

تخمین کیفیت سنگ‌های آهکی مقاطعی از سلسله جبال زاگرس با استفاده از سرعت موج لرزه‌ای

مهدی تلخابلو^۱، مهدی کیانپور^۲ و سیدمحمود فاطمی‌عقدا^{۳*}

^۱استادیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
^۲دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
^۳استاد، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۱۲

چکیده

در این مطالعه کارایی روش ژئوفیزیکی سرعت عبور موج فشاری (Vp) برای پیش‌بینی کیفیت توده سنگ‌های آهکی در مناطقی از رشته کوه‌های زاگرس مورد بررسی قرار گرفته است. جهت طبقه‌بندی کیفی توده سنگ‌های آهکی از شاخص طبقه‌بندی Q و شاخص طبقه‌بندی اصلاح شده آن برای توده سنگ‌های رسوبی (Q_{sm}) استفاده شده است. بدین منظور داده‌های مربوط به Q، Vp و Q_{sm} از محل ساختگاه سدهای کارون ۲، کارون ۴، خرسان ۳ و سد تنگ معشوره استخراج گردید و با استفاده از روش‌های درون‌یابی در نرم‌افزار ArcGIS، لایه‌های اطلاعاتی از Q_{sm}، Vp و Q، به دست آمد. با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون ساده و چندمتغیره بر روی داده‌های استخراج شده از لایه‌های اطلاعاتی و استفاده از اصول منطق فازی (FIS)، مدل‌هایی جهت پیش‌بینی Q و Q_{sm} در توده سنگ‌های آهکی ارائه شده است. برای ارزیابی دقت مدل‌های به دست آمده، علاوه بر ضریب R²، شاخص‌های عملکرد (VAF) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد: از آنجا که شاخص Q_{sm} طیف گسترده‌تری از خواص توده سنگ را در نظر می‌گیرد، پیش‌بینی شاخص Q_{sm} با استفاده از Vp نسبت به پیش‌بینی شاخص Q، به واقعیت نزدیک‌تر است.

کلیدواژه‌ها: شاخص کیفیت توده سنگ رسوبی، توده سنگ آهکی، روش‌های ژئوفیزیکی، روابط آماری، اصول منطق فازی.

*نویسنده مسئول: سیدمحمود فاطمی‌عقدا

E-mail: fatemi@khu.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

یکی از اولین شاخص‌های طبقه‌بندی توده سنگ، شاخص کیفیت توده سنگ (RQD) است (Deere, 1963). بعدها محققین مختلف طبقه‌بندی‌هایی نظیر رده‌بندی توده سنگ RMR (Bieniawski, 1973) و شاخص طبقه‌بندی Q (Barton et al., 1974) نیز ارائه دادند که علاوه بر RQD، دیگر خصوصیات توده سنگ مانند مقاومت، شرایط ناپیوستگی‌ها، شرایط تنش منطقه و اثرات آب زیرزمینی نیز در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق ضمن بررسی مدل‌هایی جهت پیش‌بینی Q در توده سنگ‌های آهکی، بر روی شاخص طبقه‌بندی توده سنگ‌های رسوبی (Q_{sm}) تأکید شده است. طبقه‌بندی Q_{sm} در واقع اصلاح شده طبقه‌بندی Q در سنگ‌های رسوبی بوده و دارای چهار مشخصه دیگر شامل T، V، RS و S است (Carrozzo et al., 2008؛ رابطه ۱):

$$Q_{SM} = RQD/J_n \times J_r/J_a \times J_w/SRF \times R_g/S \times T/V$$

$$Q_{SM} = RQD/J_n \times J_r/J_a \times J_w/SRF \times R_g/S \times T/V$$

که در آن Rs بیانگر وضعیت لایه‌بندی سنگ، S معرف شیب لایه‌ها، T معرف بافت توده سنگ و میزان همسان بودن آن و V بیانگر وجود حفره و تخلخل موجود در توده سنگ است.

از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم کیفیت توده سنگ در عمق زمین نیازمند حفاری و مطالعات گسترده است، لذا جهت پیش‌بینی کیفیت توده سنگ روش‌های غیر مستقیم ژئوفیزیکی از قبیل روش‌های اندازه‌گیری سرعت امواج فشاری (Vp) و مقاومت الکتریکی (ER) کاربردهای زیادی در زمین‌شناسی مهندسی و مهندسی ژئوتکنیک پیدا کرده‌اند (Rudman et al., 1975). سرعت عبور موج و مقاومت الکتریکی تا حد زیادی به خواص توده سنگ وابسته هستند و در حال حاضر به عنوان روش‌های استاندارد در مطالعات ژئوفیزیکی تلقی می‌شوند (Jongmans et al., 2000; Havenith et al., 2002; Lapenna et al., 2003). ارتباط بین Vp و ER با ویژگی‌های توده سنگ توسط محققین مختلف به خوبی اثبات

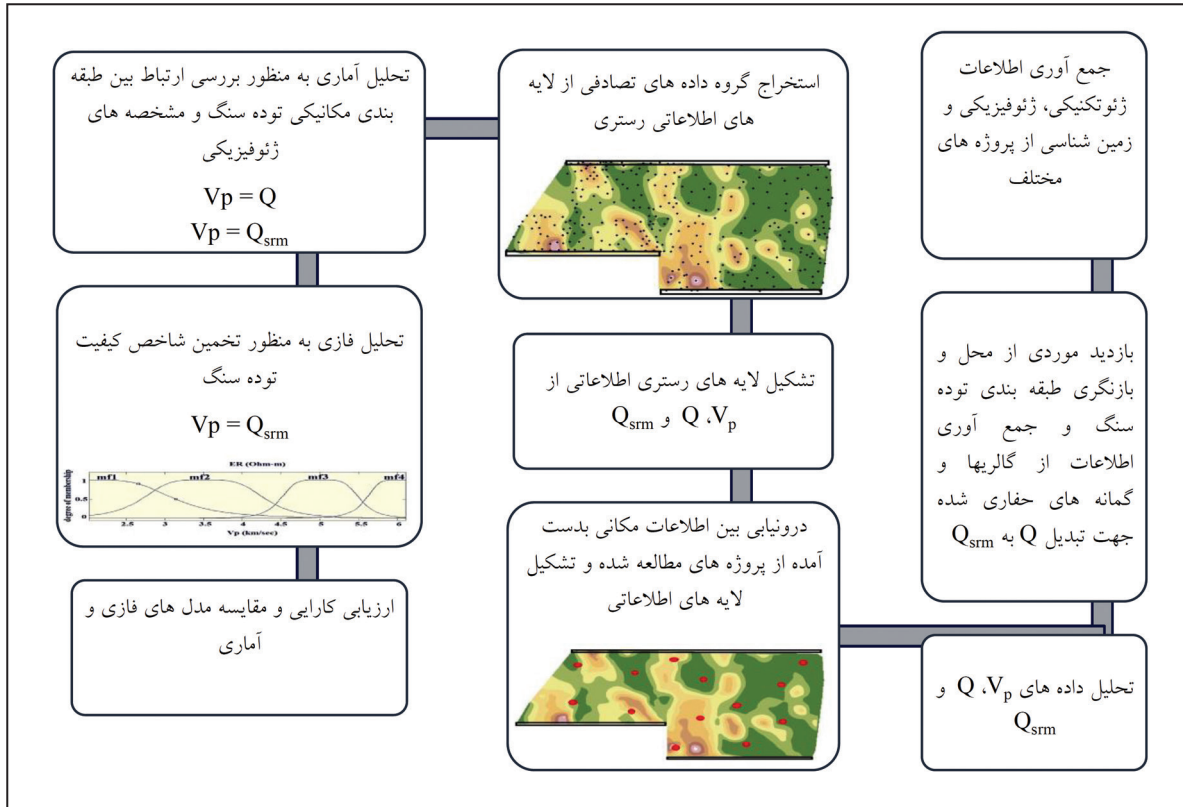
شده است (Leucci and Giorgi, 2006; Barton, 2007; Kearey et al., 2013; Azwin et al., 2015; Hemmati Nourani et al., 2017; Costamagna et al., 2018) که در این مطالعات بسیاری از مشخصه‌هایی را که ممکن است بر گسترش امواج ژئوفیزیکی و خواص توده سنگ اثرگذار باشند از قبیل نوع سنگ، کانی‌شناسی، اندازه دانه‌های تشکیل دهنده، اثر تغییرات عمق و ترکیب روش‌های ژئوفیزیکی مورد بررسی قرار گرفته و بعضاً برای افزایش کارایی مدل‌ها، از روش‌های عددی، تحلیل فازی و شبکه عصبی استفاده شده است. با وجود همه تحقیقات صورت گرفته در گذشته، ارزیابی کیفیت توده سنگ با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی هنوز هم یکی از پیچیده‌ترین فرآیندها در تلفیق علم ژئوفیزیک و زمین‌شناسی مهندسی است و مدل‌های بدست آمده جهت پیش‌بینی کیفیت توده سنگ، عمدتاً مدل‌های تجربی یا ریاضی بوده و از آنجا که داده‌های مورد استفاده مربوط به مطالعات موردی و مناطق محدود است، امکان تعمیم مدل‌های ارائه شده به مناطق مختلف وجود ندارد و این موضوع باعث دشواری استفاده از مدل‌های قبلی می‌شود. علاوه بر آن طبقه‌بندی Q_{sm} تاکنون در پروژه‌های عمرانی و سازندهای زمین‌شناسی ایران مورد نقد و بررسی قرار نگرفته است و صرفنظر از نوع سنگ، صرفاً از روش‌های متداول طبقه‌بندی Q و RMR استفاده شده است که این موضوع، ضرورت تحقیق بر روی کارایی شاخص Q_{sm} را نشان می‌دهد.

۲- روش کلی تحقیق

به منظور بررسی ارتباط بین Q، Vp و Q_{sm} در توده سنگ‌های آهکی مناطقی از رشته کوه‌های زاگرس، داده‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی از گالری‌ها و گمانه‌های حفر شده در ساختگاه سدهای خرسان ۳، کارون ۲، کارون ۴ و تنگ معشوره جمع‌آوری و با استفاده از روش‌های درون‌یابی در نرم‌افزار ArcGIS 10.3.1، لایه‌های اطلاعاتی سه بعدی از Q، Vp و Q_{sm} تهیه گردید. در مرحله بعد از لایه‌های اطلاعاتی حدود ۱۲۰۰ گروه داده مکانی نقطه‌ای (هر گروه داده شامل مشخصه‌های Q، Vp و Q_{sm} به‌طور تصادفی استخراج گردید و با استفاده از روش‌های رگرسیون چندمتغیره و

قابل توجهی داشته باشند و مدل‌های فعلی به دست آمده می‌تواند برای هر ناحیه‌ای با تشکیلات زمین‌شناسی مشابه نیز مورد استفاده قرار گیرد. در شکل ۱ فرآیند تحقیق و بدست آوردن روابط بین سرعت موج و طبقه‌بندی توده‌سنگ‌های آهکی مورد مطالعه نشان داده شده است.

منطق فازی بر روی داده‌های نقطه‌ای به دست آمده، مدل‌هایی جهت پیش‌بینی Q_{srm} در توده‌سنگ‌های آهکی ارائه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد روش‌های ژئوفیزیکی در مواردی که امکان مطالعات ژئوتکنیکی وجود نداشته باشد، می‌تواند در پیش‌بینی کیفیت توده‌سنگ‌های آهکی بخصوص تخمین شاخص Q_{srm} کارایی



شکل ۱ - فرآیند تحقیق و به دست آوردن روابط بین سرعت موج و طبقه‌بندی توده‌سنگ‌های آهکی مورد مطالعه.

۳- زمین‌شناسی عمومی مناطق مورد مطالعه

مناطق اصلی مورد مطالعه در این تحقیق، توده‌سنگ‌های آهکی در ساختگاه سد‌های کارون ۲، کارون ۴، خرسان ۳ و سد تنگ معشوره هستند. سد‌های کارون ۲ و ۴ بر روی رودخانه کارون قرار دارند که این رودخانه از کوه‌های زردکوه در دامنه جنوب غربی زاگرس منشأ می‌گیرد (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۰). سد خرسان ۳ بر روی رودخانه خرسان و در ۵۰ کیلومتری جنوب غرب لرندگان در بخش شرقی رشته کوه‌های زاگرس قرار گرفته است (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۹ الف). سد تنگ معشوره نیز بر روی رودخانه کشکان، یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه کرخه و در فاصله ۹۰ کیلومتری غرب شهر خرم‌آباد واقع شده است (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۹ ب). از نظر زمین‌شناسی، ساختگاه کلیه پروژه‌های مورد مطالعه بر روی سنگ‌های آهکی رشته‌کوه‌های زاگرس واقع شده است. واحد ساختمانی زاگرس چین‌خورده در جنوب غربی ایران واقع بوده و پهنای آن در حدود ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر تخمین زده می‌شود. روند عمومی این منطقه تقریباً شمال غربی- جنوب شرقی است و در آن رسوبات پالئوزوئیک، مزوزوئیک، و تشریری بطور هم شیب روی هم قرار دارند. در بین سازندهای مختلف در منطقه زاگرس، سنگ‌های آهک آسماری با ویژگی‌های نسبتاً منحصر به فرد مانند سختی و مورفولوژی، سنگ پی مناسب برای سد‌ها در محدوده زاگرس هستند و در مقاطع پروژه‌های کارون ۲ و ۴ و خرسان ۳ مورد مطالعه قرار گرفته است. سن این سازند اواخر اولیگوسن (رویلیان، میوسن (بوردیگالین) می‌باشد (Alavi, 2004). این سازند به سه بخش بر اساس مشخصات توده سنگ تقسیم می‌شود (Koleini, 2012).

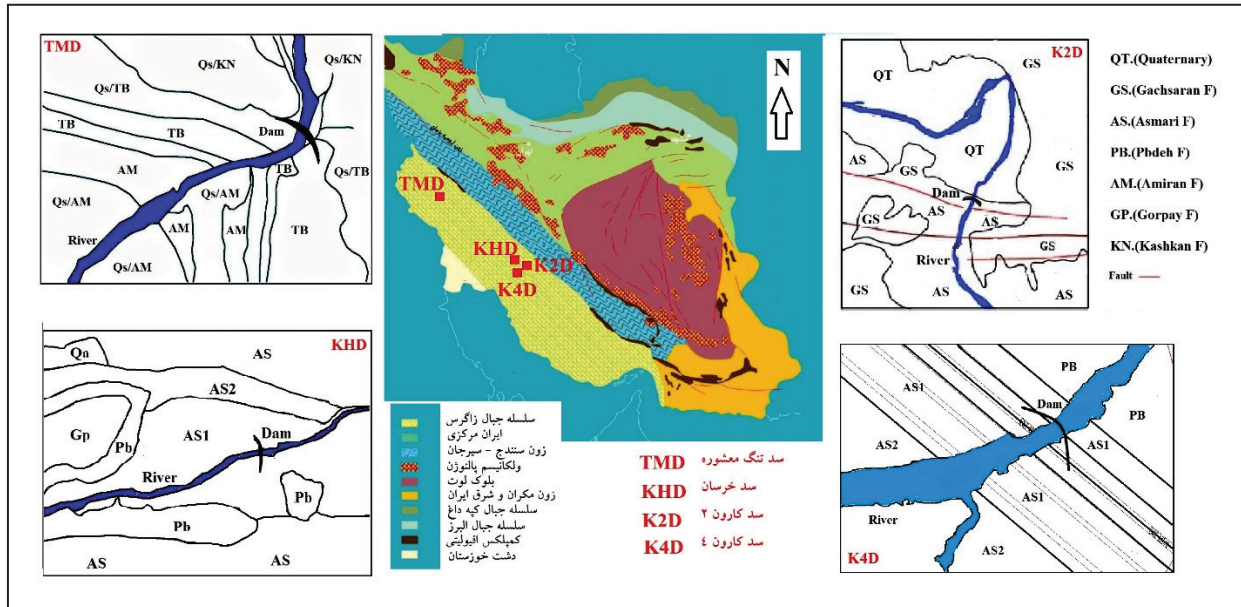
- بخش آسماری بالایی (AS.3): متشکل از سنگ آهک متوسط تا نازک، آهک

متبور، فسیل و سنگ آهک مارنی.

- بخش آسماری میانی (AS.2): شامل سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی.

- بخش آسماری زیرین (AS.1): از سنگ آهک مارنی متوسط و ضخیم لایه و سنگ آهک میکرو کریستالی.

علاوه بر آن سازندهای گورپی، تارور و پابده در بخش‌های مختلف مقاطع مورد مطالعه مشاهده شد که شامل آهک، آهک دولومیتی و آهک مارنی هستند و بخش‌های غیر آهکی عمدتاً سازندهای امیران، کشکان، آفاجاری و گچساران هستند (درویش‌زاده، ۱۳۷۱). سازند گورپی به سن کامپانین بوده و شامل دو بخش آهک امام حسن و بخش آهک لوفادار متشکل از آهک‌های مارنی سفید رنگ تشکیل شده و مقطع نمونه آن در تنگ امام حسن شامل ۱۱۴ متر لایه‌های رسوبی به ضخامت ۳۰ الی ۴۰ سانتی‌متر آهک مارنی تیره رنگ با تناوب لایه‌های مارنی است. سازند تارور از آهک‌های خاکستری تیره ضخیم لایه تا توده‌ای دارای تعداد زیادی سنگواره صدف‌ها، فسیل رودیست، نرم‌تنان و خرده جلبک تشکیل شده است. ضخامت این سازند در مقطع نمونه ۵۲۷ متر است. همبری زیرین آن با سازند گورپی است، اما در لرستان گاهی بر روی سازند امیران مانند ساختگاه سد تنگ معشوره واقع شده است (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۹ ب). سازند پابده در مقاطع سد کارون ۳ و متشکل از سنگ‌های آهکی، آهک مارنی و مارن است که با یک ناپوستگی فرسایشی از سازند گورپی تفکیک شده است. سن سازند پابده را ائوسن-پالئوسن برآورد نموده‌اند (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۷). در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی ساختگاه پروژه‌های کارون ۲، کارون ۴، خرسان ۳ و تنگ معشوره نشان داده شده است.



شکل ۲- زمین‌شناسی ساختگاه پروژه‌های سد و نیروگاه کارون ۲، کارون ۴، خراسان ۳ و تنگ معشوره (جمع آوری شده از گزارش‌های شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۷۸، ۱۳۸۹ الف و ب و ۱۳۹۱ و شرکت سایبر، ۱۳۸۵).

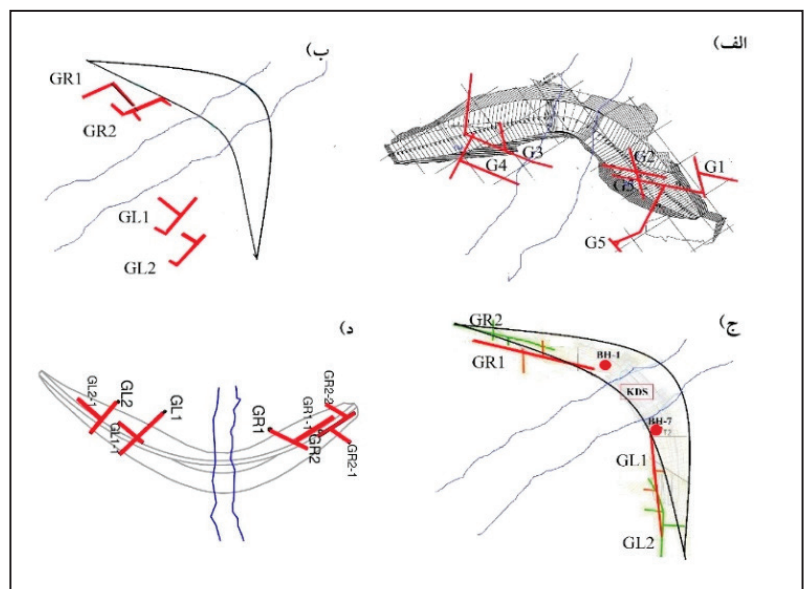
۴- استخراج داده‌ها و نتایج اولیه

در جدول ۱ و مقادیر Q و Q_{sm} محاسبه شده در شکل ۴ نشان داده شده است. مقادیر Q بدست آمده نشان‌دهنده کیفیت به شدت ضعیف تا کیفیت بسیار خوب و مقادیر Q_{sm} نشان‌دهنده کیفیت بسیار ضعیف تا کیفیت مناسب توده سنگ‌های آهکی مورد مطالعه هستند. با استفاده از روش‌های درونیابی (Interpolation) در نرم‌افزار ArcGIS 10.3.1، داده‌های ژئوفیزیک و ژئوتکنیکی در مقاطع مورد مطالعه به لایه‌های اطلاعاتی سه بعدی از مشخصه‌های Q ، Vp و Q_{sm} تبدیل گردید. در شکل‌های ۵ تا ۹ لایه‌های اطلاعاتی Q ، Vp و Q_{sm} در مقاطع مورد مطالعه، نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد؛ مناطق با سرعت موج پایین‌تر از ۳ و شاخص Q_{sm} کمتر از ۳، عمدتاً زون‌های خرد شده، گسل خرد یا آهک‌های انحلال یافته هستند و در سایر مقاطع، درزه‌ها و ناپوستگی‌های توده‌سنگ عامل اصلی اثرگذار بر مقادیر Vp و Q_{sm} هستند.

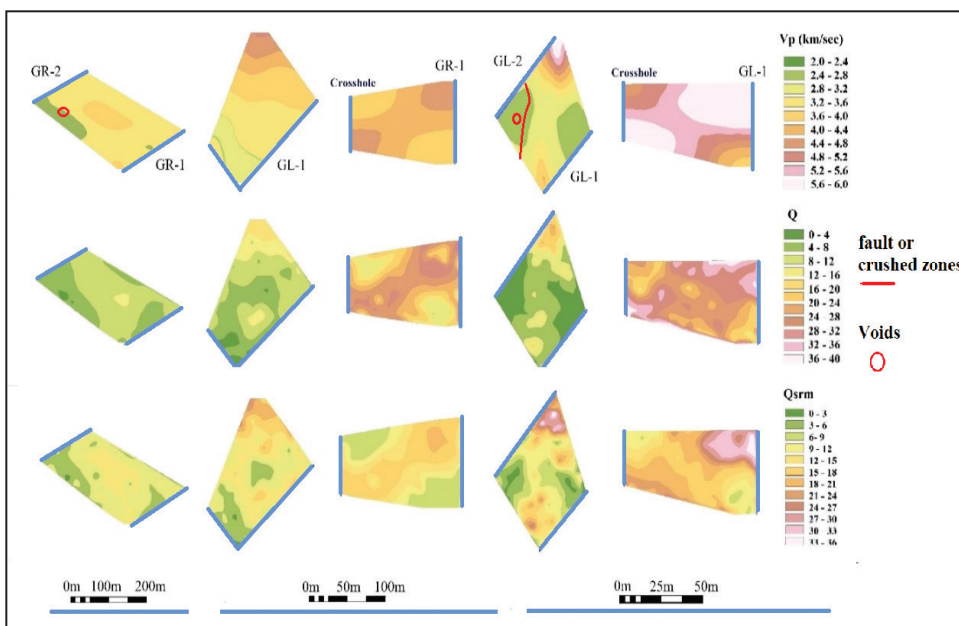
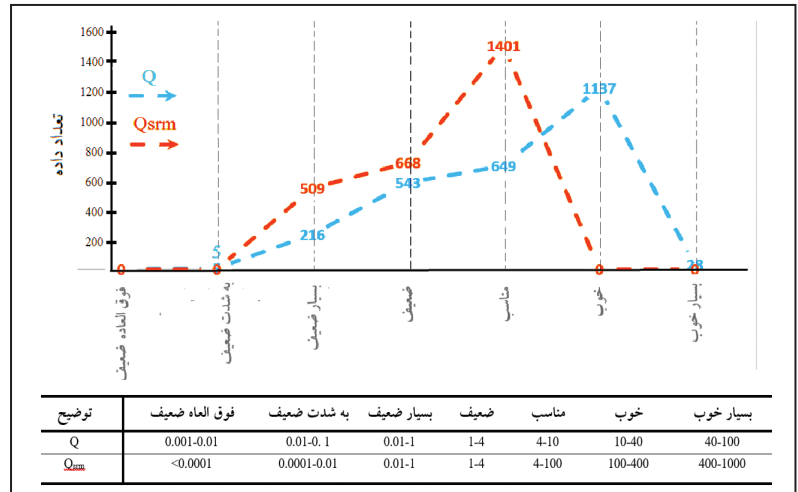
در پروژه‌های مورد مطالعه، عملیات ژئوفیزیکی با روش توموگرافی سرعت موج P در محل تونل‌های اکتشافی و برخی گمانه‌های حفر شده در ساختگاه سدها انجام شده است. هدف اصلی تحقیقات ژئوفیزیکی در این پروژه‌ها بررسی کیفیت توده سنگ در محل تکیه‌گاه سدها و بررسی حضور توده سنگ‌های ضعیف احتمالی، شناسایی ناهنجاری‌ها مانند زون‌های خرد شده و حفرات بوده است. در شکل ۳ محل گالری‌ها و گمانه‌های حفاری شده جهت انجام توموگرافی لرزه‌ای نشان داده شده است.

جهت استفاده از شاخص‌های طبقه‌بندی Q و Q_{sm} در توده سنگ‌های مورد مطالعه، ضمن بازدید صحرایی و جمع‌آوری اطلاعات، علاوه بر شاخص طبقه‌بندی Q ، با بررسی ۴ مشخصه S ، T ، R_s و V ، شاخص Q_{sm} نیز در مقاطع مختلف محاسبه گردید. محدوده تغییرات مشخصه‌های مربوط به توده‌سنگ‌های آهکی مورد مطالعه

شکل ۳- گالری‌ها و گمانه‌های توموگرافی لرزه‌ای در محل الف) کارون ۴؛ ب) تنگ معشوره؛ ج) کارون ۲ و د) خراسان ۳ (جمع‌آوری شده از گزارش‌های شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۷۸، ۱۳۸۹، ۱۳۹۱ و شرکت سایبر، ۱۳۸۵).

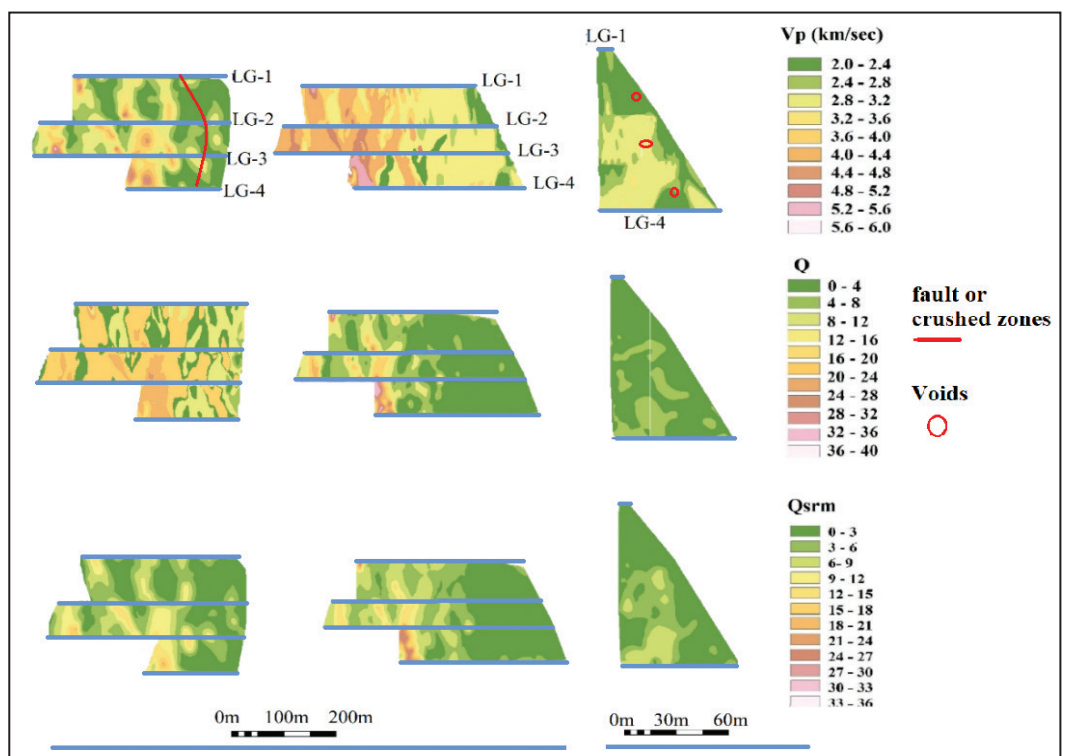


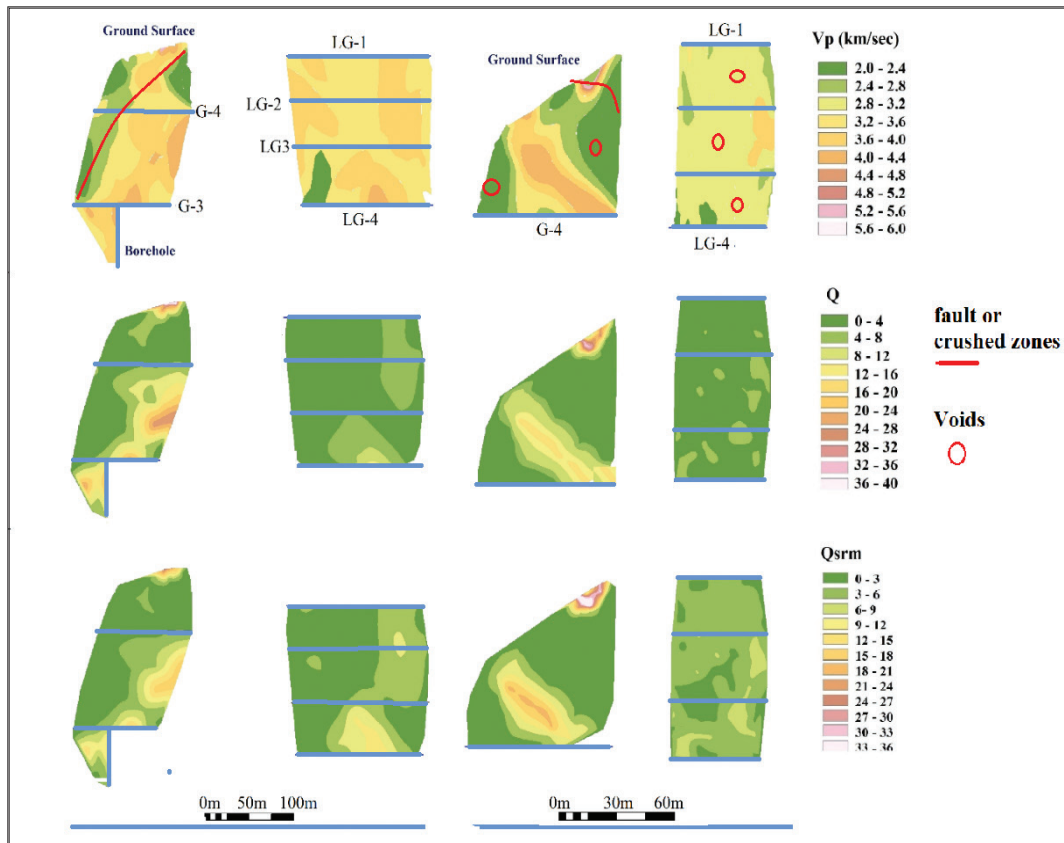
شکل ۴- طبقه‌بندی Q و Q_{srm} توده‌سنگ‌های آهکی مورد مطالعه.



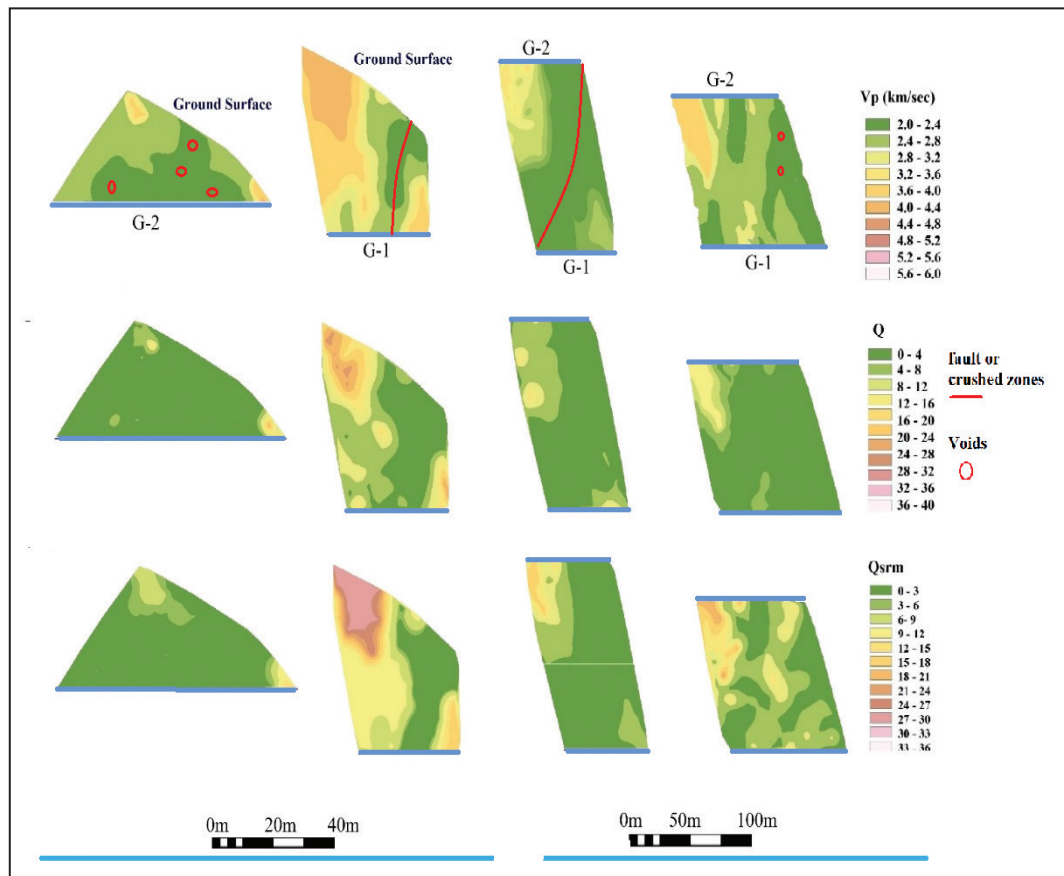
شکل ۵- لایه‌های اطلاعاتی Q ، Q_{srm} و V_p در مقاطع توموگرافی لرزه‌ای ساختمان سد تنگ معشوره (تهیه شده با روش درون‌یابی در نرم‌افزار GIS).

شکل ۶- لایه‌های اطلاعاتی Q ، V_p و Q_{srm} در مقاطع توموگرافی لرزه‌ای ساختمان سد کارون ۴ (تهیه شده با روش درون‌یابی در نرم‌افزار GIS).

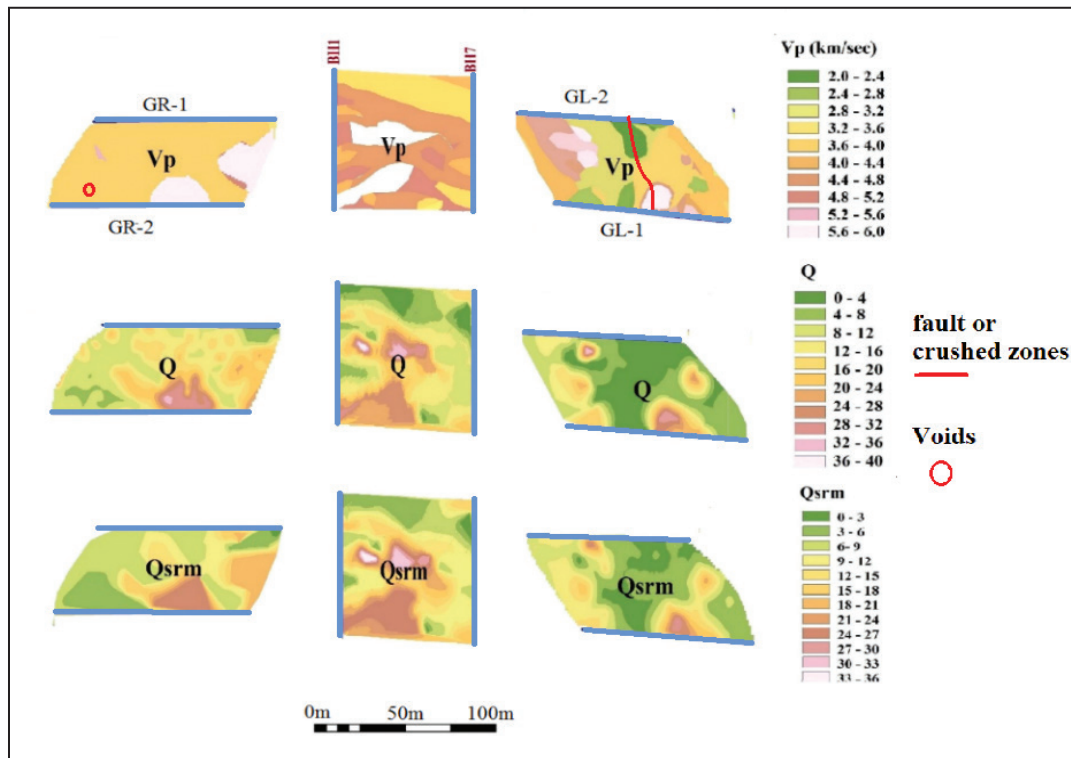




شکل ۷- لایه‌های اطلاعاتی V_p ، Q و Q_{srm} در مقاطع توموگرافی لرزه‌ای ساختمان سد کارون ۴ (تهیه شده با روش درون‌یابی در نرم‌افزار GIS).



شکل ۸- لایه‌های اطلاعاتی V_p و Q_{srm} و Q در مقاطع توموگرافی لرزه‌ای ساختمان سد خرسان ۳ (تهیه شده با روش درون‌یابی در نرم‌افزار GIS).


 شکل ۹ - لایه‌های اطلاعاتی Q، Vp و Q_{srn} در مقاطع توموگرافی لرزه‌ای ساختگاه سد کارون ۲ (تهیه شده با روش درون‌یابی در نرم‌افزار GIS).

جدول ۱- محدوده تغییرات خصوصیات توده سنگ‌های مورد مطالعه.

مشخصه توده سنگ	V	T	S	R _s	SRF	J _w	J _a	J _r	J _n	RQD %
محدوده تغییرات	۰/۵-۳	۰/۵-۵	۰/۵-۵	۰/۵-۱	۱-۱۰	۰/۱-۱	۱-۱۲	۰/۵-۳	۱۵-۹	۹۰-۶
میانگین	۲	۴/۱	۳/۲	۰/۷۵	۷/۵	۵/۳	۷/۴	۲/۲	۱۱	۵۴

۵- تحلیل آماری و بررسی روابط موجود بین Q، Vp و Q_{srn}

با استفاده از روش‌های استخراج اطلاعات مکانی چندگانه از لایه‌های اطلاعاتی (Extract Multi values to points) در نرم‌افزار ArcGIS، حدود ۱۲۰۰ گروه داده مکانی از کلیه لایه‌های اطلاعاتی بدست آمده در پروژه‌های مورد مطالعه، استخراج گردید که هر گروه داده شامل اطلاعات مکانی Q، Vp و Q_{srn} است. سپس با استفاده از روش‌های آماری، روابط موجود بین داده‌های Q و Q_{srn} (متغیرهای وابسته) با Vp (متغیر مستقل) بررسی گردید. مطابق شکل ۱۰، روابطی منطقی بین Vp و شاخص‌های Q و Q_{srn} وجود دارد و شاخص Q_{srn} همبستگی بهتری با Vp نشان می‌دهد. رابطه‌های ۲ و ۳، به ترتیب روابط بدست آمده جهت تخمین Q و Q_{srn} با استفاده از Vp بر اساس داده‌های استخراج شده از کلیه پروژه‌ها هستند. مشخص است که رابطه بین Q_{srn} با Vp (R² = 0.65) همبستگی بهتری نسبت به رابطه بین Q و Vp (R² = 0.46) نشان می‌دهد:

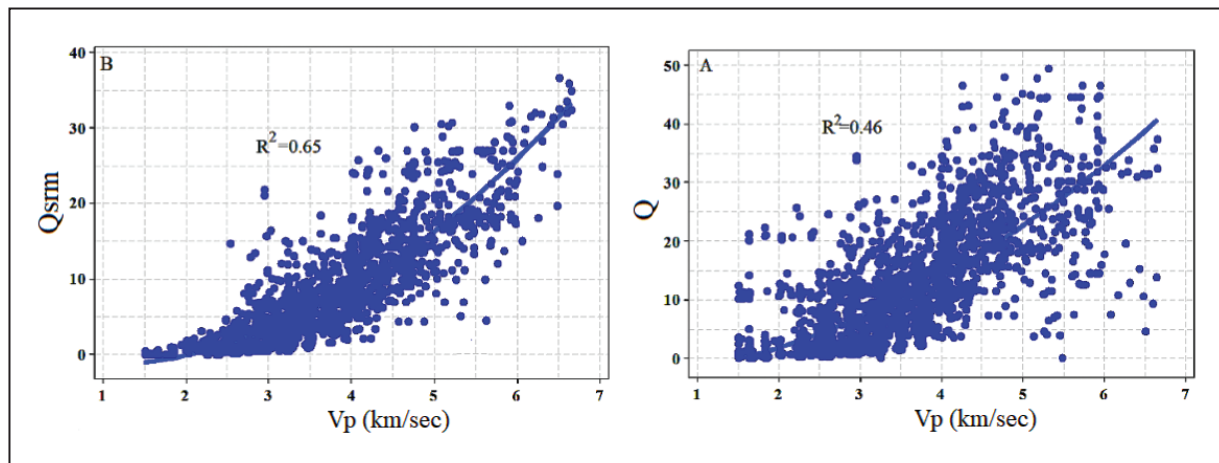
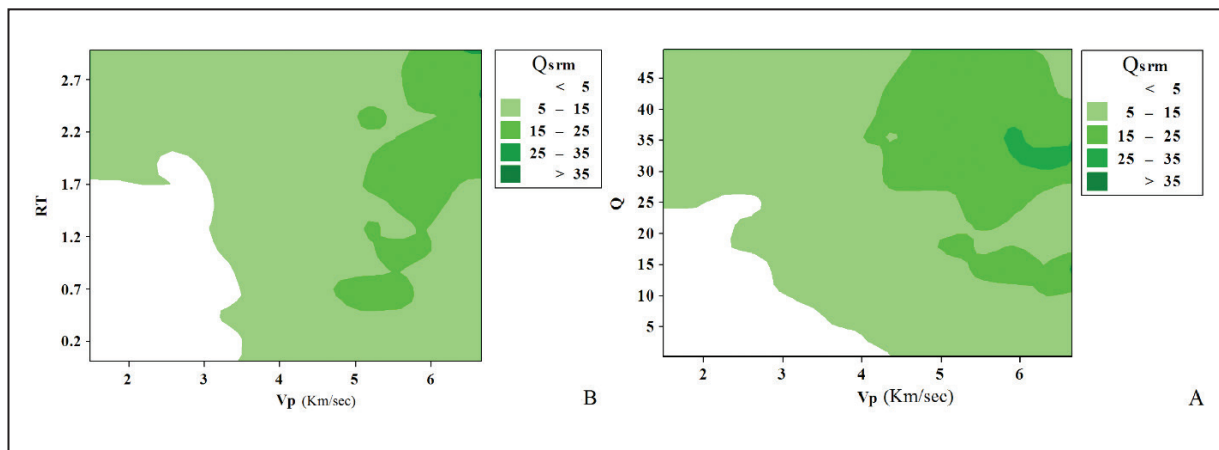
$$Q = -3.5581.028 + Vp + 0.843 \times Vp^2 \quad R^2 = 0.46 \quad (2)$$

$$Q_{srn} = -0.506 - 1.83 \times Vp + 1.39 \times Vp^2 \quad R^2 = 0.65 \quad (3)$$

مشخصه $R_s/S \times T/V$ یا R_s (RT) عامل اصلی اثرگذار بر همبستگی بهتر Q_{srn} با Vp در نظر گرفته می‌شود. رابطه ۴ از تحلیل آماری چندمتغیره بر روی داده‌های RT و Vp (متغیرهای مستقل) و شاخص Q_{srn} (متغیر وابسته) بدست آمده است. افزایش ضریب همبستگی در این رابطه به ۰/۷۴ اثر مشخصه RT بر بهبود رابطه ۳ را به وضوح نشان می‌دهد. به منظور درک بهتر اثر مشخصه RT، در شکل ۱۱ نقشه کنتور بین

۶- تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از اصول منطق فازی

به طور کلی تجزیه و تحلیل خصوصیات مکانیکی مربوط به توده سنگ بسیار پیچیده است و تعیین ویژگی‌های مکانیکی توده‌های سنگی همواره با درصد زیادی از عدم اطمینان و ابهام همراه است. به همین دلیل، در سال‌های گذشته کاربرد مدل‌های فازی (Zadeh, 1973) در مکانیک سنگ و زمین‌شناسی مهندسی افزایش یافته و بسیاری از خصوصیات مبهم، به عنوان مجموعه‌های فازی بیان شدند. اولین مطالعات برای استفاده از تئوری منطق فازی در طبقه‌بندی مهندسی سنگ توسط Nguyen and Ashworth (1985) برای طبقه‌بندی شاخص‌های RMR و Q مورد استفاده قرار گرفت. بعدها Juang and Lee (1990) تئوری مجموعه فازی را برای طبقه‌بندی RMR به کار بردند. تحقیقات متعدد دیگر در خصوص استفاده از منطق فازی در زمین‌شناسی مهندسی و مکانیک سنگ توسط مطالعات متعدد تکمیل شده بر اساس برخی از داده‌های مبهم به عنوان ورودی FIS جهت دستیابی به نتایج قابل اعتماد، انجام شده است (Gokceoglu et al. 2004; Ghasemi et al., 2011 and 2012; Jalalifar et al., 2014; Mosadeghi et al., 2015; Feizi et al. 2017).


 شکل ۱۰- رابطه بین: Q و Vp (A) و Q_{srm} و Vp (B).

 شکل ۱۱- نقشه کنتور بین: Q_{srm} با Vp و Q (A) و Q_{srm} با Vp و RT (B).

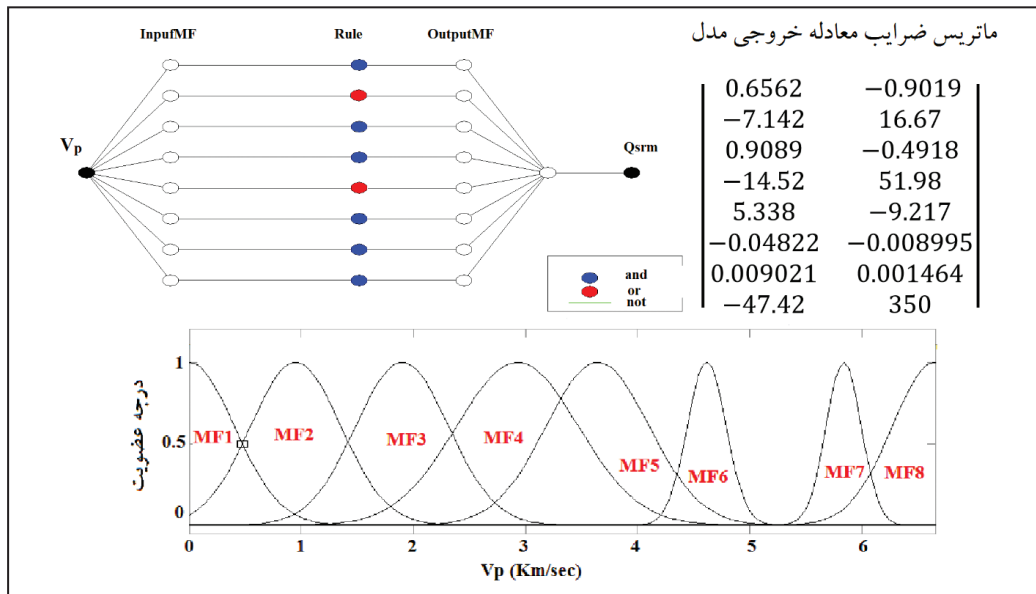
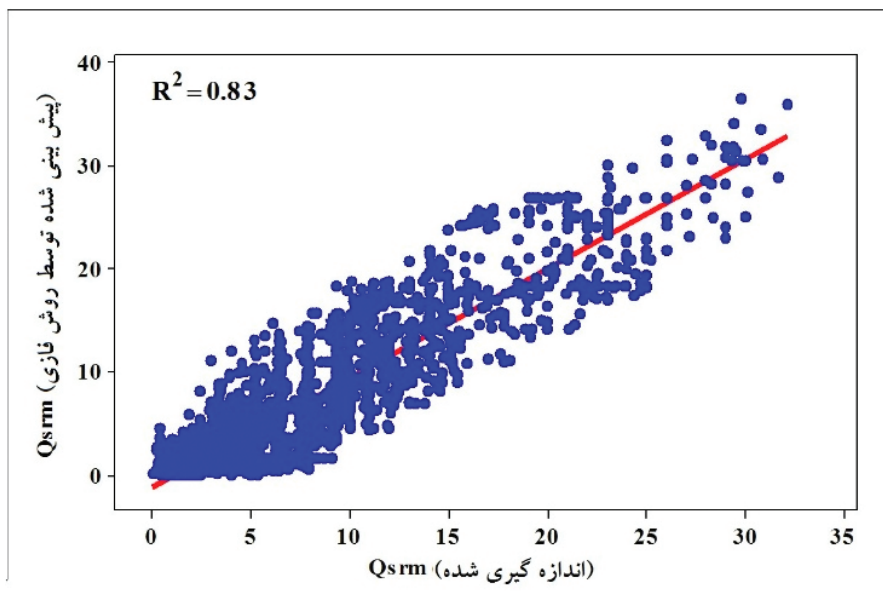
شرح زیر است:

اگر ورودی i برابر x_i باشد، پس خروجی $Z_i = a_i x_i + k_i$ است. k مشخصه‌هایی هستند که توسط ماتریس‌های مشتق شده از FIS به دست می‌آیند. در این تحقیق، $x_i = V_p$ و $Z_i = Q_{srm}$ در نظر گرفته شده است. خروجی نهایی سامانه، میانگین تمام خروجی‌های Z_i است که به صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$\text{Final-Output} = \sum_{i=1}^N Z_i \left(\frac{W_i}{\sum W_i} \right) \quad (5)$$

Z_i نتیجه عملکرد هر قانون بر اساس وزن W اختصاص داده شده به آن است. W_i درجه تأثیر هر قانون در عملکرد بر روی تابع عضویت آن قانون است. جهت بدست آوردن خروجی حاصل از اعمال چند قانون، از عملگرهای AND و OR بین قوانین استفاده شده است (Ross, 1995). در شکل ۱۳ رابطه بین مقادیر تخمین زده شده توسط رابطه ۵ و مقادیر واقعی نشان داده شده است که دارای ضریب همبستگی ۰/۸۳ است. بنابراین کارایی روش FIS جهت تخمین شاخص Q_{srm} قابل قبول ارزیابی می‌شود.

دو قسمت اول هر فرایند استنتاج فازی، فازی‌سازی اطلاعات ورودی (متغیرهای مستقل) و استفاده از عملگرهای فازی، کاملاً مشابه هستند. برای تبدیل مجموعه‌های غیر فازی به فازی، توابع خاص شناخته شده به عنوان توابع عضویت (MF) استفاده می‌شود. همچنین، در هر FIS، جهت ایجاد رابطه منطقی میان ورودی‌ها و خروجی‌ها، چند قاعده شرطی و الگوریتم مورد نیاز است (Gustafson and Kessel, 1978). در شکل ۱۲ ساختار مدل FIS طراحی شده، نشان داده شده است. این مدل براساس آموزش ۸۰ درصد کل داده‌های استخراج شده از پروژه‌های کارون ۲، کارون ۴، تنگ معشوره و خرسان ۳، تهیه شده است و ۲۰ درصد دیگر داده‌ها برای آزمایش مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. توابع عضویت (MF) طراحی شده در این مدل، توابعی خطی هستند که می‌توانند در قالب یک ماتریس $m \times n$ ارائه شوند و هر ردیف در این ماتریس عوامل فیزیکی خروجی یک MF را مشخص می‌کند. در اینجا جهت ارائه مدل FIS به منظور تخمین Q_{srm} ، هشت قانون استفاده شده است. همچنین الگوریتم فازی سوگنو (Sugeno, 1985) برای پیش‌بینی Q_{srm} توسط مجموعه‌های فازی، استفاده شده است. قانون معمول استفاده شده در الگوریتم فازی سوگنو به


 شکل ۱۲- مدل فازی، توابع طراحی شده و ماتریس ضرایب معادله $Z_i = a_i x_i + k_i$ به منظور تخمین شاخص Q_{srm} .

 شکل ۱۳- ارتباط بین مقادیر تخمین زده شده توسط FIS و مقادیر اندازه گیری شده شاخص Q_{srm} .

۷- بررسی کارایی روابط آماری و مدل فازی جهت تخمین شاخص‌های Q و Q_{srm}

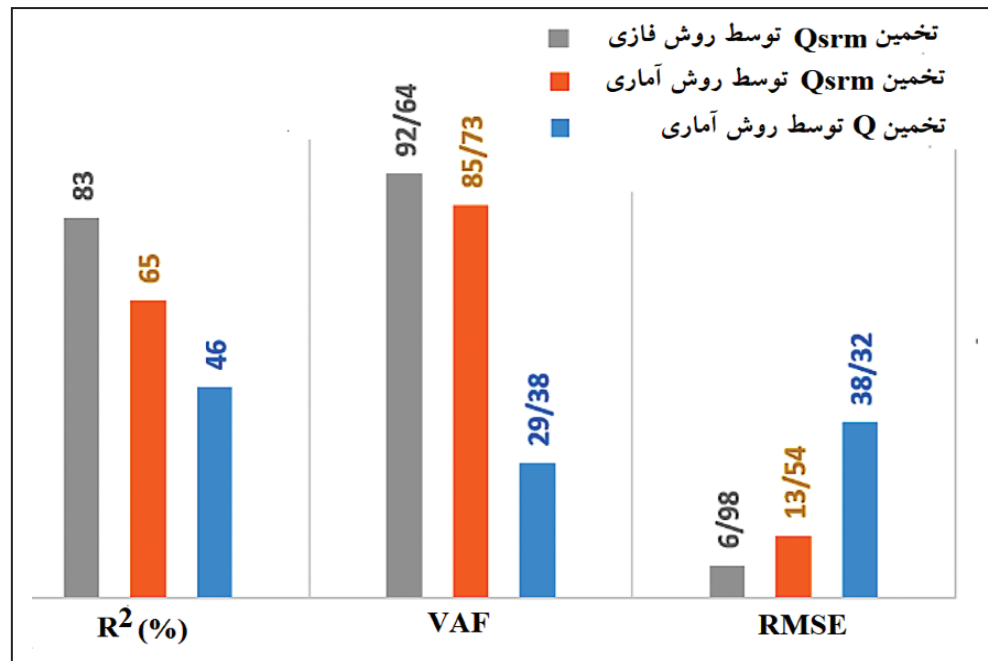
برای اعتبارسنجی و مقایسه نتایج بدست آمده توسط FIS و روش‌های آماری، علاوه بر ضرایب R^2 نشان داده شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۳، مقادیر خطا یا اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شاخص‌های VAF و RMSE، با استفاده از رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه شده است (Alvarez Grima and Babuska, 1999; Finol et al., 2001; Gokceoglu et al., 2004).

(۶)

$$VAF = \left(1 - \frac{\text{var}(y - y')}{\text{var}(y)}\right) \times 100$$

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - y')^2} \quad (۷)$$

y و y' به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده در محل و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های بدست آمده هستند. شکل ۱۴ نتایج VAF و RMSE تحلیل‌های رگرسیون و مدل FIS تهیه شده بر اساس داده‌های استخراج شده از تمامی پروژه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در صورتی که VAF به عدد ۱۰۰ و RMSE به عدد صفر نزدیک باشند، مدل‌های بدست آمده کارایی بسیار مناسبی خواهند داشت. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است؛ ضریب R^2 و شاخص VAF در روش فازی بیشترین مقدار و شاخص RMSE کمترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد.



شکل ۱۴- مقایسه نتایج مدل‌های آماری و فازی در تخمین شاخص‌های Q و Qsrms بر اساس شاخص‌های عملکرد.

۸- نتیجه گیری

۰/۷۴ در ارتباط بوده و افزایش همبستگی در رابطه مذکور، نشان‌دهنده اثرگذاری مشخصه RT بر ارتباط بهتر شاخص Qsrms با Vp است. نتایج تحلیل آماری به خوبی نشان‌دهنده کارایی بیشتر Vp در تخمین شاخص Qsrms نسبت به شاخص Q است. همچنین با استفاده از تحلیل‌های فازی برای پیش‌بینی Qsrms، امکان بدست آوردن مدلی با عملکرد بهتر نسبت به روابط آماری حاصل شد و ضرایب VAF، R² و RMSE به ترتیب ۰/۸۳، ۹۲/۶۴ و ۶/۹۸ برای مدل FIS ارائه شده به منظور تخمین بدست آمد. ضرایب مذکور برای رابطه آماری بین شاخص Qsrms با Vp به ترتیب ۰/۶۵، ۸۵/۷۳ و ۱۳/۵۴ بدست آمده که نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر روش فازی نسبت به روش آماری در تخمین شاخص Qsrms است. بهبود کارایی مدل‌های فازی به دلیل وجود عدم قطعیت در شاخص Qsrms و ماهیت فازی مسئله است. نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌تواند برای هر منطقه با ساختار زمین‌شناسی مشابه که امکان بدست آوردن اطلاعات ژئوتکنیکی میسر نباشد، مورد استفاده قرار گیرد و برای سایر مناطق نیز استفاده از روش مشابه در بدست آوردن مدل‌های پیش‌بینی کننده شاخص‌های کیفیت توده سنگ، توصیه می‌شود.

در این تحقیق سعی شده است با استفاده از روش ژئوفیزیکی عبور سرعت موج فشاری (Vp) روابطی جهت پیش‌بینی کیفیت توده‌سنگ‌های آهکی از جمله شاخص‌های Qsrms و Q در مناطقی از رشته کوه‌های زاگرس، ارائه گردد. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق مربوط به بیش از ۱۲۰۰ مورد گروه داده مکانی استخراج شده از لایه‌های اطلاعاتی Qsrms، Q و Vp مربوط به توده سنگ‌های آهکی سازندهای آسماری، تارپور و گورپی در ساختگاه سدهای کارون ۴، کارون ۲، خرسان ۳ و تنگ معشوره هستند. مقادیر Q به دست آمده نشان‌دهنده کیفیت به شدت ضعیف تا کیفیت بسیار خوب و مقادیر Qsrms نشان‌دهنده کیفیت بسیار ضعیف تا کیفیت مناسب توده سنگ‌های آهکی مورد مطالعه می‌باشند، لذا محدوده وسیعی از خواص توده سنگ‌های آهکی را در بر می‌گیرند. روابط آماری به دست آمده بین Q و Vp با $Q = -3.558 + 1.028 \times Vp + 0.843 \times Vp^2$ و $Qsrms = -0.506 - 1.83 \times Vp + 1.39 \times Vp^2$ به ترتیب دارای ضرایب تعیین ۰/۴۶ و ۰/۶۵ هستند. میانگین مقادیر Qsrms با RT (مشخصه $R_s/s \times T/V$) و Vp نیز با یک رابطه چندمتغیره $Qsrms = -0.579 - 1.803 \times Vp + 1.033 \times Vp^2 + 0.101 \times RT$ با ضریب تعیین

کتابنگاری

- درویش زاده، ع.، ۱۳۷۱- زمین‌شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر، چاپ پنجم، تهران، ۹۰۲ ص.
 شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۷۸- مطالعات ژئوفیزیکی ساختگاه سد خرسان ۳ (گزارش مقدماتی مطالعات به روش لرزه‌نگاری).
 شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۰- مطالعات مرحله دوم طرح سد مخزنی کارون ۴ (گزارش زمین‌شناسی مهندسی).
 شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۷- مطالعات مرحله دوم طرح سد مخزنی کارون ۲ (گزارش زمین‌شناسی مهندسی).
 شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۹ الف- سد مخزنی و نیروگاه خرسان ۳ (گزارش زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک).
 شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۹ ب- طرح سد و نیروگاه تنگ معشوره (گزارش نهایی زمین‌شناسی مهندسی).
 شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۱- گزارش ژئوفیزیک سد کارون ۲.
 شرکت سایبر، ۱۳۸۵- گزارش توموگرافی لرزه ای سد کارون ۴.

References

- Alavi, M., 2004- Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its preforland evaluation. American Journal of Science 304:1- 20.
 Alvarez Grima, M. and Babuska, R., 1999- Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36:339-349.

- Azwin, I. N., Saad, R., Saidin, M., Nordiana, M. M. and Bery, A. A. and Hidayah, I. N., 2015- Combined analysis of 2-D electrical resistivity, seismic refraction and geotechnical investigations for Bukit Bunuh complex crater IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 23(1):12-13.
- Barton, N., 2007- Rock quality, seismic velocity, attenuation, and anisotropy. London: Taylor & Francis Group; pp 19-48.
- Barton, N., Lien, R. and Lunde, J., 1974- Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Journal of Rock Mechanics engineering* 6(4):189–236.
- Bieniawski, Z. T., 1973- Engineering classification of jointed rock masses. *Trans S. Afr. Inst. Journal of Civil Engineering* 15:335-344.
- Carrozzo, M. T., Leucci, G., Margiotta, S., Mazzone, F. and Negri, S., 2008- Integrated geophysical and geological investigations applied to sedimentary rock mass characterization. Lecce, Italy, university of Salento, Department of Science and Material. *annals of geophysics* 51(1):191-202.
- Costamagna, E., Oggeri, C., Segarra, P., Castedo, R. and Navarro, J., 2018- Assessment of contour profile quality in D&B tunneling. *Journal of Tunneling and Underground Space Technology* 75:67-80.
- Deere, D. U., 1963- Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. *Journal of rock mechanic and engineering geology* 1:16-22.
- Feizi, F., Ramezanali, A. K. and Mansouri, E., 2017- Calcic iron skarn prospectively mapping based on fuzzy AHP method, a case study in Varan area, Markazi province. *Journal of Geoscience* 21:123-126.
- Finol, J., Guo, Y. K. and Jing, X. D., 2001- A rule based fuzzy model for the prediction of petro physical rock parameters. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 29(2):97–113.
- Ghasemi, E., Ataei, M. and Hashemolhosseini, H., 2012- Development of a fuzzy model for predicting ground vibration caused by rock blasting in surface mining. *Journal of Vibration and Control*. doi: 10.1177/1077546312437002.
- Ghasemi, E., Ataei, M. and Shahriar, K., 2011- Prediction of roof fall rate in coal mines using fuzzy logic. *Proceedings of the 30th International Conference on Ground Control in Mining*, University of West Virginia, Morgantown, WV 186-191.
- Gokceoglu, C., Yesilnaca, E., Sonmez, H. and Kayabasi, A., 2004- A neuro-fuzzy model for modulus of deformation of jointed rock masses. *Journal of Computers and Geotechnics* 31(5): 375–383.
- Gustafson, D. and Kessel, W., 1978- Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix. In 1978 IEEE conference on decision and control including the 17th symposium on adaptive processes 17:761–766.
- Havenith, H. B., Jongmans, D., Faccioli, E., Abdrakhmatov, K. and Bard, P. Y., 2002- Site effects analysis around the seismically induced Ananevo rockslide, Kyrgyzstan. *Bulletin of the Seismological Society of America* 92:3190–3209.
- Hemmati Nourani, M., Taheri Moghadder, M. and 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.
- Jalalifar, H., Mojedifar, S. and Sahebi, A. A., 2014- Prediction of rock mass rating using fuzzy logic and multi-variable RMR regression model. *International Journal of Mining Science and Technology* 24:237–2.
- Jongmans, D., Hemroulle, P., Demanet, D., Renardy, F. and Vanbrabant, Y., 2000- Application of 2D electrical and seismic tomography techniques for investigating landslides. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 5: 75–89.
- Juang, C. H. and Lee, D. H., 1990- Rock mass classification using fuzzy sets. *Tenth Southeast Asian Geotechnical Conference*. Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, Taipei, pp 309–314.
- Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I., 2013- An introduction to geophysical exploration. Blackwell, London.
- Koleini, M., 2012- Engineering geological assessment and rock mass characterization of the Asmari formation (Zagros range) as large dam foundation rocks in southwestern Iran. PhD. thesis, University of Pretoria, South Africa.
- Lapenna, V., Lorenzo P., Perrone, A., Piscitelli, S., Sdao, F. and Rizzo, E., 2003- High-resolution geoelectrical tomographies in the study of Giarossa landslide (southern Italy). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 62:259–268.
- Leucci, G. and Giorgi, L. D., 2006- Experimental studies on the effects of fracture on the P and S wave velocity propagation in sedimentary rock (“Calcarenite del Salento”). *Journal of Engineering Geology* 84(3–4):130-142.
- Mosadeghi, R., Warnken, J., Tomlinson, R. and Mirfenderesk, H., 2015- Comparison of Fuzzy-AHP and AHP in a spatial multi-criteria decision making model for urban land-use planning. *Journal of Computers Environment and urban systems* 49:54-65.
- Nguyen, V. U. and Ashworth, E. A., 1985- Rock mass classification by fuzzy sets. In: *26th US Symposium on Rock Mechanics*, RapidnCity, SD, 937–945.
- Ross, T. J., 1995- Fuzzy Logic with Engineering Applications. McGraw-Hill, New York, pp 600.
- Rudman, A. J., Blake, J. F. and Biggs, M. E., 1975- Transformation of resistivity to pseudo-velocity logs. *Journal of American Association of Petroleum Geologists* 59:1151– 1165.
- Sugeno, M., 1985- Industrial applications of fuzzy control. New York, USA. Elsevier Science Pub. Co, 269 pp.
- Zadeh, L. A., 1973- Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision 431 processes, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics* 3:28–44.

Estimation of the quality of limestone rocks in some section of the Zagros mountains using seismic wave velocity

M. Talkhablou¹, M. Kianpour² and S. M. Fatemi Aghda^{3*}

¹Assistant Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Science, Kharazmi University, Tehran, Iran

²Ph.D. Student, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Science, Kharazmi University, Tehran, Iran

³Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Science, Kharazmi University, Tehran, Iran

Received: 2018 December 14

Accepted: 2019 July 03

Abstract

In this study, the efficiency of the compressive wave velocity (V_p) geophysical method for predicting the quality of limestone mass in areas of Zagros formation, has been investigated. For qualitative classification of limestone rock masses, the Q classification system and its modified classification system for sedimentary rocks (Q_{sr}m) have been used. For this purpose, the data related to V_p , Q and Q_{sr}m were extracted at the site of Karun 2, Karun 4, Khersan 3 and Tangeh Manshoreh dam sites and by using software interpolation methods in ArcGIS has been transformed into information layers. Using simple and multivariable regression analysis on data extracted from information layers and using Fuzzy Inference System (FIS), models for predicting Q and Q_{sr}m in calcareous rock masses are presented. Also, to evaluate the accuracy of the obtained models, in addition to R², performance indicators (VAF) and root mean square error (RMSE) were used. The results show that since the Q_{sr}m index considers a wider range of massive properties, the prediction of the Q_{sr}m value is closer to reality using geophysical methods than the Q index.

Keywords: Sedimentary Rock Mass Quality Index, Limestone Rock Mass, Geophysical Methods, Empirical Equations, Fuzzy Inference System.

For Persian Version see 61 to 70

*Corresponding author: S. M. Fatemi Aghda; E-mail: fatemi@khu.ac.ir