

بررسی ناپایداری شیب‌های سنگی بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی در منطقه معدنی آلومینای جاجرم

رسول دادخواه^{۱*}، رسول اجل لوثیان^۲، زهرا حسین میرزایی^۳

پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۳/۴

دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۹/۴

چکیده

منطقه معدنی آلومینای جاجرم در شمال کویر جاجرم در حاشیه جنوبی زون تکتونیک کپه‌داغ و در انتهای شرقی البرز شرقی قرار گرفته است. به دلیل شرایط تکتونیک این ناحیه ساختارها و ناپیوستگی‌های متعدد و عمده‌ای در منطقه به وجود آمده است که از جمله مهم‌ترین و بزرگ‌ترین ساختارهای این ناحیه می‌توان به تاقدیس کوه زو اشاره نمود. این تاقدیس عموماً روند شرقی - غربی از خود نشان می‌دهد. در این منطقه سازندهای مبارک با سن کرینفر، سازند الیکا با سن تریاس و سازند شمشک با سن ژوراسیک رخمون پیدا کرده‌اند. ارتفاعات این منطقه دارای روند شمال شرقی - جنوب غربی است که با ساختار تکتونیک البرز شرقی مطابقت دارد. به منظور بررسی ناپایداری و ریزش در این منطقه معدنی، برداشت مشخصات ناپیوستگی‌ها انجام شده و سپس جهت طبقه بندی توده‌های سنگی، از سه روش رده‌بندی ژئومکانیکی (RMR)، شاخص کیفی تونل زنی در سنگ (Q) و اندیس مقاومت زمین‌شناسی (GSI) استفاده شده است. بر اساس طبقه بندی GSI، ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های این منطقه معدنی تعیین شده و در نهایت بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی و ناپیوستگی‌های ساختاری، تحلیل پایداری صورت پذیرفته است. بر اساس این تحلیل عامل اصلی ناپایداری در این محدوده معدنی را می‌توان به تأثیر ناپیوستگی‌های موجود مرتبط دانست.

کلید واژه‌ها: ناپیوستگی‌ها، پارامترهای ژئومکانیکی، RMR، Q، GSI، ناپایداری شیب‌های سنگی، جاجرم

۱. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران rasool.dadkhah@stu.um.ac.ir

۲. گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، ایران

۳. عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، اصفهان

* مسئول مکاتبات

مقدمه

ناپایداری پدید می‌آید. بر اساس برداشت ناپیوستگی‌ها و آنالیز آنها گوه‌های سنگی دارای پتانسیل حرکت به کمک نرم‌افزارهای **slide** و **swedge** مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

اکتشاف، طراحی و تأمین ایمنی شیب‌های سنگی معادن و پایداری درازمدت آن از جمله مسائلی است که باید توسط طراحان مد نظر قرار گیرد، زیرا اجرای ترانشه‌های معدنی در سنگ از جمله مشکل‌ترین و در عین حال پرهزینه‌ترین پروژه‌های مهندسی به حساب می‌آیند و در تحلیل پایداری آنها همواره شناخت همه جانبه مهندس طراح از مسائل زمین‌شناسی، آب‌های زیرزمینی و خواص ژئوتکنیکی سنگ‌ها، ضروری می‌باشد. در بسیاری از مناطق دنیا با اجرای ترانشه‌های سنگی به منظور جاده‌سازی، اکتشاف‌های معدنی و غیره، مشکلات عدیده‌ای ایجاد گردیده است. در این شرایط به منظور پایداری سازی ترانشه‌های سنگی و جلوگیری از خسارت‌های احتمالی به پروژه‌های مشابه، مطالعات زیادی انجام پذیرفته است (نقادهی و همکاران، ۲۰۱۱، گیسچینک و همکاران، ۲۰۱۰، برایدو و همکاران، ۲۰۰۹). منطقه‌ی معدنی آلومینای جاجرم در ۲۰ کیلومتری شهرستان جاجرم در استان خراسان شمالی واقع گردیده است (شکل ۱). این منطقه به ۱۰ جبهه‌کار مستقل (گلبینی ۱ تا ۶ و زو ۱ تا ۴) تقسیم‌بندی شده است. از جمله مشکلات ناپایداری در این محدوده می‌توان به لغزش توده‌های شیلی اشاره کرد. بر همین اساس در این تحقیق بر اساس برداشت‌های زمین‌شناختی و مشاهدات صحرائی، اندیس مقاومت زمین شناسی تعیین شده و با توجه به محدودۀ مقاومت تراکم تک‌محوری سنگ بکر به کمک معیار هوک - براون، پارامترهای ژئومکانیکی برآورد گردیده است. در ادامه بر اساس روش‌های عددی و به کمک نرم افزار $Phase^2$ ، تحلیل پایداری دیواره‌ها انجام شده است. توده‌سنگ‌های این منطقه توسط ۳ سیستم ناپیوستگی قطع گردیده‌اند و در اثر برخورد و تلاقی سطوح این ناپیوستگی‌ها، در دیواره‌های حفاری شده گوه‌ها و یا بلوک‌هایی ایجاد می‌گردد. واژگونی و لغزش گوه‌ای از دیواره‌های ترانشه‌ها عمومی‌ترین نوع ریزشی است که در این ناحیه رخ داده است. پس از اجرای حفاری و برداشت لایه‌های سنگی، نیروهای مقاوم در برابر ریزش و لغزش سنگ حذف شده و احتمال

زمین‌شناسی عمومی

عوامل زمین‌شناختی نقش اساسی در طراحی و ساخت تمامی پروژه‌های اجرایی در سنگ‌ها دارند. وجود نمونه‌های متعددی از پروژه‌هایی که در آن شرایط پایه و اساسی زمین‌شناختی به اندازه کافی شناخته نشده است، باعث افزایش هزینه ساخت و ساز و همچنین صرف زمان زیاد گردیده است (لشکری پور و غفوری، ۲۰۰۲). منطقه مورد مطالعه در زون البرز شرقی واقع شده است. در این منطقه سازندهای مبارک با سن کربنیفر، سازند الیکا با سن تریاس و سازند شمشک با سن ژوراسیک رخمون پیدا کرده‌اند. ارتفاعات این منطقه دارای روند شمال شرقی - جنوب غربی می‌باشد که با ساختار تکتونیکی البرز شرقی مطابقت دارد.

سازند مبارک

کهن‌ترین سازند موجود در محدوده طرح سازند مبارک با سن کربنیفر است. این سازند در این منطقه به صورت تناوبی از

سازند شمشک دارای سن ژوراسیک است. این سازند در محدوده معدن به ۳ قسمت تقسیم شده که قسمت ابتدایی آن عمدتاً ماسه‌سنگی و بر روی زون بوکسیتی B واقع گردیده است. در قسمت دوم شیل‌هایی با رنگ سبز تا خاکستری و کمی آثار زغال دیده می‌شود و در نهایت قسمت سوم شامل تناوبی از شیل و ماسه‌سنگ می‌باشد (شکل ۳).

زمین‌شناسی ساختمانی

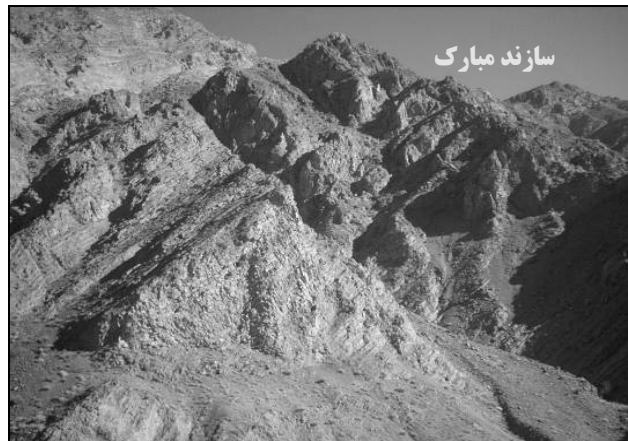
منطقه معدنی آلومینای جاجرم در تاقدیس کوه زو و در شمال کویر جاجرم در حاشیه جنوبی زون تکتونیک کپه‌داغ و در انتهای شرقی البرز شرقی قرار گرفته است. تاقدیس کوه زو دارای روند تقریبی شرقی - غربی است و توسط گسل‌های امتداد لغز متعدد قطع شده است. براساس نظریه پوش گسیختگی موهر-کلمب، هنگامی که جسمی تحت تأثیر نیروهای فشاری قرار گیرد، در امتداد صفحاتی که با امتداد نیروهای اصلی زاویه ۱۵ درجه می‌سازند، خواهد شکست. این صفحات، صفحات برشی نام دارند که در این ناحیه به صورت گسل‌های امتداد لغز ظاهر گردیده‌اند. میزان جابه‌جایی توده‌سنگ‌ها در اثر فعالیت این گسل‌ها در پاره‌ای از قسمت‌های منطقه معدنی جاجرم تا بیش از ۲۰۰ متر نیز مشاهده شده است (شکل ۴). همچنین دایک‌های اولترابازیک رخنمون یافته در این محدوده معدنی نیز راستای تنش اصلی را مشخص می‌نمایند (شکل ۵ و ۶).

با توجه به امتداد گسل‌های راستالغز، راستای تنش فشاری در منطقه شمال غربی - جنوب شرقی می‌باشد. از دیگر گسل‌های این ناحیه می‌توان به گسل‌های معکوس با راستای شمال شرقی - جنوب غربی، اشاره نمود. این گونه از گسل‌ها در حین شکل‌گیری تاقدیس کوه زو تشکیل شده‌اند. لازم به ذکر است تکرار طبقات در این محدوده معدنی را می‌توان ناشی از فعالیت این گونه گسل‌ها دانست (شکل ۷).

لایه‌های سنگ آهک همراه با میان لایه‌های شیلی تا شیل آهکی و سنگ آهک‌های ضخیم لایه گاهی با میان لایه‌های شیلی و در انتها توده‌سنگ‌های دولومیت رخنمون دارد.

سازند الیکا

سازند الیکا با دگرشیبی فرسایشی بر روی سازند مبارک قرار گرفته است. این سازند دارای سن تریاس می‌باشد که بخش زیرین آن را دگرشیبی فرسایشی سرخ شیل تشکیل می‌دهد و بر روی آن سنگ آهک مارنی و سنگ آهک دولومیتی با لایه‌بندی منظم واقع شده است. بخش بالایی این سازند را دولومیت به همراه سنگ آهک ضخیم لایه تشکیل می‌دهد (شکل ۲ و ۳).



شکل ۲: رخنمون توده‌سنگ‌های سازند مبارک در منطقه معدنی (دید به سمت شمال غرب)



شکل ۳: رخنمون توده‌سنگ‌های سازند الیکا در منطقه معدنی (دید به سمت جنوب شرق) سازند شمشک



شکل ۵: رخنمون گسل‌های امتداد لغز به همراه دایک اولترابازیک در منطقه معدنی (دید به سمت جنوب)



شکل ۴: رخنمون گسل امتداد لغز چپ‌گرد با جابه‌جایی بیش از ۲۰۰ متر در منطقه معدنی (دید به سمت جنوب شرق)



شکل ۷: تکرار طبقات در اثر فعالیت گسل‌های معکوس در منطقه (دید به سمت شمال غرب)



شکل ۶: دایک اولترابازیک در منطقه معدنی (دید به سمت جنوب)

که با راستای نیروهای تکتونیکی منطقه زاویه کمتر از ۱۵ درجه می‌سازند و دارای شیب زیاد می‌باشند. بر همین اساس راستای تنش اصلی شمال شرق - جنوب غرب به نظر می‌رسد. همچنین دسته درزه‌های ۳ عمده با گسل‌های تراستی و معکوس موجود در ناحیه موازی‌اند. هوازگی سطح درزه‌ها متوسط تا کم، میزان بازشدگی ۵-۱ میلی‌متر، فاصله‌داری ۲۰۰۰-۲۰۰ میلی‌متر، طول بیش از ۲۰ متر، دارای سطحی

بررسی زمین‌شناسی مهندسی

۱- خصوصیات درزه‌داری توده‌سنگ‌های سازند الیکا

بر اساس اطلاعات موجود و برداشت‌های صحرایی، توده‌سنگ‌های سازند الیکا (در معادن زو و گلینی ۲ و ۶) عمدتاً از سنگ آهک تا دولومیت به همراه لایه‌ای از کائولن تشکیل شده‌اند. توده‌سنگ‌های این سازند دارای ۳ دسته درزه به همراه لایه‌بندی و درزه‌های اتفاقی می‌باشند. امتداد چیره‌ی دسته درزه‌های (۱ و ۲) به موازات گسل‌های امتداد لغزی هستند

جدول ۱: مشخصات ناپیوستگیها در توده‌سنگهای سازند الیکا در محدوده منطقه معدنی

نوع ناپیوستگی	مقدار شیب	جهت شیب	تداوم‌داری (متر)					زبری سطح درزه					
			بیش از ۲۰	۱۱-۲۰	۱-۱۰	۶-۱۰	کمتر از ۱	خیلی زبر	زبر	زبر تا صاف	صاف	خشک لغزش	
درزه ۱	۷۵	۰۸۶	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	۳۰	-	-	۷۰
درزه ۲	۶۷	۲۳۰	۵۰	۵۰	-	-	-	-	-	۶۰	-	۲۰	۲۰
درزه ۳	۵۳	۳۴۹	۵۰	۵۰	-	-	-	-	-	-	-	۲۰	۵۰
لایه‌بندی	۳۵ - ۴۰	۳۵۰	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

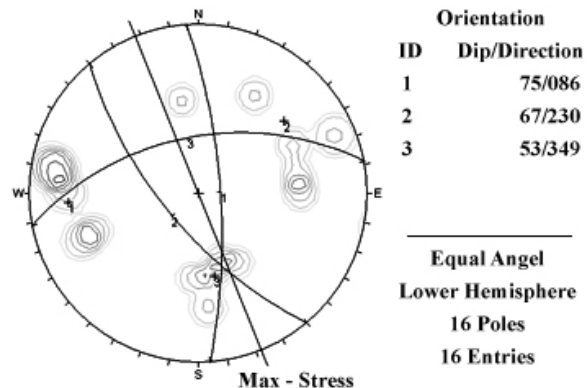
نوع ناپیوستگی	بازشدگی (میلیمتر)				چینه	پرشدگی (میلیمتر)				فاصله‌داری (میلیمتر)			
	بیش از ۵	۲-۵	۰/۲-۱	کمتر از ۰/۱		رس	کلسیت		کمتر از ۶۰	۹۱-۲۰۰	۲۰۱-۹۰۰	۲۰۱-۹۰۰	بیش از ۲۰۰۰
							بیش از ۵	کمتر از ۵					
درزه ۱	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۰	۸۰	-
درزه ۲	۵۰	۵۰	-	-	-	-	۵۰	۵۰	-	-	۲۰	۸۰	-
درزه ۳	۵۰	۵۰	-	-	-	-	۵۰	۵۰	-	-	-	۸۰	۲۰
لایه‌بندی	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۰۰	-	-

* خصوصیات ناپیوستگی‌ها در جدول به صورت درصد فراوانی نشان داده شده است.

۲- خصوصیات درزه‌داری توده‌سنگهای سازند شمشک

بر اساس برداشت‌های صحرایی و پیمایش‌های زمین‌شناختی، سنگ‌شناسی عمده سازند شمشک در این منطقه معدنی (در معادن گلبینی ۲ و ۶) شامل تناوبی از انواع شیل، ماسه‌سنگ و لای سنگ است. این توده‌سنگ‌ها دارای ۳ دسته درزه به همراه لایه‌بندی و درزه‌های اتفاقی می‌باشند. درزه‌های موجود در توده‌سنگ‌های سازند شمشک دارای فاصله‌داری بسیار کمتری می‌باشند. درزه‌ها دارای هوازگی متوسط تا بالا، بازشدگی ۵-۱ میلی‌متر، فاصله داری ۲۰۰-۶۰ میلی‌متر، طول کمتر از ۲۰ متر، دارای سطحی صاف، پرکننده رسی دارای حالت نرم و از لحاظ رطوبت دارای حالت خشک تا کمی مرطوب می‌باشد (جدول ۲ و شکل ۹).

صاف همراه با خشک لغزش، پرکننده کلسیتی - رسی دارای حالت نرم تا کمی سخت و از لحاظ رطوبت خشک است (جدول ۱ و شکل ۸).



شکل ۸: تصویر استریوگرافی ناپیوستگیهای موجود در

توده‌سنگهای سازند الیکا

جدول ۲: مشخصات ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ‌های سازند شمشک در محدوده منطقه معدنی

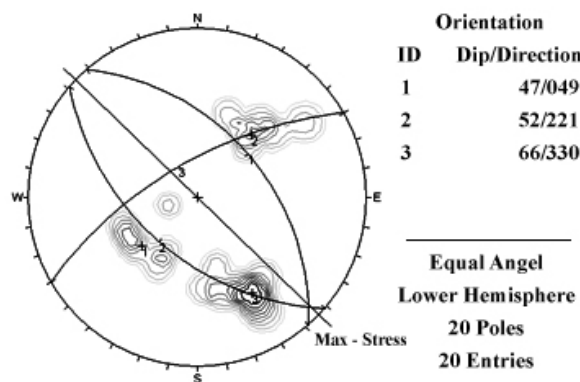
زبری سطح درزه					تداوم‌داری					جهت شیب	مقدار شیب	نوع ناپیوستگی
خش‌لغزش	صاف	زبر تا صاف	زبر	خیلی زبر	کمتر از ۱	۱-۲	۲-۳	۳-۴	بیش از ۴			
۸۰	-	-	-	-	-	۵۰	۵۰	-	۲۰	۰۴۹	۴۷	درزه ۱
۵۰	۵۰	-	-	-	۵۰	۵۰	-	-	۲۰	۲۲۱	۵۲	درزه ۲
۹۰	-	۱۰	-	-	-	۱۰۰	-	-	۱۰	۳۳۰	۶۶	درزه ۳
-	-	-	-	-	-	-	-	۱۰۰	۵۰	۳۵۰	۳۵-۴۰	لایه‌بندی

فاصله‌داری (میلی متر)					پرش‌دگی (میلی متر)				بازشدگی (میلی متر)				ناپیوستگی	
بیش از ۲۰۰۰	۲۰۰۰-۶۰۰	۶۰۰-۲۰۰	۲۰۰-۹۰	کمتر از ۹۰	تمیز	کلسیت		رس		کمتر از ۰/۱	۰/۱-۱	۱-۵		بیش از ۵
						کمتر از ۵	بیش از ۵	کمتر از ۵	بیش از ۵					
-	-	۱۰۰	-	-	-	-	۵۰	۵۰	-	-	-	۱۰۰	-	درزه ۱
-	-	۱۰۰	-	-	-	۵۰	۵۰	-	-	-	۵۰	۵۰	-	درزه ۲
-	-	۱۰۰	-	-	-	-	۳۰	۷۰	-	-	۵۰	۵۰	-	درزه ۳
-	-	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	لایه‌بندی

* خصوصیات ناپیوستگیها در جدول به صورت درصد فراوانی نشان داده شده است.

طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ‌ها

در چند دهه اخیر رده‌بندی توده سنگ مبنایی جهت طراحی سازه‌های موجود در سنگ از جمله تونل‌ها، مغارها، فونداسیون‌ها و غیره واقع گردیده است (از جمله پل و برتوزی، ۲۰۰۷، حسنی و همکاران، ۲۰۰۸، پتالدیس، ۲۰۰۹). به منظور طبقه‌بندی توده‌سنگ‌ها از طبقه‌بندی ژئومکانیکی (RMR) (بیناوسکی، ۱۹۸۶)، شاخص کیفی تونل زنی در سنگ (Q) (بارتون و همکاران، ۱۹۷۴) و اندیس مقاومت زمین‌شناسی (GSI) (مارینوس، ۲۰۰۷) استفاده گردیده است. میانگین و محدوده RMR, Q و GSI به دست آمده برای توده‌سنگ‌های موجود در منطقه در جدول ۳ آورده شده است (اجل‌لوئیان و محمدی، ۱۳۸۲).



شکل ۹: تصویر استریوگرافی ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ‌های سازند شمشک

جدول ۳: طبقه بندی توده سنگهای موجود در منطقه معدنی آلومینای جاجرم (* میانگین عددی)

مقادیر توده سنگ	RMR	Q	GSI
سازند الیکا	۳۷ - ۵۲ ۴۴*	۲/۶۳ - ۲/۷۲ ۲/۶۷*	۵۷ - ۶۸ ۶۲*
سازند شمشک	۳۰ - ۴۱ ۳۵*	۰/۶۷ - ۱/۳۴ ۱/۰۰*	۳۳ - ۴۱ ۳۷*

برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ

یکی از اهداف اصلی یک طرح مهندسی مانند طرح استخراج معادن روباز، اجرای بهترین روش حفاری است. به منظور تحلیل و بررسی پایداری این گونه پروژه‌ها، شناخت ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل پذیری توده سنگ‌ها از اهداف اصلی می‌باشد. در چند دهه اخیر استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ جهت تخمین و برآورد پارامترهای مقاومتی از جمله مدول الاستیسیته به دلیل سادگی و کم هزینه بودن و همچنین دقت نسبتاً بالا مورد توجه خاصی واقع گردیده است (کای و همکاران، ۲۰۰۷؛ جاستو و همکاران، ۲۰۱۰). پارامترهای ژئومکانیکی تعیین شده بر اساس روش‌های تجربی به عنوان پایه و اساس، جهت تحلیل و طراحی به کار برده می‌شوند. به همین دلیل برداشت ناپیوستگی‌ها در هنگام پیمایش‌های زمین‌شناختی باید با دقت کافی انجام گیرد. آنالیز توده سنگ‌هایی که دارای ناپیوستگی‌های ساختاری هستند، عمدتاً به مبانی تئوری و تجربی قوی نیاز دارد (اجل لوئیان و همکاران، ۱۳۸۸).

معیار هوک-براون در سال ۱۹۸۰ جهت برآورد پارامترهای مقاومتی ارائه گردید. این معیار حاصل نتایج تحقیقات بر روی گسیختگی سنگ بکر (توسط هوک) و مطالعات بر روی رفتار توده سنگ‌های درزه‌دار (توسط براون) می‌باشد. ملاک هوک-براون فقط در سنگ‌های بکر یا توده سنگ‌های شدیداً درزه‌دار هستند و می‌توان آنها را همگن و ایزوتروپ فرض کرد قابل استفاده است. جهت برآورد پارامترهای مقاومتی توده

سنگ‌های موجود در این منطقه از آخرین نسخه این معیار استفاده شده است (هوک و همکاران، ۲۰۰۲). معیار تعمیم یافته هوک - براون برای تعیین نحوه گسیختگی توده سنگ‌های درزه‌دار، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta_1 = \delta_3 + \delta_{ci} \left(m_b \frac{\delta_3}{\delta_{ci}} + s \right)^a$$

در معادله فوق σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل در زمان گسیختگی می‌باشند. σ_{ci} ، مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر و m_b ضریب ثابتی است که به وضعیت توده سنگ بستگی دارد. ثابت ماده سنگ که از جدول ۳-۸ هوک و همکاران (۱۹۹۵) استخراج گردیده است. a و s ثابتهای توده سنگ می‌باشند که توسط روابط ذیل می‌توان این ثابت‌ها را تعیین نمود (هوک و همکاران، ۲۰۰۲):

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{GSI/15} - e^{-20/30} \right)$$

مقاومت فشارشی و کششی تک محوره توده سنگ (δ_{cm} & δ_t)

بر اساس معیار تعدیل یافته هوک میزان مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ با قرار دادن $\delta_3 = 0$ در رابطه ذیل محاسبه می‌گردد (هوک و همکاران، ۲۰۰۲):

$$\delta_{cm} = \delta_{ci} \cdot s^a$$

اگر در معیار تعدیل یافته هوک-براون میزان $\delta_1 = \delta_3 = \delta_t$ قرار داده شود، مقدار مقاومت کششی با رابطه ذیل قابل محاسبه می‌باشد (هوک و همکاران، ۲۰۰۲):

$$\delta_t = -\frac{s \delta_{ci}}{m_b}$$

مدول تغییر شکل توده سنگ (Em)

هوک و دیدریکس (۲۰۰۷) بر اساس فاکتور بهم ریختگی معادله ذیل را برای تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ ارائه نمودند. در رابطه مدول الاستیسیته سنگ بکر ارایه شده

بر اساس نسبت مدولی و مقاومت تک محوری سنگ بکر بیان گردیده است.

$$E_{rm} (MPa) = E_i \left(0.02 + \frac{1-D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$$

بر اساس برداشت‌های صحرایی و با در نظر گرفتن شرایط درزه داری توده‌سنگ‌های سازند الیکا و سازند شمشک محدوده معدن^۱ میزان پارامترهای ژئومکانیکی تعیین گردیده است، که نتایج حاصله در جدول شماره (۴) نشان داده شده است.

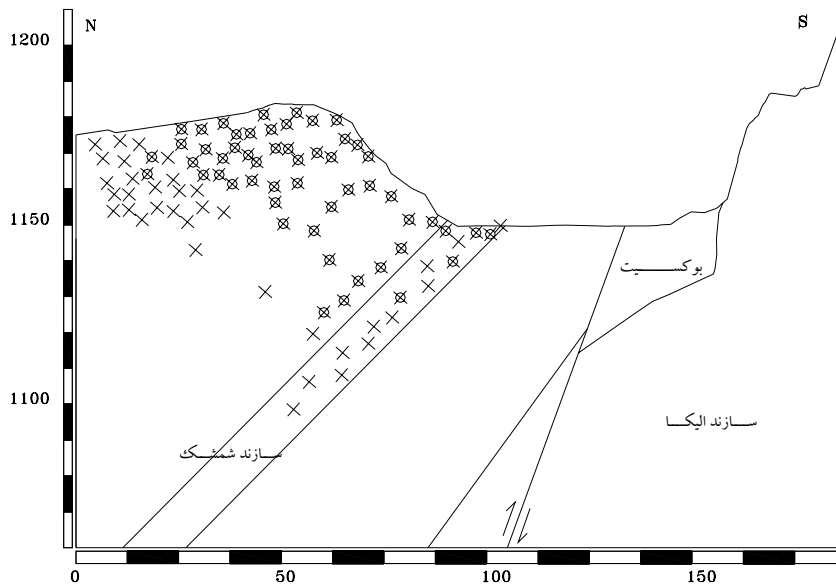
جدول ۴: پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های سازند الیکا و شمشک در منطقه معدنی

توده‌سنگ‌های سازند شمشک			توده‌سنگ‌های سازند الیکا			پارامتر	
میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل		
۳۷	۴۱	۳۳	۶۲	۶۸	۵۷	اندیس مقاومت زمین شناسی GSI	
۳۰	۵۰	۱۵	۱۰۰	۱۲۵	۷۵	مقاومت تراکمی تک محوری سنگ بکر (مگاپاسکال)	
۱۲	۱۴	۸	۱۲	۱۴	۱۰	ثابت سنگ بکر (m _i)	
۰/۵۹۷	۰/۸۳۴	۰/۳۲۹	۱/۴۸۹	۳/۰۵۰	۱/۲۹	مکان تغییر زاویه	m _b
۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۴۸	۰/۰۱۴	۰/۰۰۳		s
۰/۵۱۴	۰/۵۱۱	۰/۵۱۸	۰/۵۰۳	۰/۵۰۲	۰/۵۰۴		a
۰/۵۴۵	۰/۵۷	۰/۵۱۱	۰/۵۲۲	۱/۲۴۴	۱/۱۳۹	حد بالایی تنش محصور کننده σ_{3max} (مگاپاسکال)	
۰/۱۸۹	۰/۲۵۲	۰/۱۲۷	۱/۱۴۱	۱/۹۱۹	۰/۷۵۸	چسبندگی توده‌سنگ (مگاپاسکال)	
۴۴/۷۹	۴۹/۸۴	۳۶/۵۹	۵۸/۰۷	۵۸/۴۶	۵۰/۵۱	زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ (درجه)	
-۰/۰۱۴	-۰/۰۲	-۰/۰۱	-۰/۴۰۵	-۰/۵۸	-۰/۱۹	پارامترهای توده‌سنگ	مقاومت کششی توده‌سنگ (مگاپاسکال)
۰/۴۹۴	۰/۹	۰/۲۴۴	۸/۵۵۵	۱۴/۷۰۶	۴/۱۸۱		مقاومت تراکم تک محوری توده‌سنگ (مگاپاسکال)
۳/۵۷۷	۵/۸۶۶	۱/۷۳۷	۲۱/۰۲	۳۰/۸۱	۱۱/۵۹		مقاومت تراکمی توده‌سنگ (مگاپاسکال)
۲۱۵۸	۳۱۵۸	۱۴۰۹	۱۳۳۳۷	۲۱۱۳۷	۹۷۱۸		مدول الاستیسیته توده‌سنگ (مگاپاسکال)

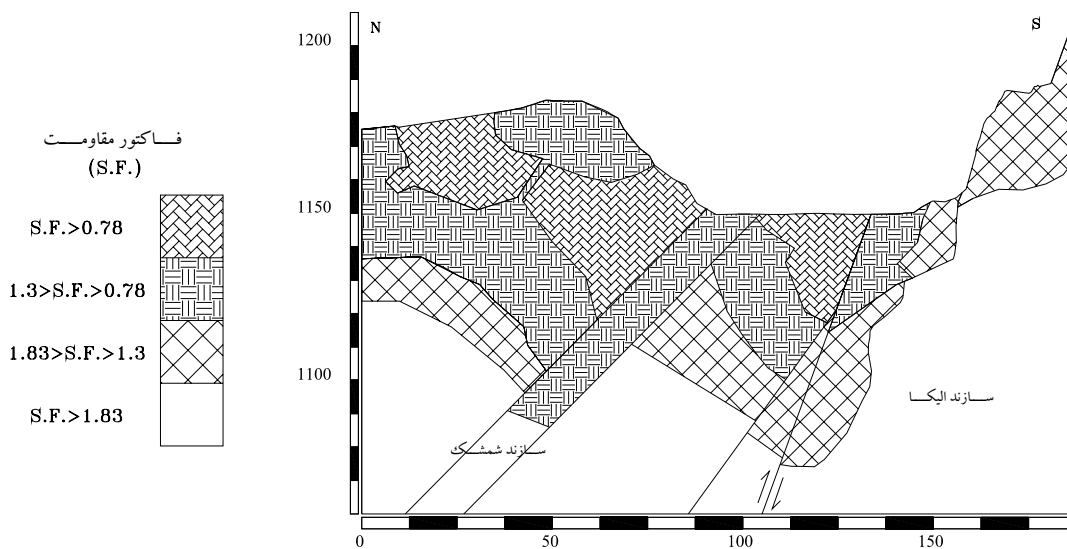
بررسی ناپایداری در معادن منطقه مورد مطالعه

به منظور تحلیل و آنالیز دیواره معدن، می‌توان میزان جابه‌جایی در راستای محور معدن را ناچیز در نظر گرفت و آن را به صورت دو بعدی و بر اساس روش ترکیبی با استفاده از نرم‌افزار Phase² تحلیل نمود. پس از اجرای حفاری و برهم خوردن شرایط تنش در منطقه ملاحظه می‌گردد که در

فاصله محدودی از فضای حفاری شده تمرکز تنش ایجاد شده است. در نزدیکی فضای حفاری شده به دلیل ایجاد فضای آزاد، تنش‌های کششی و برشی ایجاد گردیده که در نهایت بر اساس پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ‌های دیواره‌های معدن، گسیختگی‌هایی کششی و برشی به وجود می‌آید که این موضوع در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



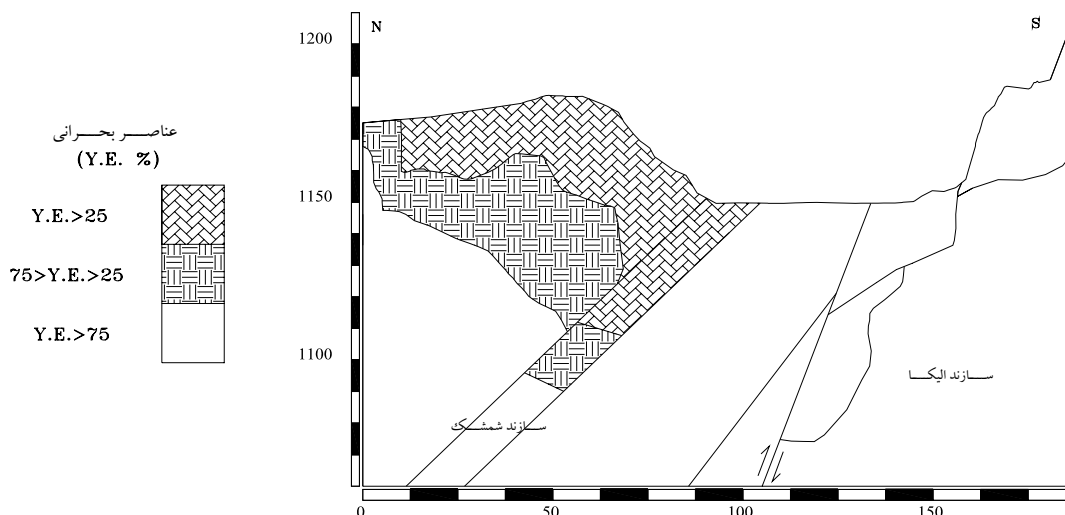
شکل ۱۰: گسیختگی‌های برشی (x) و کششی (o) حاصل از حفاری معدن گلپینی ۲



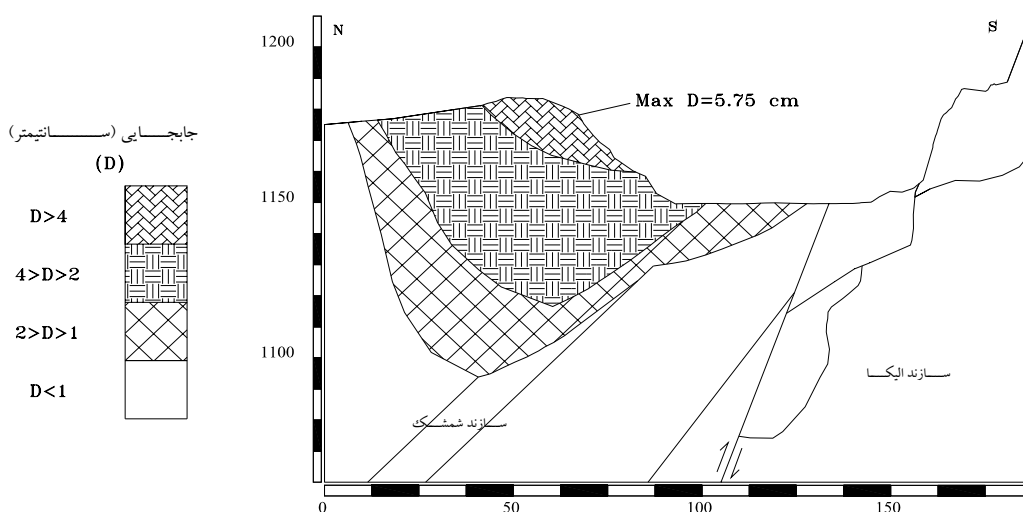
شکل ۱۱: ضریب اطمینان در اطراف معدن پس از حفاری معدن گلپینی ۲

در شکل ۱۲ نقاط بحرانی که احتمال گسیختگی دارند مشخص گردیده است. با در نظر گرفتن شرایط تنش موجود در منطقه و تمرکز یابی تنش و همچنین حداقل ضریب اطمینان، احتمال خطر در توده سنگ برآورد گردیده است. اگر نقاطی از توده سنگ که تحت تأثیر قرار نگرفته‌اند از لحاظ احتمال خطر صفر در نظر گرفته شود، احتمال خطر در دیواره شیلی بسیار بالاست.

پس از اجرای حفاری، وضعیت تنش‌های موجود بر هم خواهد خورد. بر همین اساس به منظور رسیدن به حالت تعادل در منطقه تمرکز تنش ایجاد خواهد شد که این عامل می‌تواند یکی از عوامل ناپایداری و ریزش در دیواره‌های معدن باشد. با در نظر گرفتن شرایط تنش و مقاومت تراکمی توده سنگ ملاحظه می‌گردد که کمترین ضریب اطمینان که نشان دهنده شرایط مرزی از لحاظ پایداری است برابر با ۱/۰۴ می‌باشد (شکل ۱۱).



شکل ۱۲: نقاط بحرانی و محتمل لغزش توده‌های توده‌سنگ‌های موجود در معدن گلپینی ۲



شکل ۱۳: میزان جابه‌جایی در توده‌سنگ‌های در برگیرنده معدن گلپینی ۲

حاصل از تحلیل و میزان جابه‌جایی توده‌های شیلی برآورد شده مقایسه و ملاحظه نمود که با توجه به پایین بودن پارامترهای ژئومکانیکی در صورت ایجاد ترانشه‌های با شیب بیش از ۴۵ درجه در دیواره‌های شیلی ریزش و لغزش در آنها ایجاد خواهد شد. در دیواره جنوبی معدن ریزش‌های توده‌ای ملاحظه نمی‌شود که این موضوع در نتایج تحلیل این معدن مشخص شده است.

مهمترین پارامتر در ناپایداری دیواره‌های معدن میزان جابه‌جایی در اطراف آن است. بیشترین جابه‌جایی در توده‌سنگ‌های شیلی و برابر با $10^{-2} \times 5/75$ متر است. همان گونه که در شکل ملاحظه می‌گردد، میزان جابه‌جایی نسبتاً قابل توجه می‌باشد که مؤید شرایط ناپایدار در دیواره شمالی است (شکل ۱۳). با توجه به شکل ۱۴ و ۱۵ می‌توان لغزش و حرکت توده‌سنگ‌های موجود در دیواره شیلی را با نتایج



شکل ۱۵: نمونه‌ای از لغزش توده‌های شیلی در دیواره شمالی معدن گلبینی ۲ جبهه کار ۲



شکل ۱۴: نمونه‌ای از لغزش توده‌های شیلی در دیواره شمالی معدن گلبینی ۲ جبهه کار ۱



شکل ۱۷: سقوط بلوک سنگی در جبهه کار معدن



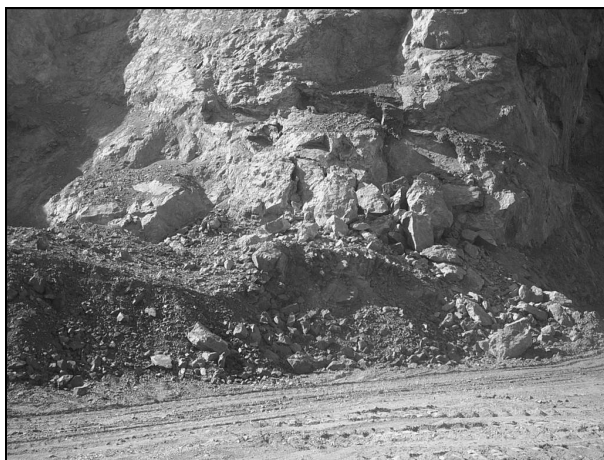
شکل ۱۶: ریزش بلوک‌های سنگی در جبهه کار معدن زو ۲

جهت بزرگترین شیب گسل‌های معکوس در این منطقه شمالی است بدین گونه که در اثر وجود نیروهای فشارشی در منطقه تاقدیس کوه زو شکل گرفته است و به دلیل کمبود فضا، لایه‌های سنگی سازنده‌های موجود در این ناحیه بر روی همدیگر رانده شده و این گونه گسل‌ها به صورت بین لایه‌ای تشکیل شده‌اند. شیب این گسل‌ها بیش از ۵۰ درجه است و به همراه ناپیوستگی‌های برشی موجود در ناحیه باعث به وجود آمدن بلوک‌های سنگی در سینه کار معدن زو ۲ شده‌اند که لازم است به دقت شناسایی و پس از آنالیز ناپایداری، سیستم نگهدارنده مناسب برای آنها طراحی و اجرا گردد.

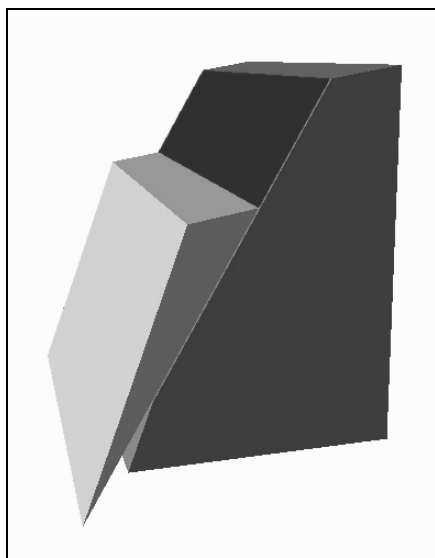
از جمله ناپایداری‌های محتمل سقوط و ریزش، گوه‌ها و بلوک‌هایی است که وزن نسبتاً بالایی دارند. در شکل‌های ۱۶ تا

در این تحقیق عوامل مؤثر در سقوط بلوک‌های سنگی موجود و مشخص نمودن توده‌های سست و گوه‌ها و بلوک‌های سنگی محتمل ریزش، مورد بررسی و ارزیابی واقع گردیده است. همان‌گونه که در برداشت‌های زمین‌شناسی مهندسی و پیمایش‌های صحرائی ملاحظه گردید، این ناحیه عمدتاً دارای ۳ دسته درزه و لایه‌بندی می‌باشد. تراکم ناپیوستگی‌های موجود در توده‌های سنگی بسته به نوع سنگ، شدت و ضعف نشان می‌دهد. در اثر برخورد این ناپیوستگی‌ها به همدیگر گوه‌ها و بلوک‌های سنگی تشکیل شده است که این گوه‌ها پس از ایجاد پله در معدن و همچنین به دلیل وجود گسل‌های معکوس امکان لغزش و سقوط پیدا خواهند نمود.

همچنین در شکل ۲۰ نمونه ای از لغزش صفحه‌ای بلوک‌های سنگی در دیواره جنوبی معدن نشان داده شده است که این بلوک بر اساس برداشت‌های زمین‌شناسی و پیمایش‌های صحرایی در شکل ۲۱ مدل شده است.



شکل ۲۰: لغزش بلوک‌های سنگی در دیواره جنوبی معدن گلپینی ۶



شکل ۲۱: بلوک سنگی مدل شده در دیواره جنوبی معدن گلپینی ۶

نتیجه‌گیری

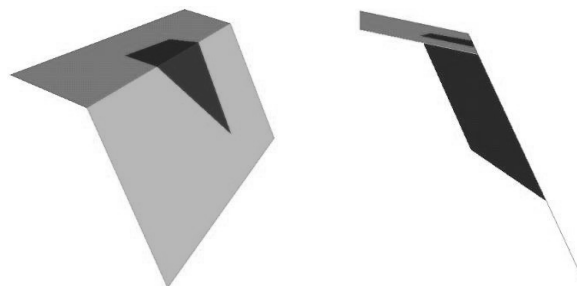
پس از تحلیل پایداری می‌توان دریافت که در دیواره‌های جنوبی معدن به دلیل بالا بودن پارامترهای مقاومتی (از جمله مقاومت کششی، مقاومت تراکمی و مدول الاستیسیته توده سنگ) و فاصله‌داری بالا در ناپیوستگی‌های موجود، امکان گسیختگی‌های توده‌ای وجود نخواهد داشت ولی ناپایداری‌های گوه‌ای محتمل خواهد بود، اما در دیواره شمالی

۱۸ نمونه‌هایی از سقوط از بلوک‌های سنگی در محدوده معدنی جاجرم نشان داده شده است. پس از اجرای ترانشه و ایجاد پله در معدن، ناپیوستگی‌های موجود در معرض هوازگی واقع می‌شوند. در فصول بارندگی و سرد با نفوذ آب در بین دیواره این ناپیوستگی و یخ زدگی فشار یخ باعث حرکت و در نهایت سقوط این گوه‌ها گردیده‌اند.



شکل ۱۸: سقوط بلوک سنگی از دیواره معدن گلپینی ۶

بر اساس پیمایش‌های زمین‌شناختی در این محدوده معدنی، ناپیوستگی‌های به وجودآورنده گوه‌های سنگی شناسایی شده‌اند. بر همین اساس و با تعیین اندیس مقاومت زمین‌شناسی و استفاده از معیار هوک - براون، پارامترهای ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها تعیین شده و در ادامه به کمک نرم‌افزار Swedge مدل‌سازی صورت پذیرفته است (شکل ۱۹).



شکل ۱۹: مدل‌سازی بلوک‌های سنگی در دیواره جنوبی معدن

گلپینی ۶

به منظور جلوگیری از نفوذ آب و کاهش اثر عوامل هوازدگی در بین دیواره ناپیوستگی‌های توده‌های سنگی، پس از اجرای ترانشه و ایجاد پله در معدن اجرای یک لایه شاتکریت باعث جلوگیری از هوازدگی و در نهایت سقوط گوه‌ها خواهد نمود. در دیواره شمالی معدن به دلیل پایین بودن پارامترهای ژئومکانیکی و فاصله‌داری کم ناپیوستگی، ناپایداری اغلب به صورت ریزش و لغزش توده‌ای خواهد بود. بنابراین در صورت گودبرداری و حفاری در این توده سنگ‌ها باید ترانشه‌های با شیب کمتر از ۴۵ درجه اجرا شود.

معدن به دلیل ضعیف بودن پارامترهای ژئومکانیکی و فراوانی درزه‌ها در توده‌سنگ‌ها، ریزش و لغزش‌های توده‌ای در نتایج تحلیل پایداری دیده می‌گردد.

در دیواره جنوبی، عمده ناپایداری به صورت سقوط و لغزش بلوک‌ها و گوه‌های سنگی در اثر تقاطع درزه‌های برشی و ناپیوستگی‌های با جهت شیب شمال غربی است. این بلوک‌ها عمدتاً در سطح دیواره‌های گسلی شکل گرفته است که لازم است با توجه به شرایط حاکم در حین حفاری شناسایی شده و لقی‌گیری گردند. لازم به ذکر است که بلوک‌های سنگی در امتداد گسل‌های امتدادلغز جداکننده هر جبهه کار شکل گرفته‌اند.

منابع

اجل لوثیان، ر.، محمدی، د.، ۱۳۸۲. رده‌بندی توده‌سنگ (روش کاربردی در مهندسی عمران). *نشر فن آوران*، ۳۴۹ ص.
 اجل لوثیان، ر.، دادخواه، ر.، حسین میرزایی، ز.، ۱۳۸۸. کاربرد زمین شناسی مهندسی در تونل‌ها. *انتشارات فرهیختگان علوی*، تهران، ۳۳۳ ص.

- Barton, N.R., Lien, R., and Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.*, 6(4): 189-239.
- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications. *Wiley*, New York. 251p.
- Brideau, M.A., Yan, M. and Stead, D. 2009. The role of tectonic damage and brittle rock fracture in the development of large rock slope failures. *Geomorphology*, 103(1), 30-49
- Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y. and Minami, M. 2007. Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system Original Research Article. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 44(2), 247-265.
- Gischig, V., Amann, F., Moore, J.R., Loew, S., Eisenbeiss, H. and Stempfhuber, W. 2010. Composite rock slope kinematics at the current Randa instability, Switzerland, based on remote sensing and numerical modeling. *Engineering Geology*, In Press, Corrected Proof, Available online 29 November 2010.
- Hassani, H., Arshadnejad S., Khodadadi H. and Goodarzi N., 2008. 3D numerical modeling of a couple of power intake shafts and head race tunnels at vicinity of a rock slope in siah bishe pumped storage dam, North of Iran. *J. Applied Sci.*, 8: 4294-4302
- Hoek, E & Diederichs, M.S. 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 203–215. Doi: 10.1016/j.ijrmms.2005.06.005.
- Hoek, E. and Brown, E.T. 1980. *Underground Excavations in Rock*, London, Instn Min. Metall.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., and Corkum, B. 2002. Hoek- Brown failure criterion – 2002 edition. Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto in July 2002.
- Hoek, E., Kaiser, P.K., and Bawden, W.F., 1995. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Balkema, Rotterdam.
- Justo, J.L., Justo, E., Azañón, J.M., Durand, P. and Morales, A. 2010. The Use of Rock Mass Classification Systems to Estimate the Modulus and Strength of Jointed Rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43(3), 377.
- Lashkaripour, G.R., and Ghafouri, M., 2002. The engineering geology of the Tabarak Abad Dam. *Engineering Geology*, 66, 233–239
- Marinos, P., Marinos, V., and Hoek, E., 2007. Geological Strength Index (GSI), A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. *Proceedings of the Rock Mass Classification*

- Workshop, publ: Department of Earth and Human Services, NIOS, Information IC9498, Information circular, Vancouver.
- Naghadehi, M.Z., Jimenez, R., KhaloKakaie, R. and Jalali, S.M.E., 2011. A Probabilistic Systems Methodology to Analyze the Importance of Factors Affecting the Stability of Rock Slopes. Engineering Geology, In Press, Accepted Manuscript, Available online 22 January 2011
- Pantelidis, R., 2009. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 46: 315–325. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.06.003
- Pells, P.J. and Bertuzzi, R., 2007. Discussion on article titled “Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system” by Palmstrom and Broch [Tunnelling and Underground Space Technology, 21 (2006) 575–593]. Tunnelling and Underground Space Technology. 23, 340–350. DOI: 10.1016/j.tust.2007.05.007.