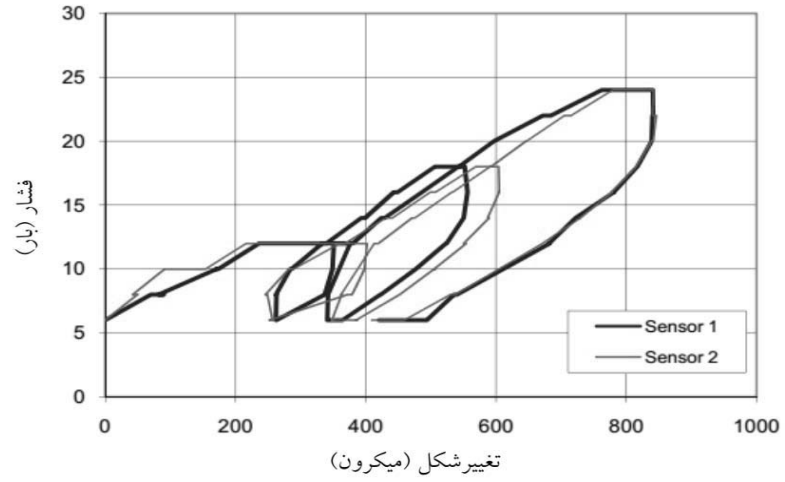


سنگ نوع ۱ — سنگ نوع ۲

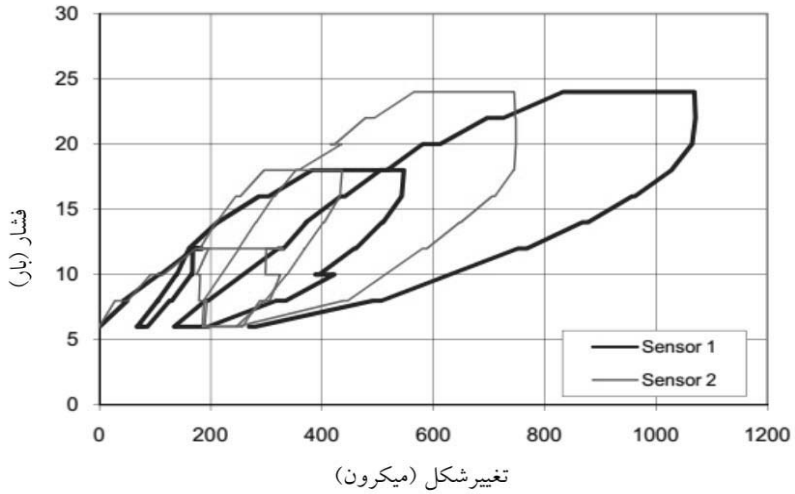
سنگ نوع ۳

سنگ نوع ٤ — سنگ نوع ٥

شکل ۷- منحنی تنش- کرنش برای انواع مختلف توده‌سنگ



شکل ۸- نمونه‌ای از نمودارهای تنش- جابجایی مربوط به پروژه سد صفارود



شکل ۹- نمونه‌ای از نمودارهای تنش- جابجایی مربوط به پروژه سد صفارود

۵- مراجع

1. C.Wyllie, D. (2005). Foundations on rock. Teylor & Francis.
2. Goodman, R. (1989). Introduction to rock mechanics. John wiley & sons.
3. ISRM. (1987). Suggested methods for deformability determination using a flexible dilatometer. International society for rock mechanics commition on testing methods, 123-134.
4. Palmström, A., & Singh, R. (2001). The deformation modulus of rock masses- comparisons between in situ tests and indirect estimates. Tunnelling and Underground Space Technology, 115-131.
5. R.N.Singh, A. (2006). Engineered Rock Structures in Mining and Civil Construction. AK Leiden: Taylor & Francis/Balkema.
6. Zhang, L. (2005). Engineering Properties of Rocks. Elsevier Science