

تعیین پارامترهای زمین شناسی و ژئوتکنیکی توده سنگ مسیر تونل های پNSTاک سد رودبار لرستان

بهنام ابره^۱، لهراسب فرامرزی^۱، مرتضی قارونی نیک^{۲*}

پذیرش مقاله: ۹۲/۱۱/۲۰

دریافت مقاله: ۹۱/۰۵/۲۳

چکیده

تعیین دقیق پارامترهای ژئوتکنیکی توده سنگ با استفاده از نتایج اکتشافات ژئوتکنیکی شامل: آزمایش های آزمایشگاهی و برجا، روابط تجربی، بررسی های زمین شناسی مهندسی و مشاهدات صحرایی انجام می شود. توده سنگ مسیر تونل های پNSTاک سد رودبار لرستان از سازندهای دالان، میلا و هرمز تشکیل شده است که به طور عمده از سنگ های آهک تا آهک مارنی، دولومیت، شیل و مارن تشکیل شده و از ساختار زمین شناسی پیچیده ای برخوردار است. در این تحقیق طبقه بندی توده سنگ مسیر تونل های پNSTاک بر اساس داده های اندازه گیری شده، با استفاده از سیستم های طبقه بندی مهندسی RMR، Q و GIS انجام شده است. سپس با استفاده از این داده ها رابطه جدیدی بین RMR-Q برای منطقه مورد مطالعه ارائه شد. روابط تجربی مختلفی بر اساس RMR، Q و GIS برای تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی وجود دارد که این روابط، هر کدام برای نواحی و سازندهای خاصی می تواند نتیجه بهتری بدهد. در این تحقیق با استفاده از تحلیل نتایج حاصل از آزمایش های دیلاتومتری، مطالعات آزمایشگاهی و مطالعه بیش از ۲۵ حلقه چاه و چاهک، پارامترهای مدول تغییر شکل پذیری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ های سازند دالان ارزیابی شد. سپس با کالیبره کردن روابط تجربی با استفاده از داده های اندازه گیری شده ی سازند دالان، پارامترهای ژئوتکنیکی سازندهای میلا و هرمز با صحت و دقت بیشتری تخمین زده شد.

کلید واژه ها: پارامترهای ژئوتکنیکی، پNSTاک، توده سنگ، تونل، سد رودبار لرستان

۱. دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن

۲. دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی راه آهن gharouni@doctor.com

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

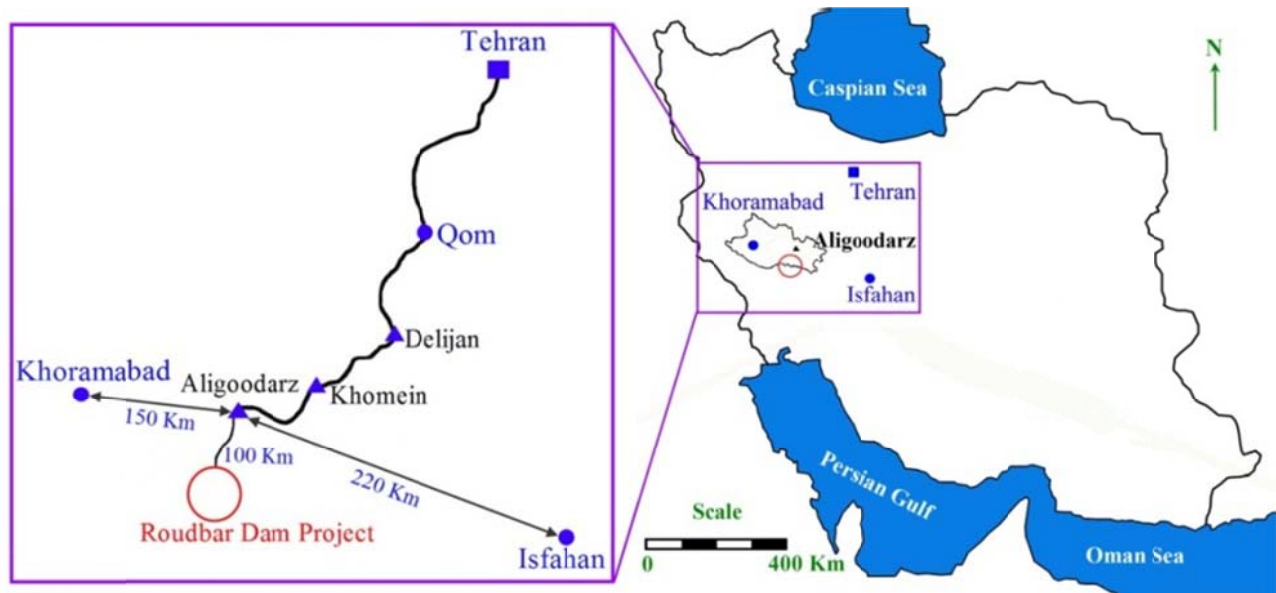
پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومتی از قبیل مدول تغییرشکل پذیری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی جزو مهم ترین پارامترها برای طراحی عملی و همچنین مدل سازی عددی در توده سنگ می باشند. تعیین دقیق این پارامترها با توجه به حساسیت بالای آنها برای طراحی کار بسیار مشکلی است. صحت و دقت نتایج حاصل از یک طراحی، وابسته به اعتبار داده های به کار رفته در تحلیل ها است. پارامتری ژئوتکنیکی به روش های مختلف از جمله مطالعات آزمایشگاهی، آزمایش های برجا و روابط تجربی تعیین می شوند که هر کدام دارای مزایا و معایبی می باشند. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی به دلیل کوچک بودن نمونه مورد آزمایش، نمی تواند معرف خواص توده سنگ باشد. آزمایش های برجا نیز در مقایسه با مطالعات آزمایشگاهی هزینه بر ولی قابل اعتمادتر هستند. آزمایش بارگذاری صفحه ای و دیلاتومتری یکی از پرکاربردترین آزمایش های برجا می باشند. مشکلات ناشی از هزینه بالا، دسترسی به محل آزمایش، آماده سازی و اجرای آزمایش های برجا باعث شده تا روابط تجربی متنوعی برای تخمین پارامترهای ژئومکانیکی به ویژه مدول تغییرشکل پذیری به وسیله محققان مختلف ارائه از گسترش یابد (Kayabasi et al., 2003, Bieniawski, 1978, Serafim and Pereira, 1983, Nicholson and Bieniawski, 1990, Asef et al., (2000, Hoek and Brown, 1997, Hoek and Diederichs, 2005. اگرچه این روابط به خاطر طبیعت پیچیده توده سنگ دارای خطا هستند اما با کالیبره کردن، می توان دقت آنها را تا حد قابل قبولی برای طراحی ها افزایش داد. به خاطر اهمیت پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومتی، تحقیقات زیادی برای ارائه روابطی که بتوانند این پارامترها را به صورت غیرمستقیم، به خصوص با استفاده از سیستم های طبقه بندی مهندسی سنگ تخمین بزنند، انجام شده است (Kayabasi et al., 2003, Bieniawski, 1978, Hoek and Diederichs, 2005).

سیستم طبقه بندی در مهندسی سنگ برای اولین بار توسط ترزاقی معرفی شد (Terzaghi, 1946). از مهم ترین سیستم های طبقه بندی بعد از ترزاقی می توان به RQD توسط دیر و

همکاران، RSR توسط ویکهام و همکاران، Q توسط بارتن و همکاران، RMR توسط بنیواسکی، GSI توسط هوک و RMI توسط پالمستروم اشاره کرد (Bieniawski, 1978, Hoek and Brown, 1997, Deere and Miller, 1966, Wickham et al., 1972, Barton et al., 1974, Bieniawski, 1976, Palmestrom, 1995). میلن و همکاران کاربرد اصلی روش های طبقه بندی مهندسی سنگ را در برآورد شرایط پایدار برای توده سنگ های در برگیرنده فضاهای زیرزمینی، ارائه سیستم نگهداری مناسب، مشخص نمودن مواد سنگی با خواص ژئومکانیکی یکسان و فراهم کردن شرایط برای تخمین پارامترهای مقاومتی و ژئومکانیکی توده سنگ بیان کرده اند (Milne et al., 1998). در دهه های اخیر نیز استفاده از روش های عددی در تخمین پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده قرار گرفته است که می توان به تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ اطراف تونل با استفاده از آنالیز برگشتی بابه کارگیری الگوریتم ژنتیک اشاره کرد (فرامرزی و همکاران، ۱۳۹۱).

۲. موقعیت سد و نیروگاه رودبار لرستان

سد و نیروگاه رودبار در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز بر روی رودخانه رودبار در حال احداث است. هدف از احداث این سد استفاده از پتانسیل طبیعی منطقه به منظور تولید انرژی برقی با ظرفیت ۴۵۰ مگاوات می باشد. با توجه به اختلاف ارتفاع در حدود ۳۱۰ متری بین سد و محل نیروگاه، احداث نیروگاه در پای سد مورد نظر نبوده، بلکه محل نیروگاه به صورت سطحی در فاصله حدود ۳/۵ کیلومتری از محور سد طراحی شده است. این مجموعه شامل یک بدنه خاکی با هسته رسی، نیروگاه، تونل انحراف آب و سیستم انتقال آب شامل یک تونل آب بر و دو تونل پستاک و دو مخزن ضربه گیر با ارتفاع ۱۳۰ متر خواهد بود. ارتفاع از پی این سد ۱۵۸ متر با طول تاج ۲۱۱ متر و عرض تاج ۸ متر می باشد و طول دریاچه سد حدود ۲۰ کیلومتر است. ساختگاه سد در عرض جغرافیایی $32^{\circ}54'19''$ شمالی و طول جغرافیایی $49^{\circ}41'5''$ شرقی واقع شده است. شکل ۱ موقعیت و راه دسترسی به سد و نیروگاه رودبار لرستان را نشان می دهد (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۶).



شکل ۱. موقعیت و راه دسترسی به سد و نیروگاه رودبار لرستان

جدول ۱. خلاصه اطلاعات چینه‌شناختی در محدوده طرح

(شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۶)

دوره	سازند	توصیف
کواترنری	-	آبرفت‌های پلکانی، آبرفت‌های جوان و کهن در بستر و حاشیه رودخانه، نهشته‌های بادبزی، واریزه‌های دامنه‌ای، توده‌های لغزشی و خزشی، خاک برجا
کرتاسه	سروک	آهک و آهک رسی خاکستری با گرهک‌های چرت و شیل‌های بین لایه‌ای
پرمین	گرو	آهک مارنی، شیل و مارن و بین لایه‌های آهکی
پرمین	دالان	آهک، آهک دولومیتی و دولومیت خاکستری تا خاکستری تیره با لایه‌بندی متوسط تا ضخیم
کامبرین	میلا	دولومیت خاکستری، مارن سبز و آهک مارنی با میان لایه‌های شیل
کامبرین	هرمز	دولومیت خاکستری تیره بد بو، مارن رنگی و آهک مارنی

۲-۲. زمین‌شناسی منطقه‌ای تونل‌های پستاک سد رودبار لرستان

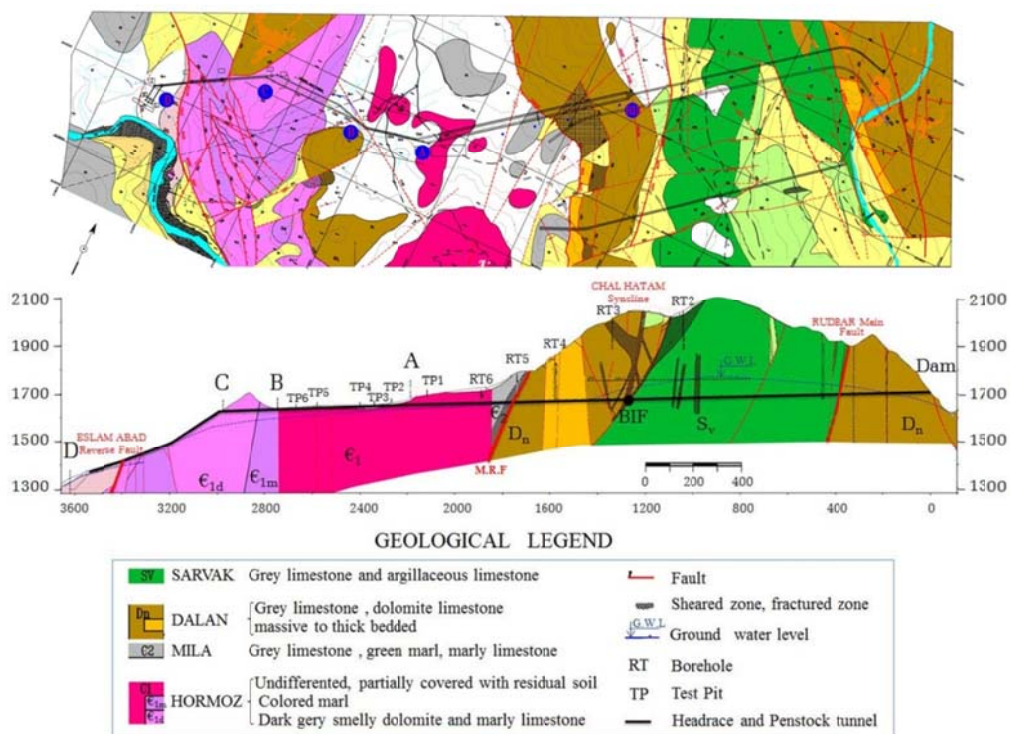
سیستم انتقال آب به نیروگاه شامل یک تونل آب‌بر دایره‌ای با قطر ۶ متر است که در ادامه به دو تونل پستاک با مقطع نعل

۱-۲. زمین‌شناسی ناحیه‌ای

محدوده‌ی محل سد و دریاچه سد رودبار و همچنین تونل آب‌بر و تونل‌های پستاک در پهنه زاگرس شمالی یا زاگرس مرتفع واقع شده‌اند. این زون یک نوار به شدت خرد شده با پهنای بین ۷۰ تا ۱۰۰ کیلومتر می‌باشد که از جنوب باختری به نوار چین‌خورده‌ی زاگرس و از شمال خاوری به گسل اصلی معکوس زاگرس در زون سنندج - سیرجان محدود گردیده است. محدوده تونل آب‌بر و تونل‌های پستاک در فاصله بین رودخانه‌های رودبار و الکن واقع شده است. بدین جهت توده سنگ‌های مسیر انتقال آب به نیروگاه به لحاظ سنگ‌شناختی متنوع بوده و از ساختار نسبتاً پیچیده‌ای برخوردار است. ساختار ناحیه به طور عمده متأثر از عملکرد گسل‌های متوالی است که عمده‌ترین آن‌ها گسل اصلی جدید زاگرس (MRF) بوده و نقش مهمی در زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه ایفا نموده است (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۶). چینه‌شناسی محدوده مورد مطالعه به اختصار در جدول ۱ ارائه گردیده است.

متشکل از آهک و آهک دولومیتی سازند دالان مربوط به دوره پرمین است. امتداد لایه‌های سنگ‌ها از روند عمومی ساختار تبعیت می‌کند ولی شیب لایه‌ها متفاوت است. بخش دوم که از گسل سراوند-بزنوید تا محل نیروگاه گسترش دارد از لحاظ ریخت‌شناختی دارای تنوع چشم‌گیری است، بدین ترتیب که پس از تونل‌های دسترسی به سمت محل نیروگاه ابتدا اراضی تپه ماهوری با آبراهه‌های متعدد دیده می‌شود که بخش‌هایی از آن نسبتاً هموار بوده و در آن نهشته‌های عهد حاضر شامل واریزه‌ها و خاک برج‌گسترده است. بخش‌هایی که تونل‌های پستاک کوتاه از آن عبور می‌کند دارای شیب عمومی زیاد و مورفولوژی خشن‌تری است به طوری که دره‌ها نسبتاً عمیق بوده و اختلاف ارتفاع کف دره‌ها با قله‌ها و ستیغ‌های اطراف افزایش می‌یابد. این شرایط بر اثر وجود تناوب سنگ‌های مقاوم آهکی- دولومیتی و سنگ‌های کم مقاومت شیلی و مارنی پدید آمده است (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۶)

اسبی و فاصله محور به محور ۲۸ متر، قطر ۸ متر و طول ۲۴۰۰ متر تبدیل می‌شود. قطر لوله‌های پستاک مورد استفاده در این دو تونل ۴ متر است که بخشی از آن به صورت سطحی اجرا می‌شود (شکل ۲، محدوده AB) (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۵). بخش عمده تونل‌های پستاک از سازندهای دالان و هرمز می‌گذرد و بخش کوچکی نیز از سازند میلا عبور می‌کند. مقطع ژئوتکنیکی و زمین‌شناختی محدوده‌ی طرح در شکل ۲ آمده است. گسل سراوند - بزنوید که متقاطع با تونل‌های پستاک و در میانه مسیر انتقال آب واقع است، بخشی از گسل اصلی جدید زاگرس است و در مسیر انتقال آب، شیب آن به سوی جنوب باختری است. با توجه به تأثیر زیاد این گسل و اختلاف مقاومت و فرسایش‌پذیری بین سنگ‌های تشکیل‌دهنده این سازندها، مسیر انتقال آب دارای دو مورفولوژی متفاوت است. بخش اول از رودخانه رودبار تا گسل سراوند-بزنوید است که به دلیل گستردگی سنگ‌های کربناته اراضی بسیار مرتفع با مورفولوژی خشن و دامنه‌های پرشیب در این بخش پدید آمده است. پی سنگ در این بخش،



شکل ۲. مقطع عرضی ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی سد و نیروگاه رودبار لرستان (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۶)

۲-۳. مطالعات زمین‌شناسی و حفاری‌های ژئوتکنیکی

به منظور بررسی پی‌سنگ سد رودبار لرستان از سال ۱۳۷۲، مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی در محدوده‌ی مورد مطالعه آغاز گردید. مطالعات صورت گرفته در وهله نخست شامل تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی و حفاری اکتشافی محل سد، محدوده مخزن و مسیر تونل‌های آب‌بر است. همچنین شامل آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی، مطالعات ژئوفیزیکی در محدوده نیروگاه و بخشی از مسیر پستاک‌ها و مطالعات ردیابی در ساختگاه به منظور شناسائی مجاری کارستیک می‌باشد (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۴، ۱۳۸۶). در مرحله اول مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک در مجموع تعداد ۷ گمانه در مسیر تونل‌های پستاک حفاری گردید. در مرحله دوم مطالعات هیدروژئولوژی، تعداد ۱۲ حلقه گمانه و ۶ چاهک در مسیر تونل انتقال آب و پستاک حفر شد که همگی به طور قائم حفاری و عمق آن‌ها از ۱۵ تا ۲۴۰ متر متغیر است. همچنین در این مرحله مطالعات مکانیک سنگ و ... صورت گرفت (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۶).

طراحی سازه‌های سنگی به کار گرفته شود (Cai et al., 2004,) در این تحقیق طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ مسیر تونل‌های پستاک سد رودبار لرستان به روش‌های RMR، Q و GSI انجام شده است.

۳-۱. طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ

در سال ۱۹۷۶، بیناوسکی جزئیات طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (RMR) را ارائه کرد (Bieniawski, 1976). در این رده‌بندی، توده‌سنگ از نظر ساختاری به چند ناحیه تقسیم شده و هر ناحیه به طور مستقل طبقه‌بندی می‌شود. مرز مناطق ساختاری معمولاً با رخساره‌هایی مانند گسل یا تغییر در نوع سنگ مشخص می‌شود. در بعضی موارد تغییرات قابل توجه در وضعیت ناپیوستگی‌ها در یک نوع توده‌سنگ واحد نیز، سبب می‌شود که توده‌سنگ به چند ناحیه کوچک تر یا بزرگ تر تقسیم شود. در ادامه با توجه به مطالب فوق، توده‌سنگ مسیر تونل‌های پستاک به شش ناحیه تقسیم شد که طبقه‌بندی مهندسی آن بر اساس RMR_{۸۹} در جدول ۲ آورده شده است.

۳-۲. شاخص کیفی تونل‌زنی در توده‌سنگ

بارتن و همکارانش (۱۹۷۴) در انستیتوی ژئوتکنیک نروژ (NGI) شاخصی را بر مبنای ارزیابی تعداد زیادی از حفاریات زیرزمینی ارائه کردند که به شاخص کیفی تونل‌زنی یا Q معروف است. مقدار عددی شاخص Q در یک مقیاس لگاریتمی از حداقل ۰/۰۰۱ تا حداکثر ۱۰۰۰ تغییر می‌کند (Grimstaad and Barton, 1993). طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ مسیر پستاک‌ها طبق روش Q در جدول ۳ آورده شده است.

۳. تعیین ویژگی‌های توده‌سنگ مسیر تونل‌های پستاک با

استفاده از سیستم طبقه‌بندی مهندسی سنگ

رده‌بندی‌های توده‌سنگ، اساس روش طراحی تجربی بوده و به طور وسیع در مهندسی سنگ کاربرد دارد. این روش براساس تجزیه و تحلیل آماری پایداری حفاریات زیر زمینی در نقاط مختلف دنیا، بنا شده است. رده‌بندی توده‌سنگ به طور گسترده و موفقیت آمیزی در طراحی‌های عملی استفاده می‌شود. طبقه‌بندی مهندسی سنگ یک فرآیند جمع‌آوری و آنالیز کیفی و کمی داده‌ها است که به تجربه ثابت شده است که اگر به صورت دقیق انجام شود، می‌تواند به عنوان ابزاری نیرومند در

جدول ۲. طبقه‌بندی ژئومکانیکی RMR برای مسیر تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان*

سازند	دالان گسله	دالان خوب	میلا	هرمز(پنستاک بلند)	هرمز(پنستاک کوتاه)
	D_F	D_G	M	H_L	H_{Sh}
پارامتر	۱۲۵۰-۱۶۴۰ km	۱۶۴۰-۱۷۲۰ km	۱۷۲۰-۱۸۵۰ km	۱۸۵۰-۲۲۳۰ km	۲۷۳۶-۳۰۰۰ km
مقدار	۲۵-۵۰	۸۱	۱۰	۱۰	۱۰
q_c	۲-۴	۷	۲	۲	۲
مقدار (%)	<۲۵	۶۹	<۲۵	<۲۵	<۲۵
RQD	۳	۱۳	۳	۳	۳
نوع	قطره‌ای	کاملاً خشک	کاملاً خشک	کاملاً خشک	کاملاً خشک
آب زیرزمینی	۴	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
شرایط	DC1	DC2	DC3	DC4	DC4
امتیاز	۲۰	۲۰-۲۵	۰	۰-۱۰	۰-۱۰
فاصله‌داری	۶۰-۲۰۰ mm	۶۰-۲۰۰ mm	۶۰-۲۰۰ mm	۶۰-۲۰۰ mm	۶۰-۲۰۰ mm
ناپیوستگی	۵-۸	۱۵	۵-۸	۵-۸	۵-۸
جهت‌داری	مناسب	مناسب	مناسب	مناسب	بسیار مناسب
امتیاز	-۵	-۵	-۵	-۵	۰
RMR	۲۹-۳۴	۶۵-۷۰	۲۰-۲۳	۲۰-۳۳	۲۵-۳۸

DC1: کمی زیر و هوازدگی متوسط، جدایش کمتر از ۱mm
 DC2: زیر و کمی هوازده، جدایش کمتر از ۱mm
 DC3: پرکننده نرم با ضخامت ۵mm، عرض ناپیوستگی ۵mm، q_c : مقاومت فشاری تک‌محوره ماده سنگ (MPa)
 DC4: DC3 یا سطح دیواره صاف یا ۱-۵mm پرکننده نرم با عرض ناپیوستگی ۵mm
 *بازه ۳۰۰۰-۲۷۳۶ km خط لوله‌های پنستاک به صورت رو سطحی است.

جدول ۳. طبقه‌بندی Q برای مسیر تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان*

سازند	دالان گسله	دالان خوب	میلا	هرمز(پنستاک بلند)	هرمز(پنستاک کوتاه)
	D_F	D_G	M	H_L	H_{Sh}
پارامتر	۱۲۵۰-۱۶۴۰ km	۱۶۴۰-۱۷۲۰ km	۱۷۲۰-۱۸۵۰ km	۱۸۵۰-۲۲۳۰ km	۲۷۳۶-۳۰۰۰ km
مقدار (%)	<۲۵	۶۹	<۲۵	<۲۵	<۲۵
RQD	۲۵	۶۹	۲۵	۲۵	۲۵
شرایط	۴ دسته درزه	یکدسته درزه به اضافه درزه‌های اتفاقی	سنگ شدیداً خرد شده		
J_n	۱۵	۳	۲۰		
شرایط	صاف و موجدار	صاف، مسطح و آینه‌ای			
J_f	۲		۰/۵-۱		
شرایط	مواد پرکننده غیر نرم سنگ و رسی	مواد رس‌دار و غیر نرم			
J_a	۸		۵		
شرایط	حفری در شرایط خشک				
J_w	۱				
شرایط	مناطق برشی در سنگ	مناطق برشی در سنگ متراکم	مناطق ضعیف متعدد حاوی رس و سنگ خرد شده و		
SRF	متراکم با عمق متغیر	با عمق متغیر	هوازده		
مقدار	۰/۵-۲/۵	۰/۵-۲	۵-۱۰		
Q	۰/۱۶-۰/۸	۲/۹-۱۱/۵	۰/۰۱-۰/۰۵	۰/۰۱-۰/۰۵	۲/۳-۵/۵

*بازه ۳۰۰۰-۲۷۳۶ km خط لوله‌های پنستاک به صورت رو سطحی است.

(به علت شیب زیاد اطلاعات دیگری در دسترس نیست).
 بررسی‌های ژئوفیزیکی

۳-۳. شاخص مقاومت زمین‌شناختی

روند گسترش دو سیستم طبقه‌بندی مهندسی سنگ RMR و Q بر اساس RQD صورت گرفته است. در بسیاری از موارد خصوصاً در توده سنگ‌های ضعیف مقدار RQD بسیار ناچیز و تعیین آن مشکل است. به همین دلیل ضرورت یک سیستم طبقه‌بندی برای توده سنگ‌های ضعیف احساس می‌شد. شاخص مقاومت زمین‌شناختی برای اولین بار توسط هوک (۱۹۹۴) ارائه شد. تخمین GSI بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی ساده یعنی کیفیت سنگ و کیفیت ناپیوستگی‌های آن انجام می‌شود (Hoek et al, 1998).

۳-۳-۱. روش‌های محاسبه GSI

هوک و براون (۱۹۹۴) برای تعیین GSI، نموداری را پیشنهاد کردند که متخصصین می‌توانند یک توده‌سنگ را تنها بر اساس بررسی‌های چشمی رده‌بندی نمایند (Hoek et al, 1998). برای محاسبه GSI با توجه به سایر روش‌های طبقه‌بندی نیز فرمول‌هایی ارائه شده است. با استفاده از سیستم طبقه‌بندی RMR و Q می‌توان مقدار GSI را تخمین زد. بدین منظور می‌توان از رابطه‌های ۱ و ۲ استفاده نمود.

$$GSI = RMR'_{89} - 5 ; RMR \geq 23 \quad (1)$$

$$GSI = 9 \ln Q' + 44 \quad (2)$$

در رابطه ۱ مقدار RMR'_{89} از نسخه ۱۹۸۹ بیناوسکی استفاده قرار می‌شود. با این تفاوت که محاسبه باید برای سنگ کاملاً خشک در نظر گرفته شود و از تأثیر جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نیز صرف‌نظر شود (Hoek and Brown, 1997). در رابطه ۲ نیز Q' از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$Q' = \frac{RMR}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} \quad (3)$$

در رابطه ۳، پارامترها همان پارامترهای سیستم طبقه‌بندی Q می‌باشند (Hoek et al, 1998).

سونمز و همکاران (۲۰۰۵) روشی پیشنهاد کردند که در آن با استفاده از امتیاز ساختاری (SR) و امتیاز شرایط سطح (SCR) می‌توان مقدار GSI را محاسبه نمود. امتیاز ساختاری و امتیاز شرایط سطح از روابط تجربی پیشنهادی توسط سونمز و همکاران قابل محاسبه است (Sonmez et al., 2004).

$$SR = -17.5 \ln J_v + 79.8 \quad (4)$$

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (5)$$

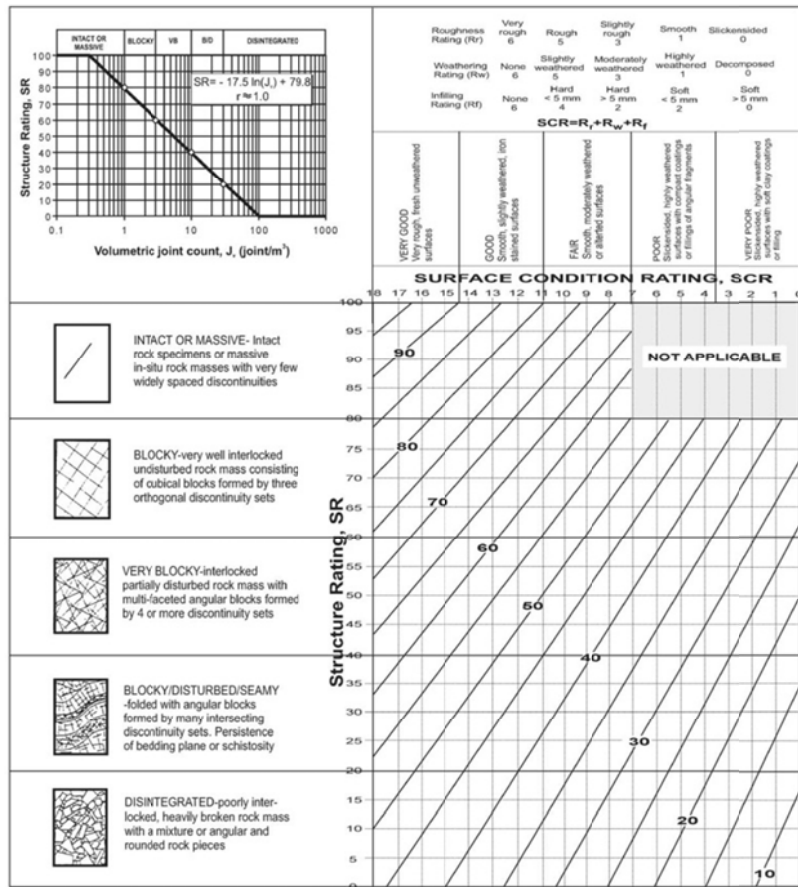
که در این روابط: J_v ضریب مربوط به حجم بلوک؛ R_f امتیاز پرشدگی درزه؛ R_r امتیاز زبری سطح درزه و R_w امتیاز هوازگی سطح درزه می‌باشد. در شکل ۳ نحوه‌ی استفاده از SR و SCR جهت تخمین GSI از روی نمودار هوک و همکاران (۱۹۹۸) نشان داده شده است (Sonmez et al., 2004).

باتوجه به روابط فوق مقدار GSI برای سازندهای متفاوت مسیر تونل پستاک به روش‌های مختلف در جدول ۴ و شکل ۴ آورده شده است. در نهایت با توجه به روش‌های ارائه شده برای تخمین GSI، در جدول ۴ و شکل ۴ مقادیر نهایی GSI بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی تعیین و بهترین همپوشانی بین مقادیر، ارائه شد.

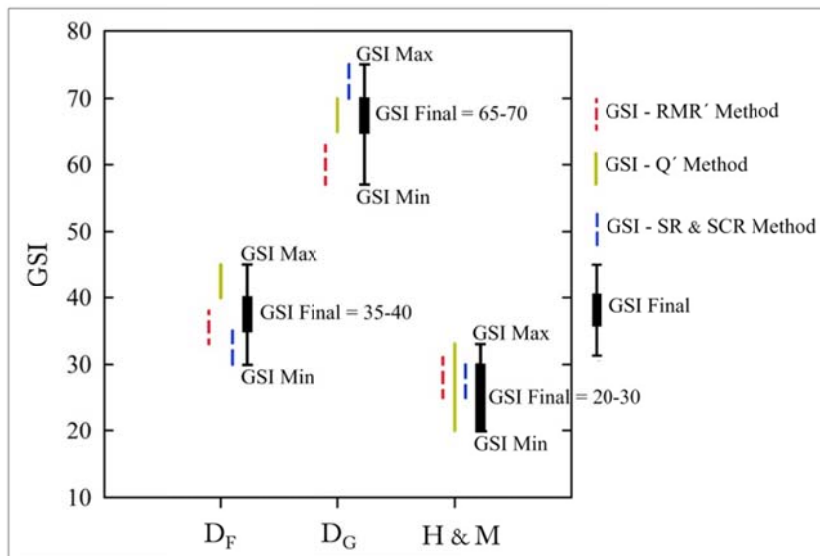
جدول ۱: مقدار GSI محاسبه شده با استفاده از روش‌های

ارائه شده

GSI (نهایی)	GSI (SR&SCR)	GSI (RMR')	GSI (Q')	ناحیه
۳۵ - ۴۰	۳۰ - ۳۵	۴۰ - ۴۵	۳۶	D _F
۶۵ - ۷۰	۷۰ - ۷۵	۶۵ - ۷۰	۶۰	D _G
۲۰ - ۳۰	۲۵ - ۳۰	۲۰ - ۳۳	۲۵ - ۳۱	H & M



شکل ۳. بدست آوردن GSI از مقادیر SCR و SR (Sonmez et al., 2004)



شکل ۴. تعیین مقدار GSI برای سازندهای مسیر تونل پستاک با استفاده از روش‌های مختلف

۳-۴. بررسی ارتباط بین RMR و Q

سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ هر کدام دارای پارامترهای خاص خود هستند. بعضی از این پارامترها در سیستم‌های مختلف مشترک هستند ولی امتیازدهی آن‌ها متفاوت است. اصطلاحات مربوط به ضعیف یا قوی بودن توده‌سنگی در روش‌های مختلف طبقه‌بندی توده‌سنگ، با هم متفاوت هستند و نمی‌توان از این اصطلاحات برای مقایسه روش‌های مختلف استفاده کرد. به عنوان مثال اصطلاح ضعیف در روش RMR برابر با لزوم سیستم نگهداری است ولی در روش Q لزوماً چنین مفهومی را ندارد. با توجه به پیچیدگی توده‌سنگ مسیر تونل‌های پلستاک چند سیستم طبقه‌بندی سنگ، هم‌زمان بررسی شد تا در طی مطالعات، خواص

توده‌سنگ به طور دقیق ارزیابی شود. روابط مختلفی بین مقادیر RMR و Q ارائه شده است که در جدول ۵ چند نمونه از این روابط آورده شده است. در ادامه فرمولی توسط نویسندگان برای این نواحی ارائه شد که برای کالیبره کردن از روابط مذکور استفاده شده است.

لازم به ذکر است با توجه به مقادیر Q و RMR به دست آمده از مقاطع مورد مطالعه و سایر شرایط از جمله ارتفاع روباره و شرایط زمین‌شناسی مشابه، در نهایت تصمیم بر آن شد که مقاطع میلا و هرمز شامل پلستاک‌های بلند (H_L) و هرمز شامل پلستاک‌های کوتاه (H_{Sh}) به صورت مشترک یک مقطع ($M\&H$) در نظر گرفته شوند.

جدول ۵. رابطه‌ی بین مقادیر RMR و Q

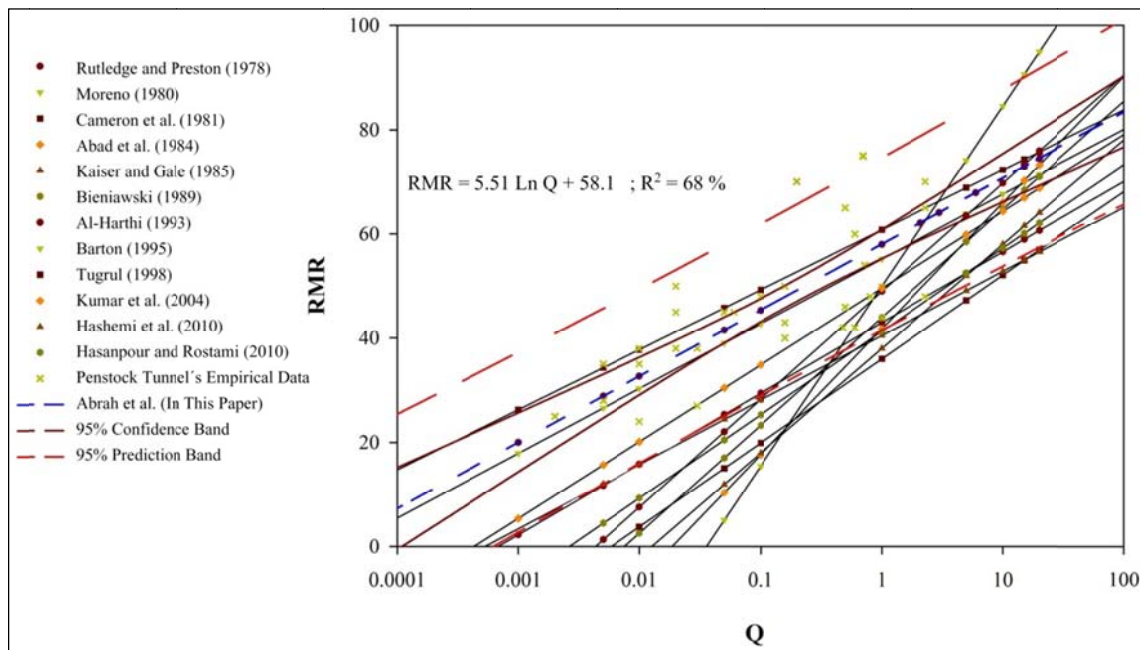
نام محقق یا محققین و سال ارائه	رابطه	رابطه
Rutledge and Preston (1978)	$RMR = 5.9 \ln Q + 43$	(۶)
Moreno (1980)	$RMR = 5.4 \ln Q + 55.2$	(۷)
Cameron et al. (1981)	$RMR = 5.0 \ln Q + 60.8$	(۸)
Abad et al. (1984)	$RMR = 10.5 \ln Q + 41.8$	(۹)
Kaiser and Gale (1985)	$RMR = 8.7 \ln Q + 38$	(۱۰)
Bieniawski (1989)	$RMR = 9.0 \ln Q + 44$	(۱۱)
Al-Harathi (1993)	$RMR = 9.0 \ln Q + 49$	(۱۲)
Barton (1995)	$RMR = 15 \ln Q + 50$	(۱۳)
Tugrul (1998)	$RMR = 7.0 \ln Q + 36$	(۱۴)
Kumar et al. (2004)	$RMR = 6.4 \ln Q + 49.6$	(۱۵)
Hashemi et al. (2010)	$RMR = 5.37 \ln Q + 40.48$	(۱۶)
Hasanpour and Rostami (2010)	$RMR = 6.95 \ln Q + 41.30$	(۱۷)

روابط، تخمین بالایی از RMR را ارائه می‌دهند و درصد خطای آن‌ها نسبت به مقادیر تجربی به دست آمده برای منطقه مورد مطالعه بین ۵۰ تا ۹۰ درصد می‌باشد. رابطه بارتون (۱۹۹۵) محدوده وسیعی را شامل می‌شود. روابط عباد و همکاران (۱۹۸۴) و کایزر و گال (۱۹۸۵) برای $Q < 0.01$ و بارتون (۱۹۹۵) برای مقادیر $Q < 0.035$ مقدار RMR کمتری را بدست می‌دهند. همچنین روابط بینیاوسکی (۱۹۸۹) و توگرو (۱۹۹۸) نیز برای مقادیر $Q < 0.01$ مقادیر RMR را بسیار پایین و نزدیک به صفر نشان می‌دهند.

به کمک روابط ۶ الی ۱۷ و با استفاده از مقادیر Q ، مقدار RMR محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است. بر اساس داده‌های به دست آمده از طبقه‌بندی توده‌سنگ مسیر تونل‌های پلستاک سد رودبار لرستان رابطه‌ی ۱۸ بر این مقادیر برازش شد. با مقایسه این رابطه با سایر روابط استخراج شده توسط دیگر محققان در نقاط مختلف جهان، نتایجی قابل قبولی به دست آمد که در شکل ۵ نشان داده شده است. روابط ارائه شده توسط مورونو (۱۹۸۰) و کامرون (۱۹۸۱) برای مقادیر پایین RMR ، یعنی توده‌سنگ‌های ضعیف، نسبت به سایر

جدول ۶. محاسبه مقدار RMR با استفاده از مقدار Q، به کمک روابط ۶ الی ۱۷

نام محقق یا محققین و سال ارائه	دالان خوب		دالان گسله		هرمز و میلا	
	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
Rutledge and Preston (1978)	۳۲/۲	۴۱/۷	۴۹/۳	۵۷/۴	۱۵/۸	۲۵/۳
Moreno (1980)	۴۵/۳	۵۴	۶۰/۹	۶۸/۴	۳۰/۳	۳۹
Cameron et al. (1981)	۵۱/۶	۵۹/۷	۶۶/۱	۷۳	۳۷/۸	۴۵/۸
Abad et al. (1984)	۲۲/۶	۳۹/۵	۵۳	۶۷/۴	-۶/۶	۱۰/۳
Kaiser and Gale (1985)	۲۲/۱	۳۶/۱	۴۷/۳	۵۹/۲	-۲/۱	۱۱/۹
Bieniawski (1989)	۲۷/۵	۴۲	۵۳/۶	۶۶	۲/۶	۱۷
Al-Harathi (1993)	۳۲/۵	۴۷	۵۸/۶	۷۱	۷/۵	۲۲
Barton (1995)	۲۲/۵	۴۶/۷	۶۶	۸۷	-۱۹/۱	۵/۱
Tugrul (1998)	۲۳/۲	۳۴/۴	۴۳/۵	۵۳/۱	۳/۸	۱۵
Kumar et al. (2004)	۳۷/۹	۴۸/۲	۵۶/۴	۶۵/۲	۲۰/۱	۳۰/۴
Hashemi et al. (2010)	۳۰/۶	۳۹/۳	۴۶/۲	۵۳/۶	۱۵/۸	۲۴/۴
Hasanpour and Rostami (2010)	۲۸/۶	۳۹/۷	۴۸/۷	۵۸/۳	۹/۳	۲۰/۵
Empirical Method (RMR)	۲۹	۳۴	۶۵	۷۰	۲۰	۲۳



شکل ۵. مقایسه رابطه تخمین زده شده با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در مسیر تونل‌های پستاک سد رودبار لرستان با سایر روابط تجربی

پژوهش‌ها استفاده شود.

رابطه (۱۸) $RMR = 5.51 \ln Q + 58.1$; $R^2 = 68\%$

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از یک رابطه به تنهایی نمی‌تواند نتایج مطلوبی ارائه دهد و بهتر است هم زمان

در نهایت رابطه‌ی ۱۸ با ضریب تعیین ۶۸ درصد برای سازندهای مسیر تونل‌های پستاک ارائه شد. با توجه به گسترش سازندهای دالان، هرمز و میلا در مناطق مختلف زاگرس بلند و کالیبره شدن، این رابطه می‌تواند در سایر

۴-۱. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری متداول‌ترین آزمایش سنگ است، که برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و ثابت‌های الاستیک (مدول الاستیک و ضریب پواسون) استفاده می‌شود. مقاومت سنگ بکر به عنوان یک پارامتر اصلی در سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ مورد توجه است (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۲). تعداد ۶۴ آزمایش بر روی نمونه‌های سنگی سازند دالان انجام شده است که تفسیر نتایج حاصله بعد از آنالیز آماری در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک

محوری برای سازند دالان

پارامتر	مینیمم	ماکزیمم	میانگین
مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	۱۶	۱۲۱	۵۹
مدول تغییرشکل‌پذیری (GPa)	۰/۹۸	۲۵	۹/۷
نسبت پواسون	۰/۱۸	۰/۳۲	۰/۲۴

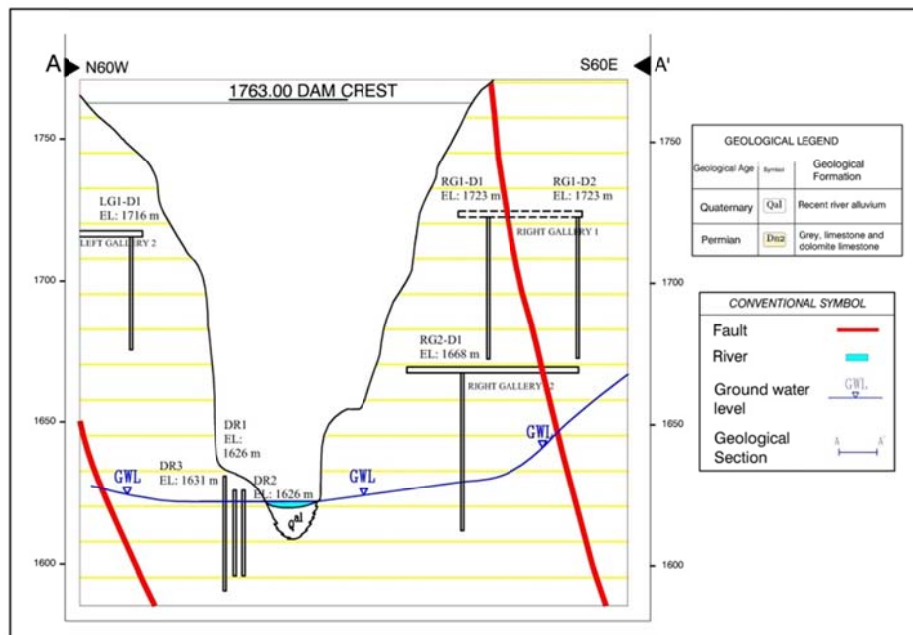
۴-۲. تعیین تغییرشکل‌پذیری سازند دالان توسط دیلاتومتر انعطاف‌پذیر

تغییرشکل‌پذیری توده‌های سنگی نشان دهنده رفتار توده سنگ تحت بارگذاری یا باربرداری می‌باشد و یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی کیفیت سنگ و طراحی پی‌ها، سدها، تونل‌ها و فضاهای بزرگ زیرزمینی است. آزمایش دیلاتومتر یکی از متداول‌ترین آزمایش‌های برجا برای تعیین مدول تغییرشکل توده‌سنگ می‌باشد. در مجموع ۲۹ آزمایش دیلاتومتر در ۷ گمانه در سازند دالان واقع در دیواره و پی سد رودبار لرستان انجام شده است. گمانه LG1-D1 در تکیه‌گاه چپ در گالری LG1، گمانه‌های RG1-D2 و RG1-D1 در تکیه‌گاه راست در گالری RG1 و گمانه‌های RD1, RD2, RD3 در کف دره واقع شده‌اند. موقعیت گالری‌ها و گمانه‌های اکتشافی در ساختگاه سد در شکل ۶ نشان داده شده است (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۵).

از روابط مختلف استفاده شود و در نهایت با کالیبره کردن آن‌ها رابطه منطقی‌تری برای منطقه مورد مطالعه ارائه شود. در بین روابط استفاده شده، رابطه حاصل از برازش نقاط به دست آمده از طبقه‌بندی مهندسی سنگ در منطقه مورد مطالعه، از نظر مقادیر ثابت، بسیار نزدیک به فرمول ارائه شده توسط کومار و همکاران (۲۰۰۴) می‌باشد.

۴. مدول تغییرشکل‌پذیری و خواص مقاومتی توده‌سنگ مسیر تونل‌های پنستاک

مدول تغییرشکل‌پذیری برجا یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیکی توده سنگ می‌باشد و در مدل‌سازی عددی و تحلیلی برای محاسبه جابه‌جایی‌ها و تعیین سیستم نگهداری در توده‌های سنگی کاربرد دارد. اما تعیین مقدار عددی این پارامتر برای توده سنگ از جمله مسائل پیچیده در مکانیک سنگ می‌باشد که همواره با عدم قطعیت‌هایی توأم است. این پارامتر به روش‌های مختلف از جمله آزمایش‌های آزمایشگاهی، برجا و روابط تجربی قابل تخمین است که هر کدام دارای مزایا و معایبی می‌باشند. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری از جمله آزمایش‌های آزمایشگاهی برای تعیین مدول سنگ می‌باشد. این آزمایش نسبتاً ارزان است اما به دلیل این که نمونه مورد آزمایش، گویای خصوصیات سنگ در ابعاد کوچکی است، نتایج حاصل از آن نمی‌تواند معرف توده‌سنگ باشد. آزمایش‌های برجا، قابل اعتمادتر ولی هزینه‌برتر از آزمایش‌های آزمایشگاهی هستند (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۲، Terzaghi, 1946). در این تحقیق مدول تغییرشکل‌پذیری سازند دالان توسط آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا تعیین شد سپس با توجه به نبود آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا برای سازندهای هرمز و میلا، با استفاده از نتایج آزمایش‌های برجا سازند دالان و کالیبره کردن روابط تجربی، مدول تغییرشکل‌پذیری سازند هرمز و میلا نیز ارزیابی شد.



شکل ۶. موقعیت گالری‌ها و گمانه‌های اکتشافی در ساختگاه سد رودبار لرستان

جدول ۷. مدول الاستیک و تغییرشکل پذیری سازند دالان، با

استفاده از نتایج آزمایش‌های دیلاتومتری

پارامتر	مینیمم	ماکزیمم	میانگین
مدول تغییرشکل پذیری (GPa)	۱/۵	۸/۶	۵/۸
مدول الاستیسیته (GPa)	۲/۵	۱۰	۵/۳

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا و مشخص بودن مقدار کیفیت توده سنگ و مکان دقیق آزمایش‌ها، مقادیر حداقل مدول حاصل از آزمایش‌های دیلاتومتری برای سازند دالان گسله و مقادیر حداکثر برای سازند دالان خوب به ترتیب $2/5 - 1/5$ GPa و $8/6 - 6$ در نظر گرفته شد.

۳-۴. تخمین تغییرشکل پذیری سازندهای هرمز و میلا با استفاده از فرمول‌های تجربی

با توجه به اینکه در مسیر این سازندها آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا انجام نشده بود، برای تخمین مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ از روابط تجربی پیشنهادی با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ RMR و GSI استفاده شده. فرمول‌های استفاده شده در جدول ۸ آورده شده است.

تمامی آزمایش‌های انجام شده در سازند دالان واقع شده‌اند. وضعیت تکتونیکی سازند دالان در محور سد بسیار متغیر می‌باشد. سازند دالان عمدتاً توده‌ای است که در بخش‌هایی از آن به شدت گسله شده است. با استفاده از نتایج حاصل از لاگ‌های حفاری و به کمک طبقه‌بندی مهندسی سنگ، سازند دالان به دو مقطع دالان خوب و دالان گسله تقسیم‌بندی شد. سپس با تحلیل نتایج آزمایش‌های دیلاتومتری مقادیر مدول تغییرشکل پذیری و الاستیک سازند دالان تعیین شد، که مقادیر حداقل و حداکثر آن در جدول ۷ آورده شده است.

مدول الاستیسیته و تغییرشکل پذیری دیلاتومتر شعاعی با تفسیر آزمایش‌های برجا و با استفاده از رابطه ۱۹ به دست آمده است (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۲).

$$E_d = (1 + \nu) \cdot D \cdot \frac{\Delta P_i}{\Delta D} \quad (19)$$

که در این رابطه: E_d مدول دیلاتومتری و تری (MPa)؛ P_i افزایش فشار در بخش مورد نظر (MPa)؛ ν ضریب پواسون توده سنگ؛ D قطر گمانه (m) و ΔD میانگین تغییر قطر گمانه (m) است.

جدول ۸. روابط تجربی برای تخمین مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ با استفاده از GSI و RMR

نام محقق یا محققین و سال ارائه	رابطه	ملاحظات	رابطه
Serafim and Pereir (1983)	$E_m = 10^{(RMR-10)/40}$	RMR<50	(۲۰)
Kim and Kyowon (1993)	$E_m = 300 * EXP(0.07RMR) * 10^{-3}$	بدون تأثیر آب	(۲۱)
Aydan (1997)	$E_m = 0.0097 * RMR^{3.45} * 10^{-3}$	-	(۲۲)
Mohammad (1997)	$E_m = 0.562 * RMR + 0.183$	-	(۲۳)
Read (1999)	$E_m = 0.1(RMR/10)^3$	-	(۲۴)
Gokceogluetal. (2003)	$E_m = 0.0736 * EXP(0.0755 * RMR)$	-	(۲۵)
Rahmannezhad (2009)	$E_m = 0.16 RMR$	RMR<50	(۲۶)
	$E_m = 0.052(RMR - 50)^2 + 8$	RMR>50	(۲۷)
Hoek and Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$	$\sigma_{ci} < 100MPa$	(۲۸)
Hoek (2002)	$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$	$\sigma_{ci} \leq 100MPa$	(۲۹)
	$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$	$\sigma_{ci} > 100MPa$	(۳۰)
Hoek (2006)	$E_m = 100 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75+25D-GSI)/11)}}\right)$	-	(۳۱)

در این روابط σ_{ci} : مقاومت فشاری تک‌محوری ماده سنگ و D: فاکتور آشفستگی است.

جدول ۹. مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگی به دست آمده از

روابط تجربی برای سازند دالان گسله (D_F)، هرمز و میلا

(H&M)

پارامتر	نام محقق یا محققین و سال ارائه	مدول تغییرشکل (GPa)		مدول تغییرشکل (GPa)	
		هرمز و میلا		دالان گسله	
		حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
RMR	Serafim and Pereir (1983)	۱/۸	۲/۴	۳	۴
	Kim and Kyowon (1993)	۱/۲	۱/۷	۲/۳	۳/۲
	Aydan (1997)	۰/۳	۰/۶	۱/۱	۱/۹
	Mohammad (1997)	۱۱/۴	۱۴/۲	۱۶/۵	۱۹/۳
	Read (1999)	۰/۸	۱/۵	۲/۴	۳/۹
	Gokceogluetal. (2003)	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۱
	Rahmannezhad (2009)	۳/۲	۴	۴/۶	۵/۴
GSI	Hoek and Brown (1998)	۰/۷	۱	۱/۳	۱/۸
	Hoek (2002)	۰/۶	۰/۷۵	۱	۱/۳
	Hoek (2006)	۰/۹	۲/۴	۳/۷	۵/۷
RocLab	D=0.5 , $m_i=8$	۰/۴	۰/۷۵	۱/۶	۲/۱

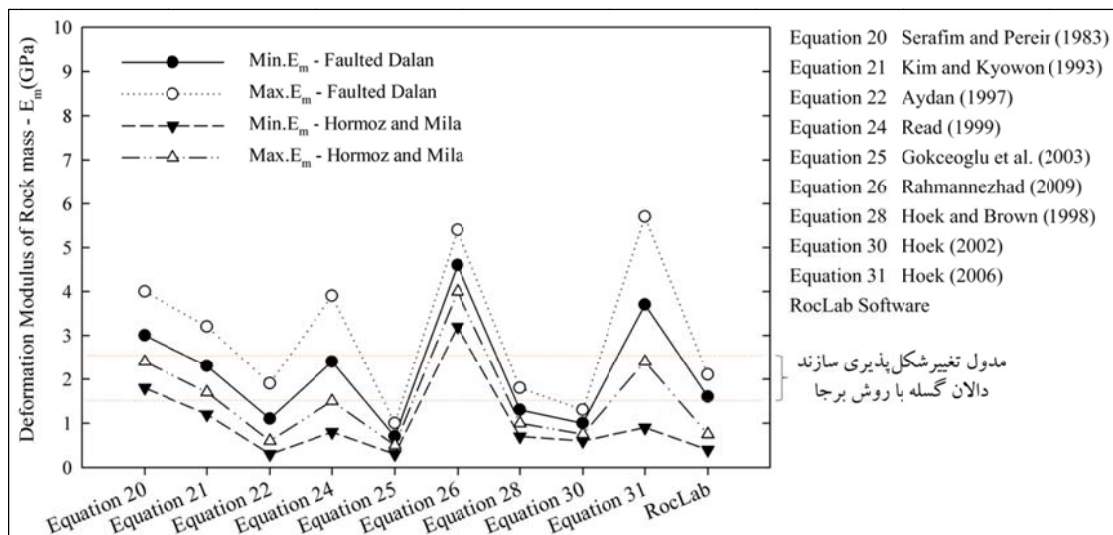
روابط مطرح شده براساس جمع‌آوری داده‌های مربوط به ساختارهای سنگی در نقاط مختلف دنیا ارائه شده‌اند که لزوماً شرایط زمین‌شناختی و وضعیت توده‌سنگ آن‌ها با ساختگاه مورد نظر در هر نقطه دیگر از جمله کشور ما ممکن است متفاوت باشد. به همین دلیل باتوجه به داشتن آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی در سازند دالان ابتدا روابط فوق برای سازند دالان گسله استفاده شد. سازند دالان گسله از نظر تکتونیکی به سازندهای هرمز و میلا که شامل توده‌سنگ ضعیف هستند، نزدیک‌تر است. سپس با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمایش‌های برجا و مقایسه با مقادیر به دست آمده از روابط تجربی، مناسب‌ترین روابط تجربی جهت تخمین مدول، برای سازند میلا و هرمز انتخاب گردید. مقادیر مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ سازندهای دالان گسله و هرمز و میلا با استفاده از روابط تجربی در جدول ۹ آورده شده است.

می‌کند. در نهایت با توجه به شکل ۷ و انتخاب روابط قابل قبول از جدول ۹ و همچنین شرایط زمین‌شناختی و بازدیدهای انجام شده از منطقه، مقدار مدول تغییرشکل‌پذیری برای سازند میلا و هرمز بین $1/5 - 0/6$ GPa تخمین زده شد.

۴-۵. مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی

برای تعیین مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ می‌توان از روش‌های آزمایشگاهی و روابط یا جداول تجربی استفاده کرد. نتایج حاصل از ۱۹ آزمایش سه محوری برای تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سازند دالان در جدول ۱۰ آورده شده است.

با مقایسه نتایج به دست آمده از جدول ۹ و همچنین شرایط منطقه، روند افزایش یا کاهش مقادیر مورد نظر به صورت شکل ۷ آورده شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل، گفته شد که سازندهای هرمز و میلا از نظر رفتاری مشابه سازند دالان گسله هستند و مقدار مدول تغییرشکل آن در بخش ۲-۴ حدود $2/5 - 1/5$ GPa به دست آمد. در شکل ۷ روند رفتاری سازند دالان گسله با نتایج حاصل از آزمایش‌های برجا و مقادیر حاصل از روابط تجربی، روند منطقی را نشان می‌دهد. در بین این روابط، رابطه هوک برای ارزیابی مدول تغییرشکل‌پذیری سنگ‌های ضعیف مناسب‌تر است. رابطه محمد (۱۹۹۷) از تخمین‌ها حذف گردید و رابطه رحمان‌نژاد نیز مقادیر دست بالایی را پیش‌بینی



شکل ۷. تغییرات مدول تغییرشکل‌پذیری توده سنگ سازند دالان گسله، هرمز و میلا

جدول ۱۰. پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های سنگ بکر حاصل از نتایج آزمایش‌های سه محوره برای سازند دالان

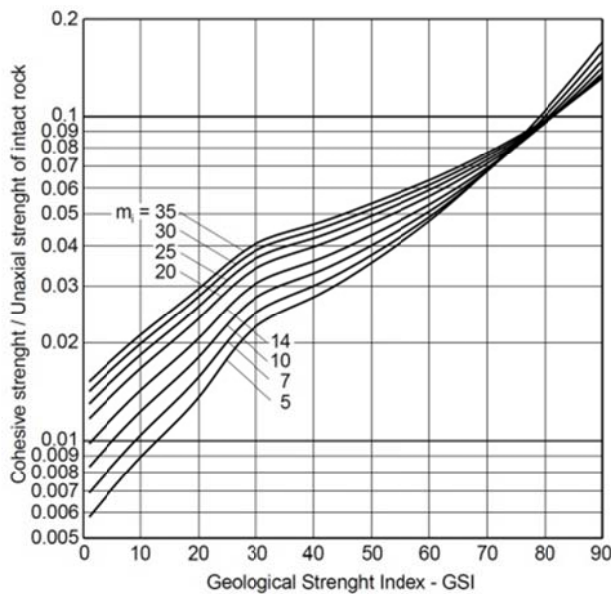
پارامتر	سازند	حداقل	حداکثر	میانگین
چسبندگی (MPa)	دالان گسله	۰/۰۱۲	۰/۲	۰/۱
	دالان خوب	۱	۲۵	۵
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	دالان گسله	۲۵	۴۰	۳۳
	دالان خوب	۳۳	۵۵	۴۶

پارامتر پیشنهاد نمودند که در شکل ۸ آورده شده است (Hoek et al, 1998, Singh and Goel, 1999).

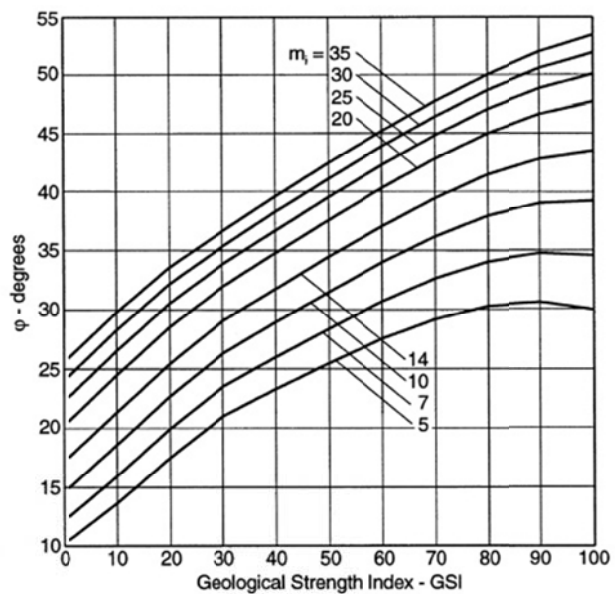
جدول ۱۱ مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی حاصل از طبقه‌بندی RMR را برای کلاس‌های مختلف نشان می‌دهد. هوک و بروان نیز نمودارهایی جهت ارزیابی سریع این دو

جدول ۱۱. مقادیر پیشنهادی چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) توده سنگ با استفاده از RMR (Singh, and Goel, 1999)

RMR					پارامتر
کلاس IV (>20)	کلاس IV (21-40)	کلاس III (41-60)	کلاس II (61-80)	کلاس I (80-100)	
0.1 >	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4	چسبندگی (MPa)
۱۵	۱۵ - ۲۵	۲۵ - ۳۵	۳۵ - ۴۵	>۴۵	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)



ب



الف

شکل ۸. الف) رابطه بین زاویه اصطکاک داخلی و GSI برای مقادیر مختلف m_i ؛ ب) رابطه بین نسبت مقاومت چسبندگی به مقاومت تراکمی تک-محوری سنگ بکر و GSI برای مقادیر مختلف m_i (Hoek et al, 1998)

رودبار لرستان با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی RMR، Q و GSI بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، به چهار ناحیه تقسیم و طبقه‌بندی شد. مقطع دالان خوب (D_G) با توجه به روش RMR در کلاس II و مقاطع دالان گسله (D_F)، میلا، هرمز پستاک بلند و هرمز پستاک کوتاه در کلاس IV قرار گرفتند. روش Q نیز برای D_G ، D_F و M&H به ترتیب ضعیف تا مناسب، خیلی ضعیف و بسیار ضعیف را ارائه داد. مقدار GSI (۳ روش) نیز برای سه ناحیه دالان خوب، دالان گسله، هرمز و میلا به ترتیب ۶۵-۷۰، ۳۵-۴۰ و ۲۰-۳۰ تخمین زده شد.

با استفاده از تحلیل‌های انجام شده و استفاده از نرم‌افزار RocLab و همچنین شرایط حاکم و مشاهدات و برداشت‌های انجام شده از منطقه، پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای سازندهای دالان، هرمز و میلا ارزیابی شد. خلاصه نتایج در جدول ۱۲ آورده شده است.

۵. نتیجه‌گیری

تخمین خواص مقاومتی توده‌سنگی، از مهم‌ترین مباحث در طراحی و مدل‌سازی عددی در پروژه‌های بزرگ ژئوتکنیکی می‌باشد، که این کار با موفقیت برای مسیر تونل‌های پستاک سد رودبار لرستان انجام شد. توده‌سنگ تونل‌های پستاک سد

جدول ۱۲. چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (φ) سازند

دالان، هرمز و میلا			
سازند	روش	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
دالان خوب D _G	آزمایشگاهی	۱ - ۲۵	۳۳ - ۵۵
	جدول RMR	۰/۲ - ۰/۳	۲۵ - ۳۵
	نمودارهای GSI	۴ - ۵	۳۰ - ۳۵
	نرم افزار RocLab	۴ - ۴/۷	۳۰ - ۳۲
دالان گسله D _F	آزمایشگاهی	۰/۰۱۲ - ۰/۲	۲۵ - ۴۰
	جدول RMR	۰/۱ - ۰/۲	۱۵ - ۲۵
	نمودارهای GSI	۰/۶ - ۰/۸	۲۵ - ۳۰
	نرم افزار RocLab	۰/۶ - ۰/۷	۱۹ - ۲۱
هرمز و میلا H & M	آزمایشگاهی	-	-
	جدول RMR	۰/۱ - ۰/۲	۱۵ - ۲۵
	نمودارهای GSI	۰/۱۵ - ۰/۳	۲۰ - ۲۵
	نرم افزار RocLab	۰/۱ - ۰/۲	۱۴ - ۱۸
مقادیر نهایی	۰/۱ - ۰/۲	۱۵ - ۲۵	

ارائه شود. با توجه به داده‌های برداشت شده از منطقه و طبقه‌بندی‌های انجام شده با استفاده از روش‌های RMR، Q و GSI رابطه‌ی ۱۸ بین این پارامترها برای منطقه مورد مطالعه ارائه شد. این رابطه‌ی جدید، با توجه به تکرار این سازندها در منطقه زاگرس بلند می‌تواند در سایر پژوهش‌ها استفاده شود. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا و مشخص بودن مقدار کیفیت توده‌سنگ و مکان دقیق آزمایش‌ها، مقادیر حداقل مدول حاصل از آزمایش‌های دیلاتومتری به دالان گسله و مقادیر حداکثر برای دالان خوب در نظر گرفته شد که این مقادیر به ترتیب ۲/۵ - ۱/۵ و ۸/۶ - ۶ می‌باشند.

در مسیر سازندهای هرمز و میلا آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا انجام نشده بود، با توجه به نتایج آزمایش‌های برجا سازند دالان، فرمول‌ها کالیبره و برای تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری، چسبندگی و زاویه اصطکاک توده‌سنگ از روابط تجربی پیشنهادی با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ GSI و RMR استفاده شد.

نتایج به دست آمده از رابطه RMR-Q نشان داد که استفاده از یک رابطه به تنهایی، نمی‌تواند نتایج مطلوبی ارائه دهد و بهتر است هم زمان از روابط مختلف استفاده شود و در نهایت با کالیبره کردن آن‌ها رابطه منطقی‌تری برای منطقه مورد مطالعه

منابع

- حسن‌پور، ج، رستمی، ج، ۱۳۸۹. عملکرد ماشین‌های تونل‌بری در سنگ سخت. انتشارات نشر فن.
- فرامرزی، ل، ساریخانی خرمی، م، سلیمانی، ک، ۱۳۹۱. تخمین پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های برجای توده سنگ اطراف تونل با استفاده از آنالیز برگشتی و با به کارگیری الگوریتم ژنتیک. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- فهیمی‌فر، ا، سروش، ح، ۱۳۸۲. آزمایش‌های مکانیک سنگ مبانی نظری و استانداردها (آزمایش‌های آزمایشگاهی)، جلد اول، مرکز نشر دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، چاپ اول.
- فهیمی‌فر، ا، سروش، ح، ۱۳۸۲. آزمایش‌های مکانیک سنگ مبانی نظری و استانداردها (آزمایش‌های صحرایی). جلد دوم، مرکز نشر دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، چاپ اول.
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۶. گزارش زمین‌شناسی مهندسی طرح سد و نیروگاه رودبار لرستان، مطالعات مرحله دوم.
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۴. گزارش زمین‌ساخت، لرزه‌خیزی و لرزه زمین‌ساخت در گستره طرح سد و نیروگاه رودبار لرستان. مهندسین مشاور قدس نیرو.
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۵. گزارش سیمای طرح سد و نیروگاه رودبار لرستان. مهندسین مشاور قدس نیرو.
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۵. گزارش آزمایشات دیلاتومتری، طرح سد و نیروگاه رودبار لرستان. مهندسین مشاور قدس نیرو.

- Asef, M.R., Reddish, D.J., Lloyd, P.W., Mitri et al, 2000. Rock-support interaction analysis based on numerical modelling. *Geotech Geol Eng*, 18 (1): 23–37.
- Aydan, O., Dalgic, S., 1998. Prediction of deformation behaviour of 3-lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of North Anatolian Fault Zone (NAFZ). *Regional symposium on sedimentary rock engineering, Taipei*, pp. 228–233
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974 OK. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 6 (4): 189–236.
- Bieniawski, Z. T., 1976. Engineering classification in rock engineering. In: *Proceeding of the symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg*, 97-106.
- Bieniawski, Z.T., 1978. Determining rock mass deformability: experience from case histories. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 15: 237–47.
- Cai, M., Kaiser, P.K., Uno, H., Tasaka, Y., Minami, M., 2004. Estimation of Rock mass deformation modulus and strength of jointed rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, pp. 3-19.
- Deere, .DU., Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rocks. *Technical Report No., Air Force Weapons Laboratory, New Mexico, AFNL-TR- 65-116*.
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., Kayabasi, A., 2003. Predicting the deformation module of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40: 701-710.
- Grimstaad, E., Barton, N., 1993. Updating the Q-system for NMT. *Int. Sym. Sprayed Concert, Fagernes, Norway, Norwegian Concrete Association, Oslo*, pp. 20-28.
- Hashemi, M., Moghaddas, Sh., Ajalloeian, R., 2010. Application of Rock Mass Characterization for Determining the Mechanical Properties of Rock Mass: a Comparative Study. *Rock Mech Rock Eng*, 43: 305–320.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 34 (8): 1165–86.
- Hoek, E., Diederichs, M.S., 2005. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43: 203–215.
- Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M., 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses The case of the Athens Schist Formation. *Bull Eng Geol Env* 57, pp. 151–160.
- Kayabasi, A., Gokceoglu, C., Ercanoglu, M., 2003. Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40: 55–63.
- Kim, K.W., 1993. Revaluation of geotechnical classifications of rock masses. *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference*, pp. 33-40.
- Milne, D., Hadjigerogiou, J., Pakalnis, R., 1998. rock mass characterization for underground Hard Rock Mines. *Tunneling and Underground Space Thechnonogy*.
- Nicholson, G.A., Bieniawski, Z.T., 1990. A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 8: 181–202.
- Palmestrom, A., 1995. RMI – A rock mass characterization system for rock engineering purposes. *Ph.D thesis, University of Oslo, Norway*, 400 P.
- Serafim, J.L., Pereira J.P., 1983. Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski. In: *Proceedings of the Symposium on Engineering Geology and Underground Openings, Lisboa, Portugal*, 1133–44.
- Singh, B., Goel, R.K., 1999. *ROCK MASS CALSSIFICATION A Practical Approach for Civil Engineering*. Elsevier, Netherland.
- 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 & Mining Sciences*, 41: 849–857.

- Terzaghi, K., 1946. Rock defects and loads on tunnel support. In: Proctor, R.V., White, T.L.(Eds.), Rock Tunneling with Steel Supports. Commercial Shearing Co., Youngstown, Ohio, pp. 15-49.
- Wickham, G. E., Tiedeman, H. R., Skinner, E. H., 1972. Support determination based on geological predictions. In: proceedings of the North American Rapid Excavation Tunnelling Conference, American Society of Mechanical Engineering, New York, 43-64.