

تخمین مدول دگرشکل پذیری توده سنگ با استفاده از تموگرافی لرزه‌ای

کامران گشتاسبی^{۱*}، وحید زارعی^۲، مهدی زورآبادی^۳

۱- دانشیار گروه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس، goshtasb@modares.ac.ir
۲- دانش آموخته مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس، zareivahid16@gmail.com
۳- دانش آموخته مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس، mehdizooabadi@yahoo.com

(دریافت ۲۵ دی ۱۳۸۹، پذیرش ۲۸ آبان ۱۳۹۱)

چکیده

تعیین مدول دگرشکل پذیری توده سنگ اهمیت بسیار زیادی در مکانیک سنگ و مهندسی سنگ دارد. روش‌های مستقیم و غیر مستقیمی برای تخمین مدول دگرشکل پذیری وجود دارد. تعیین این پارامتر با استفاده از روش‌های برجا (روش‌های مستقیم) نیازمند هزینه و مشکلات اجرایی است. به همین دلیل روش‌های غیر مستقیم تعیین مدول دگرشکل پذیری موضوع مورد علاقه مهندسان سنگ و زمین شناسان مهندسی است. به منظور ترسیم تصویری از زمین که تحت تأثیر امواج لرزه‌ای قرار گرفته است از توموگرافی اولین زمان رسید موج لرزه‌ای استفاده می‌شود. این روش به صورت گسترده‌ای در زمینه‌های زیادی از جمله مهندسی سنگ کاربرد پیدا کرده است. بر اساس مقایسه سرعت موج برشی (V_p) که از آزمایش توموگرافی لرزه‌ای به‌دست آمده و همچنین مقادیر مدول دگرشکل پذیری به‌دست آمده از روش بارگذاری صفحه‌ای که در ساختمان سد رودبار لرستان و بختیاری انجام شده اند، رابطه $E_m = e^{4.23 - (\frac{6.69}{V_p})}$ بین مدول دگر شکل پذیری و سرعت موج لرزه ای پیشنهاد شده است. این رابطه با دیگر روابط تجربی موجود مقایسه شده است، که کمترین مقدار خطا (RMSE) و بیشترین مقدار ضریب همبستگی برای رابطه پیشنهادی به‌دست آمده است.

کلمات کلیدی

مدول دگرشکل پذیری، روش های برجا، توموگرافی لرزه‌ای، سرعت موج لرزه ای (V_p)

۱- مقدمه

انجمن بین المللی مکانیک سنگ مدول دگرشکل پذیری توده سنگ را نسبت ما بین تنش اعمالی به مجموع کرنش های الاستیک و پلاستیک ناشی از آن تعریف کرده است [۱]. با توجه به اهمیت این پارامتر در طراحی سازه های سنگی و سازه هایی که روی سنگ بنا می شوند، روش های متعددی برای اندازه گیری و تخمین آن ارائه شده است. این روش ها در دو گروه کلی روش های مستقیم و غیرمستقیم قابل تقسیم بندی هستند [۲]. استفاده از روش های مستقیم اندازه گیری مدول دگرشکل پذیری (آزمایش های برجا) به دلیل هزینه ها و مشکلات اجرایی بالا فقط در پروژه های پراهمیت (سدهای بتنی بزرگ و سازه های سنگین) توجیه اقتصادی دارند. به همین علت در اکثر پروژه ها، روش های غیرمستقیم برای تخمین مدول دگرشکل پذیری توده سنگ مورد استفاده قرار می گیرند [۳]. در سالیان گذشته برای تخمین مدول دگرشکل پذیری به صورت غیر مستقیم بیشتر از سیستم های طبقه بندی توده سنگ استفاده شده است [۴-۱۲].

یکی از روش های بسیار دقیق مدل سازی در ژئوفیزیک روش تموگرافی لرزه ای^۱ است. با به کار بردن این تکنیک ما قادر به تصویرسازی از ساختارهای زیرسطحی براساس سرعت سیر یا دامنه امواج لرزه ای که از میان یک مقطع محصور مابین دو گالری، گمانه یا سطح زمین عبور می کند خواهیم بود [۱۳].

در این مقاله، با استفاده از مقادیر مدول دگرشکل پذیری (E_m) به دست آمده از آزمایش های بارگذاری صفحه ای انجام گرفته در گالری ها و مقادیر سرعت موج لرزه ای (V_p) به دست آمده از آزمایش های تموگرافی لرزه ای انجام گرفته در ساختمان سد رودبار لرستان و بختیاری رابطه ای برای تخمین مدول دگرشکل پذیری ارائه شده است. این رابطه با دو رابطه تجربی ارائه شده توسط بارتن و گروچیس [۱۴]، برای تخمین مدول دگرشکل پذیری توده سنگ بر اساس سرعت موج لرزه ای (V_p) مقایسه شده است که کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برای معادله پیشنهادی به دست آمده است.

۲- مناطق مورد مطالعه

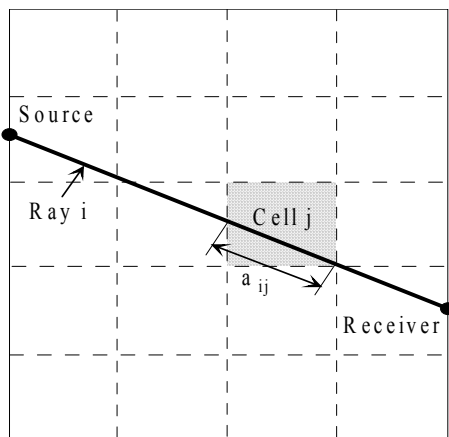
مناطق مورد بررسی در این مقاله ساختمان دو تا از سدهای در حال ساخت کشور هستند که آزمایش های برجای مکانیک سنگ و تموگرافی لرزه ای ژئوفیزیکی در آنها انجام گرفته است.

۲-۱- سد رودبار لرستان

سد رودبار لرستان بر روی رودخانه رودبار (از سرشاخه های رودخانه دز شرقی) و در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز در استان لرستان واقع شده است. مختصات جغرافیایی طرح در طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۴۱ دقیقه و ۳۷ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۵۴ دقیقه و ۲۳ ثانیه واقع گردیده است. دره محل سد دره ای تنگ با دیواره های بسیار پرشیب از جنس آهک های دولومیتی سازند دالان (پرمین پسین) است. به نظر می رسد که این آهک ها، بخش کربناتی بالای سازند دالان را تشکیل دهند. به سمت پایین رخنمون سازندهای جوان تری چون گرو و سروک را شاهد هستیم و به سمت بالادست و درون مخزن سازند دالان رخنمون دار بخش بزرگتر گستره طرح (شعاع ۱۰۰ کیلومتری پیرامون نقطه مرکزی) در واحد زمین ساختی زاگرس و قسمت کوچکتری از گستره طرح (شمال و شمال خاوری) در کمربند سنندج-سیرجان قرار دارد. به طور کلی سنگ های محدوده ساختمان سد از تنوع کمی دارند، و می توان آن ها را به آهک های دولومیتی تا دولومیت های آهکی همراه با آلتراسیون آهک مارنی، شیلی و مارنی تقسیم بندی کرد [۱۵].

۲-۲- سد بختیاری

ساختمان سد بختیاری در قسمت جنوب غربی ایران، در حدود ۷۰ کیلومتری شمال شرقی شهر اندیمشک و حدود ۶۵ کیلومتری جنوب غربی شهر درود لرستان قرار دارد. مختصات جغرافیایی طرح در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۶ دقیقه و ۵۰ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۵۷ دقیقه و ۴۱ ثانیه واقع شده است. از لحاظ تقسیمات زمین شناسی در پهنه زاگرس چین خورده واقع شده است و سازند سروک متعلق به کرتاسه اکثر سنگ های محدوده ساختمان را تشکیل می دهد. ساختمان سد بختیاری در تنگه ای که رودخانه بختیاری در امتداد عمود بر تاقدیس سیاه کوه بوجود آورده، در نظر گرفته شده است. از لحاظ تقسیمات زمین شناسی ساختمان این سد در زون زاگرس چین



شکل ۱: نمایش شماتیک توموگرافی شامل چشمه و گیرنده امواج لرزه ای سلول بندی مقطع و پرتو لرزه ای توموگرافی لرزه ای سد رودبار.

روش محاسباتی ساده شده مبتنی بر حل معادله ماتریسی زیر می باشد.

$$t_i = \sum_{j=1,2,\dots,m} a_{ij} \cdot x_j \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

که در آن a_{ij} عبارت از طول پرتو شماره i در پرتو شماره j امین سلول، x_j عکس سرعت موج ($1/v$) در j امین سلول و t_i زمان سیر i امین پرتو است. برای حل این معادله ماتریسی روش های مختلف مستقیم و معکوس وجود دارد که مرسوم ترین آن ها استفاده از الگوریتم تکرار حداقل مربعات است [۱۷].

۳-۲ آزمایش توموگرافی لرزه ای سد رودبار لرستان

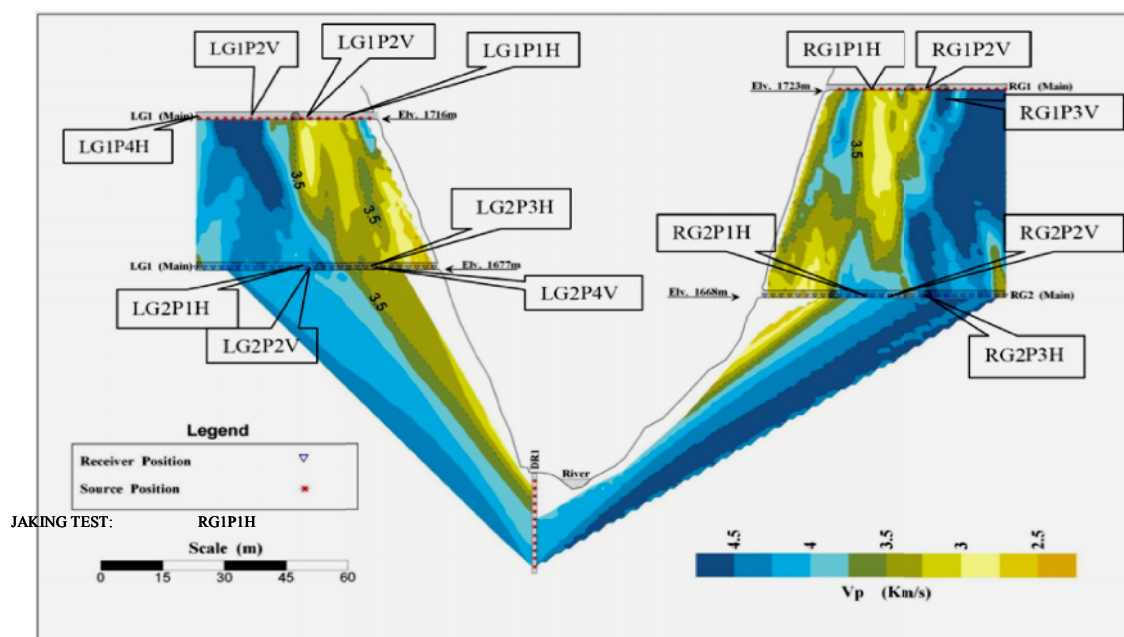
آزمایش های لرزه نگاری به روش توموگرافی لرزه ای در ساختگاه سد و نیروگاه رودبار لرستان به انجام رسیده است. در این آزمایش ها در مجموع تعداد ۵ مقطع توموگرافی لرزه ای به صورت گالری به گالری، گمانه به گالری و گمانه به گمانه متشکل از امواج P اجرا شده که تعداد دو مقطع در تکیه گاه چپ، دو مقطع در تکیه گاه راست و یک مقطع در محدوده نیروگاه واقع شده است. همان طور که در شکل ۲ دیده می شود مشخص است که با حرکت از انتهای گالری ها به سمت خروجی (سطح) کیفیت کلی توده سنگ کاهش می یابد. احتمالاً رخ دادن پدیده رهایی تنش (که نتیجه آن افزایش بازشدگی ناپیوستگی ها است) و افزایش میزان هوازدگی در توده سنگ های نزدیک دامنه ها، دلیل اصلی این کاهش کیفیت می باشد. همچنین بر اساس این نتایج در تکیه گاه سمت راست، توده سنگ های انتهای گالری ها کیفیت بالاتری را نشان می دهند.

خورده قرار دارد. ساختگاه سد به طور عمده بر روی سازند آهک سیلیسی سروک قرار گرفته است. مجموعه گروه سنگی که در ساختگاه و مخزن سد رخنمون دارند شامل آهک های ریز دانه تیره رنگ، که گاه با میان لایه های چرتی همراه می باشند [۱۶].

۳- آزمایش توموگرافی لرزه ای

در سالیان اخیر استفاده از روش های ژئوفیزیکی در مهندسی سنگ کاربرد زیادی پیدا کرده است. روش توموگرافی لرزه ای یکی از روش های بسیار دقیق ژئوفیزیکی است که برای مدل سازی زمین استفاده می شود. طرز کار این روش شبیه به اشعه X است، اشعه X از داخل بدن تصویر سازی می کند و توموگرافی با استفاده از امواج لرزه ای از داخل زمین تصویر سازی می کند [۱۷]. با استفاده از روش توموگرافی و کنار هم قرار دادن مقاطع بین گالری ۱ و گالری به سطح ۳ می توان سرعت توده سنگ (سرعت عبور موج لرزه ای در داخل توده سنگ) را در ساختگاه سد تصویر سازی کرد. در توموگرافی لرزه ای هدف تهیه یک نقشه دقیق از تغییرات سرعت زیر سطحی (سرعت عبور موج لرزه ای زیر سطح زمین) با استفاده از فرستنده ها و گیرنده های سطحی و زیر سطحی است [۱۸]. نتایج آزمایش ها بصورت مقاطع هم سرعت انتشار امواج لرزه ای ارائه شده است. از آنجا که سرعت انتشار امواج لرزه ای با کیفیت و سلامت توده سنگ ارتباط مستقیم دارد بنابراین نواحی با سرعت انتشار امواج لرزه ای پایین تر می تواند مبین مناطق با میزان خرد شدگی و درزه و شکاف بیشتر و یا وجود حفرات انحلالی بوده و نواحی با سرعت انتشار امواج لرزه ای بالاتر می تواند پیش بینی کننده وضعیت نسبی بهتری برای کیفیت توده سنگ باشد [۱۸]. امروزه این روش کاربرد گسترده ای در پروژه های عمرانی از قبیل تخمین پارامترهای سنگ، تغییرات لیتولوژیکی، تعیین نواحی متخلخل و خرد شده، شناسایی نواحی کارستیک و فضا های انحلالی، زون بندی کیفیت سنگ پس از انفجارات متوسط و بزرگ و تهیه نقشه استرس در سنگ را دارد [۱۹].

در این آزمایش زمان سیر موج (زمان اولین شکست موج) و مختصات مکانی چشمه ها و گیرنده های امواج به عنوان داده های اولیه در نظر گرفته می شود و مقطع تصویر شده نحوه توزیع سرعت را مشخص می کند (شکل ۱).



شکل ۲: آزمایش تموگرافی و مختصات آزمایش بارگذاری صفحه ای در ساختگاه سد رودبار لرستان

جدول ۱: گالری های ساختگاه سد بختیاری

گالری	میزان حفاری	آزموت	طول شاخه اصلی	طول شاخه فرعی
GL2	۶۹۵/۱۳	N-S	۵۱	۶۳
GL3	۷۷۹/۳۹	N-S	۸۲	۷۲
GR1	۵۵۸/۷۶	N097	۸۰	۹۱
GR2	۶۹۴/۴	N097	۹۶	۷۵
GR3	۷۵۳/۲۸	N121	۸۳	۳۴

در اینجا تموگرافی انجام شده بین گالری های GR2 با GR1 (شکل ۳) و GR2 با GR3 (شکل ۴) برای جناح راست و GL2 با GL3 برای جناح چپ (شکل ۵) نمایش داده شده است.

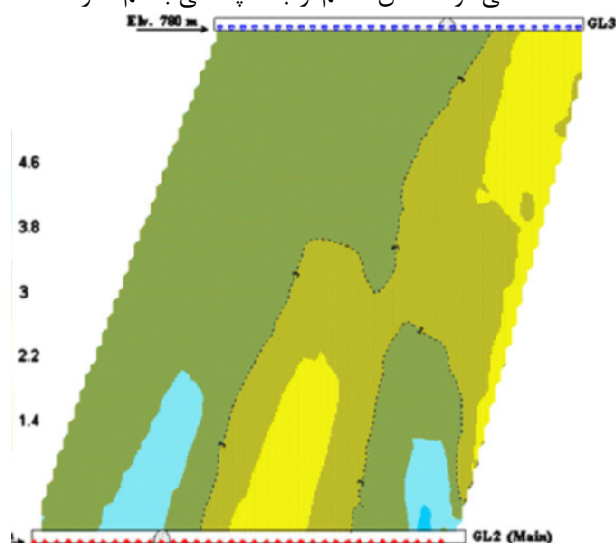
۳-۳ آزمایش تموگرافی لرزه ای سد بختیاری

در مجموع تعداد ۱۳ مقطع تموگرافی لرزه ای (۵ مقطع در تکیه گاه چپ و ۸ مقطع در تکیه گاه راست) در ساختگاه سد بختیاری اجرا شده است. ذکر این نکته بسیار حائز اهمیت است که مقاطع واقع مابین گالری های غیر همتراز وضعیت قائم نداشته و بصورت مایل با زوایای مختلف است. وجود این وضعیت باعث شده است که نتوان مانند سد رودبار تصویرسازی کاملی از سد بختیاری ارائه داد. در مجموع تغییرات سرعت موج لرزه ای بین محدوده ۱۵۰۰ تا ۴۰۰۰ متر بر ثانیه قرار دارد.

آزمایش های ژئوفیزیک سد بختیاری با استفاده از چشمه های انفجاری و ضربه ای آزمایش های تموگرافی موج لرزه ای با استفاده از دستگاه لرزه نگار ۲۴ کاناله TERRALOC MARK III با قابلیت فیلترینگ امواج و امکان ثبت نتایج بر روی دیسکت و گیرنده های ثبت امواج تراکمی با فرکانس طبیعی ۱۰ هرتز در هردو تکیه گاه چپ و راست انجام شده است. ۵ گالری ساختگاه این سد در جدول ۱ آورده شده است.

بالتر مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد و علاوه بر این نواحی با سرعت پایین نیز بین دو گالری وجود ندارد.

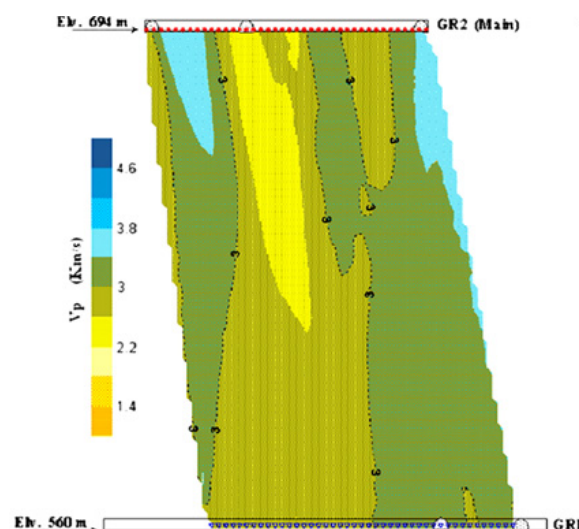
شکل ۵ تصویر توزیع سرعت بین دو گالری GL2-GL3 مربوط به جناح چپ ساختگاه را نشان می‌دهد. متوسط سرعت در این بخش حدود $2/4 \text{ (km/s)}$ است و در اغلب بخش‌های بین این دو گالری سرعت زیاد است و فقط در چند قسمت زون‌های کم سرعت مشاهده می‌شود که آن‌ها هم ارتباط چندانی با هم ندارند.



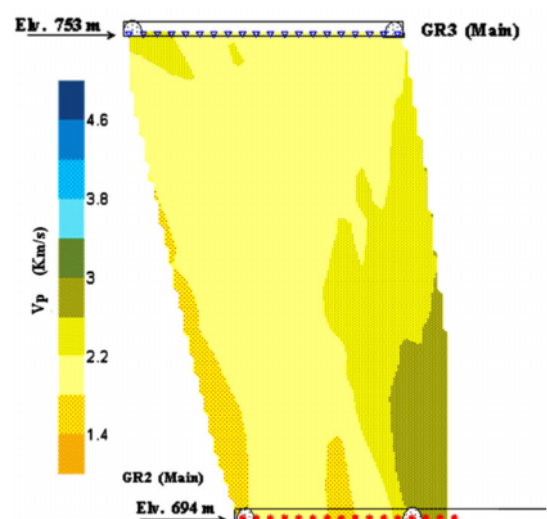
شکل ۵: تموگرافی گالری‌های جناح چپ

۴- آزمایش بارگذاری صفحه‌ای

بر اساس بررسی‌های پالمستروم و سپنگ اغلب آزمایش بارگذاری صفحه‌ای که با اکستنسومترهای درون گمان‌های اندازه‌گیری می‌شود، بهترین نتایج را ارائه می‌دهد [۱۱]. در این مقاله از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای استفاده شده است. برای هر کدام از آزمایش‌های پنج مرحله بارگذاری و باربرداری انجام شده است. مدول دگرشکل پذیری با استفاده از اکستنسومترها در ۶ نقطه در دو طرف توده سنگ اندازه‌گیری شده است. توپی آخر مرجع است و تغییرات بقیه توپی‌ها نسبت به آن اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۲ موقعیت ۱۴ آزمایش بارگذاری صفحه‌ای انجام گرفته در گالری‌های سد رودبار لرستان مشخص شده است. بارگذاری صفحه‌ای در مقیاس بزرگ و در گالری‌های سدهای رودبار لرستان و بختیاری با سازندهای مختلفی انجام شده است ولی با



شکل ۳: تموگرافی گالری‌های جناح راست، سمت راست (GR1-GR2)



شکل ۴: تموگرافی گالری‌های جناح راست، سمت چپ (GR2-GR3)

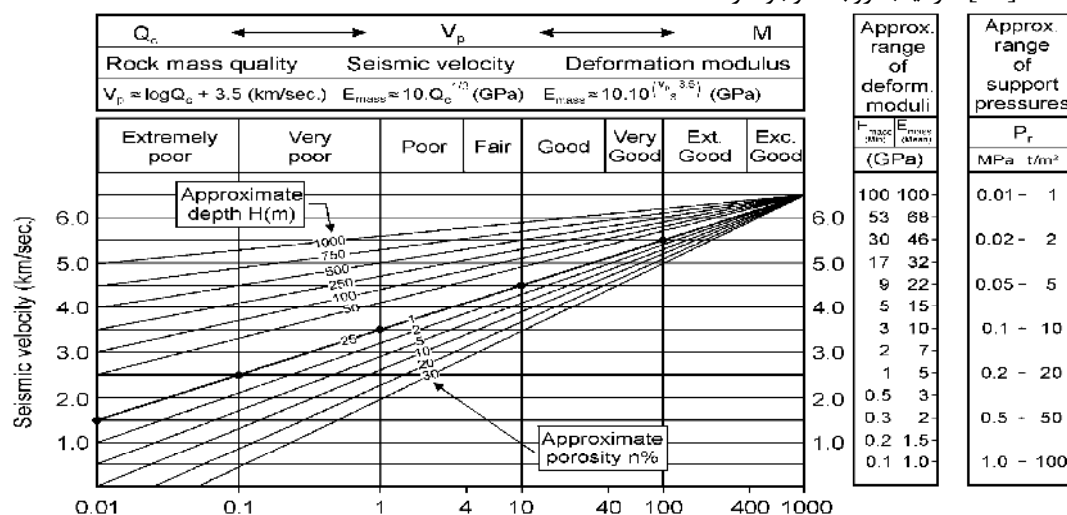
برای جناح راست گالری GR2 در افق ۶۹۴ متری و گالری GR3 در افق ۷۵۳ متری قرار گرفته است. متوسط بین دو گالری در حدود $2/3 \text{ (km/s)}$ به دست آمده و یک زون با سرعت پایین $1/8 \text{ (km/s)}$ در شکل دیده می‌شود که نشان‌دهنده حضور یک زون ضعیف در بین دو گالری است. به منظور بررسی گسترش احتمالی این زون در افق‌های پایین تر توموگرام سرعت بین دو گالری GR1-GR2 نیز مورد بررسی قرار گرفت. متوسط سرعت در این بخش حدود $3/2 \text{ (km/s)}$ می‌باشد که نسبت به افق‌های

بارتن رابطه ۲ را برای برآورد مدول دگرشکل پذیری (E_m) بر اساس سرعت موج لرزه ای P ، ارائه کرده است.

$$E_m = 10.10^{\left(\frac{V_p - 3.5}{3}\right)} = 10^{\left(\frac{V_p - 0.5}{3}\right)} \quad (2)$$

E_m بر حسب گیگا پاسکال (GPa) و V_p بر حسب کیلومتر بر ساعت (Km/h) است.

همچنین بارتن با تأثیر دادن تخلخل و عمق نمودار شکل ۶ را برای تخمین مدول دگرشکل پذیری ارائه نمود. در این نمودار با در اختیار داشتن سرعت موج لرزه ای و تأثیر دادن مقدار تخلخل و عمق می توان مدول دگرشکل پذیری توده سنگ را تخمین زد [۲۰].



$$Q_c = \left[\frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_u} \times \frac{J_w}{SRF} \right] \frac{\sigma_c}{100}$$

شکل ۶: تأثیر دادن عمق و تخلخل بر Q با V_p ، برای تخمین مدول دگرشکل پذیری [۲۰]

۶- رابطه مدول دگرشکل پذیری با سرعت موج لرزه ای

قبول و رد هر فرضیه آماری پارامتر Sig^0 برای هر معادله محاسبه می گردد. در صورتی که مقدار Sig از مقدار سطح اطمینان ۰/۰۵ کوچکتر باشد، آنالیز داده ها از نظر آماری با معنی است. در صورتی که چند مورد از روابط در سطح اطمینان Sig قرار بگیرد برای انتخاب بهترین رابطه از رابطه بین مدول دگرشکل پذیری و سرعت موج لرزه ای با روش تحلیل رگرسیون

توجه به سازند های ساختمانی هر دو سد نوع غالب سنگ های منطقه آهکی است.

۵- روابط تجربی موجود بین مدول دگرشکل پذیری و

سرعت موج طولی (V_p)

استفاده از سرعت امواج در آزمایشگاه بخصوص روش پالس التراسونیک^۴ برای اندازه گیری سرعت امواج فشاری و برشی و به دست آوردن پارامترهای الاستیک دینامیک سنگ بکاربرد زیادی پیدا کرده است. ولی استفاده از سرعت امواج در توده سنگ و برآورد پارامترهای توده سنگ کمتر مورد توجه قرار گرفته است. گروجیس (۱۹۸۷) و بارتن (۲۰۰۲) دو نفر از کسانی هستند که رابطه بین مدول دگرشکل پذیری و سرعت موج طولی را مورد بررسی قرار داده اند [۱۴]. در اینجا روابط موجود ارائه شده است.

گروجیس (۱۹۸۷) در گالری های ساختمانی سد مارتینچ با پی آهکی با استفاده از نتایج آزمایش های برجای بارگذاری صفحه ای و جک تخت که یک بخش مهمی از مراحل امکان سنجی مطالعات سد است، و ارتباط دادن آن ها با مقادیر V_p رابطه ۳ را ارائه داد [۱۸].

$$E_m = 9.1 + 4.8(V_p - 3.6) \quad (3)$$

است. آزمون F بر اساس نسبت بین مربع میانگین رگرسیون و مربع میانگین باقیمانده است [۲۱]. نتایج تحلیل های رگرسیون در جدول ۲ ارائه شده است.

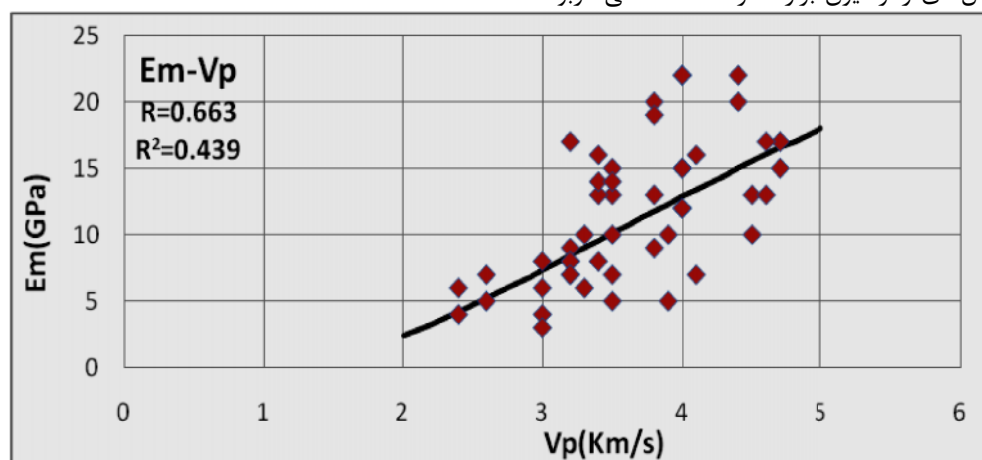
براساس مدل های ۱۰ گانه (جدول ۱) مورد تحلیل قرار گرفت، و معادله بهترین برازش و ضریب همبستگی برای هر رابطه تعیین شد. برای هر یک از توابع مذکور آزمون معنی داری با اطمینان ۹۵ درصد انجام گرفته است. در نرم افزار SPSS برای پارامتر F استفاده می شود و رابطه ای که مقدار F بالاتری دارد برازنده تر

جدول ۲: تحلیل رگرسیونی رابطه مدول دگرشکل پذیری با سرعت موج لرزه ای بر اساس توابع ۱۰ گانه

نوع رگرسیون	معادله	R	R ²	F	Sig	ثابت های معادلات			
						a	b ₁	b ₂	b ₃
خطی	$y = a + b_1x$	۰/۶۲۵	۰/۳۹۱	۲۹/۵۰۴	۰/۰۰۰	-۸/۴۸	۵/۵۲		
لگاریتمی	$y = a + b_1 \ln x$	۰/۶۳۱	۰/۳۹۸	۳۰/۳۹۰	۰/۰۰۰	-۱۳/۴۴	۱۹/۶۱		
معکوس	$y = a + \frac{b_1}{x}$	۰/۶۲۷	۰/۳۹۳	۲۹/۸۴۳	۰/۰۰۰	۳۰/۳۱	-۶۶/۱۷		
درجه ۲	$y = a + b_1x + b_2x^2$	۰/۶۳۴	۰/۴۰۲	۱۵/۱۱۸	۰/۰۰۰	-۲۵/۳۷	۱۵/۱۱	۱/۳۲	
درجه ۳	$y = a + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3$	۰/۶۳۶	۰/۴۰۴	۱۵/۲۳۳	۰/۰۰۰	-۲۱/۰۷	۱۰/۸۹	۰۰۰	۱/۱۳
مرکب	$y = ab_1^x$	۰/۶۵۰	۰/۴۲۲	۳۳/۶۳۱	۰/۰۰۰	۱/۴	۱/۷۳		
توانی	$y = ax^{b_1}$	۰/۶۶۱	۰/۴۳۷	۳۵/۶۶۳	۰/۰۰۰	۰/۸۴۱	۱/۹۷		
منحنی S	$y = e^{a + \frac{b_1}{x}}$	۰/۶۶۳	۰/۴۳۹	۳۶/۰۴۸	۰/۰۰۰	۴/۲۳	-۶/۶۹		
رشد	$y = e^{a+b_1x}$	۰/۶۵۰	۰/۴۲۲	۳۳/۶۳۱	۰/۰۰۰	۰/۳۴	۰/۵۵		
نمایی	$y = ae^{b_1x}$	۰/۶۵۰	۰/۴۲۲	۳۳/۶۳۱	۰/۰۰۰	۱/۴۰	۰/۵۵		

به مدل S برازش شده به نقاط مدول دگرشکل پذیری و سرعت موج لرزه ای در شکل ۷ نمایش داده شده است.

بر اساس جدول ۲ همه روابط ارائه شده برای مدل های مختلف در سطح معنی داری Sig قرار دارند. مقادیر R، R² و F برای منحنی S از بقیه مدل های رگرسیونی بالاتر می باشند. بنابراین مدل S از بقیه مدل های رگرسیون برازنده تر است. منحنی مربوط



شکل ۷: نمودار مدول دگرشکل پذیری (Em) - سرعت موج لرزه ای Vp

نمود. رابطه ارائه شده توسط بارتن بر روی توده سنگ های مختلفی انجام گرفته و رابطه کلی است، همچنین رابطه ای توسط گروچیس بر اساس آزمایشات بر روی ساختگاه سد یوگسلاوین که غالب سنگ های ساختگاه این سد آهکی است ارائه شده است. در شکل ۸ مقادیر مدول دگرشکل پذیری اندازه گیری شده به وسیله آزمایش بارگذاری صفحه ای و مقادیر تخمین زده شده باروابط ارائه شده در این تحقیق (معادله ۴)، رابطه بارتن (معادله ۲) و رابطه گروچیس (معادله ۳) در نقاط اندازه گیری آزمایش بارگذاری صفحه ای مربوط به سدهای رودبار لرستان و بختیاری مقایسه شده است.

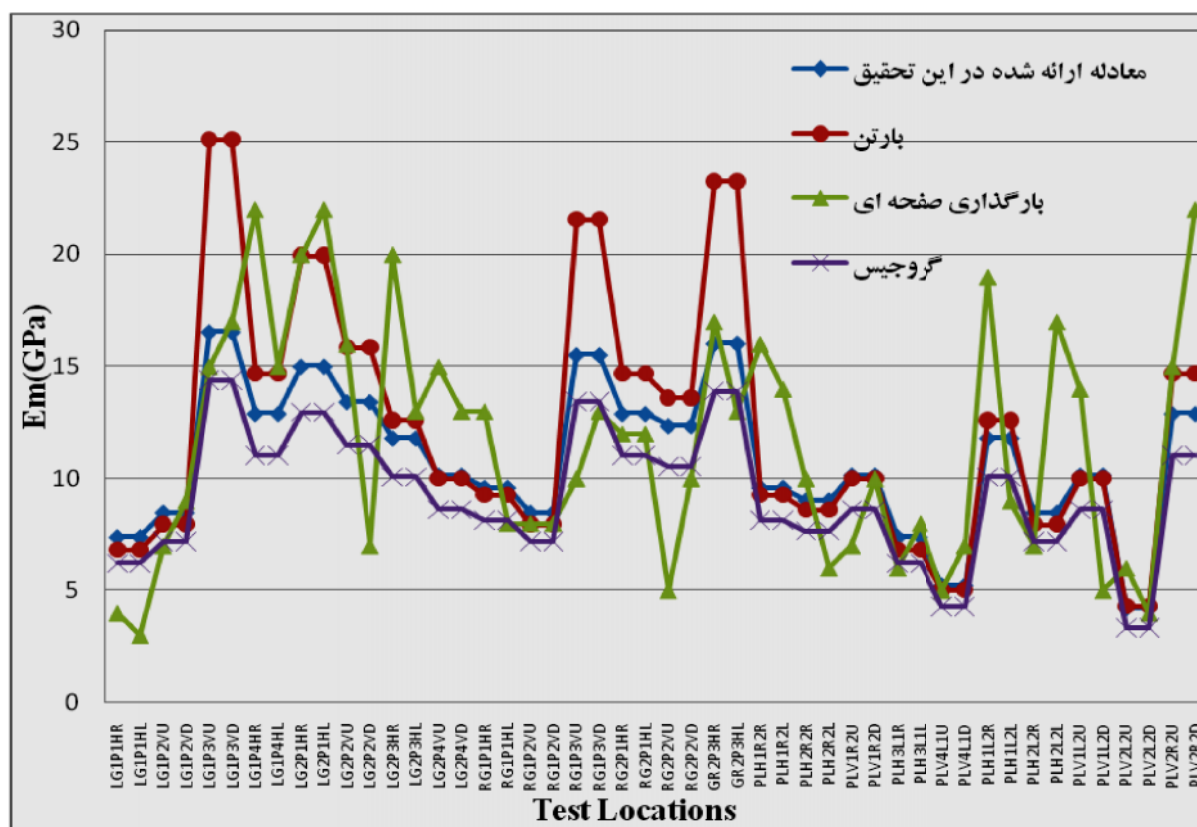
رابطه ۴ بهترین منحنی برازش شده به نقاط سرعت موج لرزه- V_p را برای شکل ۲ ارائه می دهد.

$$E_m = e^{4.23 - \left(\frac{6.69}{V_p}\right)} \quad (4)$$

سرعت موج لرزه ای V_p بر حسب کیلومتر بر ثانیه و مدول دگرشکل پذیری (E_m) بر حسب گیگاپاسکال است.

۷- مقایسه رابطه ارائه شده در این تحقیق با روابط موجود

برآورد مدول دگرشکل پذیری با استفاده از روش تموگرافی لرزه ای از روش های جدیدی است که می توان بارتن را به عنوان فردی که در این زمینه بیشترین تحقیقات را انجام داده معرفی



شکل ۸: مقایسه مدول دگرشکل پذیری محاسبه شده و اندازه گیری شده در این تحقیق با معادلات قبلی بر اساس V_p

به سرعت های پایین موج طولی است. در این شکل مقادیر مربوط به مدول حاصل از آزمایش صحرایی تغییرات سریع تری را دارند و در بازه بیشتری تغییرات دارند. در جدول ۳ مقادیر ریشه میانگین مربعات خطاها (RMSE) برای هر معادله نسبت به مقادیر واقعی

شکل ۸ نشان می دهد که مقادیر مدول ارائه شده توسط رابطه این تحقیق بین مقادیر بارتن و گروچیس قرار دارد، که نزدیکی بیشتری به مقادیر گروچیس دارد. در بعضی از نقاط مقادیر مربوط به هر سه رابطه به هم خیلی نزدیک هستند، که این نقاط مربوط

جدول ۳: ریشه میانگین مربعات خطا برای معادلات ارائه شده بر

اساس V_p

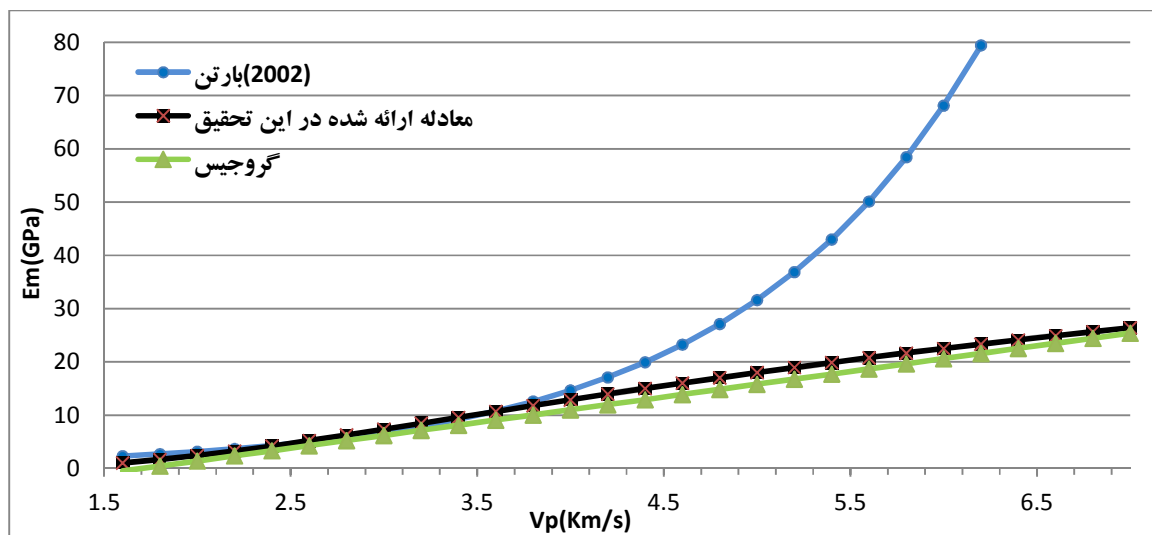
معادله	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)
بارتن	۵/۰۲۴
گروجیس	۴/۷۱۲
معادله ارائه شده در این تحقیق	۴/۱۳۳

به دست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای آورده شده است. ریشه میانگین مربعات خطا از رابطه ۵ محاسبه می شود [۲۲].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i')^2} \quad (5)$$

y_i مقادیر واقعی و y_i' مقادیر تخمین زده شده است.

بر اساس جدول ۳ کمترین مقدار خطا مربوط به رابطه ارائه شده در این تحقیق می باشد. مقایسه‌ای بین روابط در محدوده سرعت موج طولی بین ۱/۵ تا ۶٫۵ کیلومتر بر ثانیه در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹- مقایسه رابطه ارائه شده در این تحقیق با معادلات قبلی بر اساس V_p

- نتایج تخمین زده شده در این تحقیق بر اساس آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای که از بهترین آزمایش‌های اندازه‌گیری مدول دگرشکل‌پذیری است، و از ارتباط دادن نتایج این آزمایش در ساختگاه دو سد رودبار لرستان و بختیاری با نتایج آزمایش تموگرافی لرزه‌ای موج P به دست آمده است.
- در تموگرافی ساختگاه مناطق مورد مطالعه در حالت کلی، با حرکت از سطوح آزاد به سمت داخل توده سنگ‌های ساختگاه

همانطور که در شکل ۹ مشخص می‌باشد، منحنی رابطه این تحقیق و رابطه گروجیس بسیار نزدیک به هم هستند که علت آن می‌تواند نوع توده سنگ آهکی مشابه به هم در مناطق مورد مطالعه هر دو رابطه باشد.

۸- نتایج

نتایج زیر بر اساس این تحقیق ارائه شده است.

- [10] Read SAL, Richards LR, Perrin ND. 1999. "Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks". In: Vouille G, Berest P, editors. Proceedings of the ninety international congress on rock mechanics, Paris, August, vol. 2; p. 655-60.
- [11] Palmstrom, A. and Singh, R. (2001). "Deformation Modulus of Rock Masses- Comparisons between in Situ Tests and Indirect Estimates". Tunneling and underground space technology, Vol.16, P: 115-131.
- [12] Kayabasi A, Gokceoglu C, Ercanoglu M. (2003). "Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study". Int J Rock Mech Min Sci; Vol 40(1):P.55-63.
- [13] Wong J. (1995) "Cross-hole seismic tomography across a masonry dam". In: Proceedings of the SPIE nondestructive evaluation of aging structures and dams; 2457:58-66.
- [14] Barton, N., (2007). "Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation And Anisotropy". London, UK, Taylor & Francis Group
- [15] Iran Water and Power Resources Development Co (IWPC) Authority, (2006). "Geology report of Roudbar-Lorestan dam and hydropower plant".
- [16] Iran Water and Power Resources Development Co (IWPC) Authority, (2006). "Geology report of Bakhteyari dam and hydropower plant".
- [17] Takahishi T, Takeuchi T, Sassa K. (2006). "ISRM suggested methods for borehole geophysics in rock engineering". Int J Rock Mech Min Sci; 43:337-68.
- [18] Fernandez A, Santamarina JC.(2003) "Design criteria for geotomographic field studies". Geotech Test J; Vol 26: P.410-20.
- [19] Nicksiar M., Esfandiary M., Mehinrad A., Binazadeh K.;(2007); "Application of seismic tomography for detecting potential seepage paths in Bakhteyari Dam, Iran", Int J Rock Mech Mining Sci
- [20] Barton N. (2002). "Some new Q value correlations to assist in site characterisation and tunnel design". Int J Rock Mech Min Sci. Vol; 39:P.185-216.
- [21] Momeni, M. (2007). "Statistical analysis using SPSS". Ketab Noor publication.
- [22] SPSS 10.0.1. (1999). "Statistical analysis software (Standard Version)". SPSS Inc

¹ Seismic Tomography

² Crosshole

³ Downhole

⁴ Ultrasonic Pulse Method

⁵ Significant

فرض معنی داری: در مورد قبول و یا رد فرض در سطح معناداری مورد نظر به طور مثال سطح معناداری ۹۵ درصد می توان از پارامتر Sig استفاده نمود و مقدار Sig را با مقدار پیش فرض مقایسه کرد. و رابطه بدست آمده را رد یا قبول کرد.

سدها سرعت موج افزایش می یابد که دلیل بر بسته شدن درزه و ترک ها و افزایش کیفیت توده سنگ باشد.

• رابطه جدیدی بین مدول دگرشکل پذیری و سرعت موج لرزه ای ارائه شده که مقدار ریشه میانگین مربعات خطاها RMSE کمتری نسبت به روابط دیگر دارد.

• رابطه ارائه شده در این تحقیق مقادیر نزدیکی به رابطه گروچیس را ارائه می دهد که می تواند علت آن نزدیک بودن نوع توده سنگ آهکی مورد مطالعه هر دو رابطه است.

• به علت اینکه رابطه ارائه شده در این تحقیق محدود به تعداد داده و نوع توده سنگ است برای استفاده از این رابطه در جاهای دیگر باید همراه با قضاوت مهندسی به کار گرفته شود.

منابع

- [1] ISRM (1981). "ISRM Suggested method: Rock Characterization, Testing and Monitoring". In: Brown ET, editor. London: Pergamum Press,.
- [2] Unal, E. (1997). "Determination of in situ deformation modulus: New approaches for Plate-Loading Tests", Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. Vol.34: 6, P.897-915.
- [3] Hoek E., Diederichs M.S.(2007) "Empirical estimation of rock mass modulus". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Vol. 39. P.70-83
- [4] Bieniawski ZT. (1978). "determining rock mass deformability: experience from case histories". Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr; Vol.15:P.237-47.
- [5] Barton N, Loset F, Lien R, Lunde J. (1980). "Application of the Q -system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations". Int Conf Subsurface Space, Rockstore, Stockholm, Subsurface Space Vol; 2:P.553-61.
- [6] Serafim JL, Pereira JP, 1983. "Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski. In: Proceedings of the symposium on engineering" geology and underground openings. Portugal: Lisboa; p. 1133-44.
- [7] Nicholson GA, Bieniawski ZT. (1990). "A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification". Int J Min Geol Eng; Vol.8:P181-202.
- [8] Mitri HS, Edrissi R, Henning J.(1994). "Finite element modeling of cablebolted slopes in hard rock ground mines. Presented at the SME Annual Meeting". New Mexico: Albuquerque; p. 94-116.
- [9] Hoek E, Brown ET. (1997). "Practical estimates of rock mass strength". Int J Rock Mech Min Sci. Vol; 34(8):P1165-86.