

## ارزیابی سیستم نگهدارنده توده سنگ‌های افیولیت ملانژ در تونل آزاد

مسمن شجاعی، علی ارومیه‌ای\* و هادی شریفی

گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، H\_Shojaei62@yahoo.com, Uromia@yahoo.co.uk

(\* عهده‌دار مکاتبات)

دریافت: ۸۸/۶/۳۰؛ دریافت اصلاح شده: ۸۹/۵/۱۹؛ پذیرش: ۸۹/۶/۳۰؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۰/۳/۹

### مکیده

یکی از مهم‌ترین وظایف مهندسیین طراح سازه‌های زیرزمینی، فراهم نمودن بهترین روش جهت تأمین پایداری سازه با توجه به شرایط و ویژگی‌های ژئوتکنیکی طرح می‌باشد. به دلیل این‌که به دست آوردن پارامترهای دقیق طراحی در روش‌های مختلف، مشکل و پرهزینه است، لذا روش‌های تجربی جهت تحلیل پایداری در سطح وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی، بررسی‌های صحرایی و حفاری گمانه‌های اکتشافی، کیفیت مهندسی توده سنگ‌های افیولیت ملانژی مسیر تونل آزاد بررسی شده است. بعد از انجام طبقه‌بندی‌های مهندسی توده سنگ آر ام آر (RMR)، کیو (Q)، جی اس آی (GSI)، برآوردی از ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ به دست آمده است. سیستم نگهدارنده‌ی مناسب برای تونل با دهانه‌ی ۶ متری با استفاده از روش‌های پیشنهادی بیناوسکی، بارتن و همچنین معیار سینگ و گوئل بر اساس پتانسیل لهیدگی زمین تخمین زده شده و در نهایت پایداری تونل مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** تونل، زمین‌شناسی مهندسی، افیولیت ملانژ، پتانسیل لهیدگی، تحلیل پایداری.

### ۱- مقدمه

سندج-سیرجان و توده سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای ضعیف قرار دارد، (Ghasemi & Talbot 2006, Mazhari et al. 2009). نیمه‌ی دوم تونل نیز با طول حدود ۷ کیلومتر درون زون افیولیت ملانژی زون زاگرس رانده قرار دارد.

به‌طور کلی روش‌های تحلیل و پیشنهاد سیستم نگهدارنده‌ی تونل‌ها را می‌توان در سه دسته روش‌های مشاهده‌ای (Observational)، تحلیلی (Analytical) و روش‌های تجربی (Empirical)، تقسیم‌بندی کرد (Hoek et al. 1998-b). روش مشاهده‌ای براساس اندازه‌گیری حرکات و جابه‌جایی زمین در طول حفاری تونل بوده و روش تحلیلی نیز به بررسی تنش و کرنش اطراف دهانه‌ی تونل می‌پردازد. ولی روش تجربی بر اساس تجزیه و تحلیل آماری پایداری تونل‌های ساخته شده و مطالعات و پیشنهادات محققین تا زمان حال می‌باشد (Singh & Goel 1999).

در این تحقیق لازم است که زمین‌شناس مهندس با روش تجربی، سیستم نگهدارنده‌ی تونل را ارزیابی نماید.

تونل‌زنی در سنگ‌های افیولیت ملانژی به واسطه‌ی داشتن تنوع لیتولوژیکی و تکتونیک بسیار فعالی که تحمل کرده‌اند، از لحاظ زمین‌شناسی مهندسی دارای شرایط ژئوتکنیکی ویژه‌ای است (Bortolotti et al. 2002, Hoek et al. 1998-a). این سنگ‌ها معمولاً چالش‌های فراوانی را برای مهندس طراح به همراه داشته و اندکی اشتباه در طراحی سیستم نگهداری تونل، منجر به گسیختگی و ریزش خواهد شد که اصلاح آن نیاز به وقت و هزینه‌ی زیادی دارد (Hoek et al. 1998-b, Hoek & Marinos 2000).

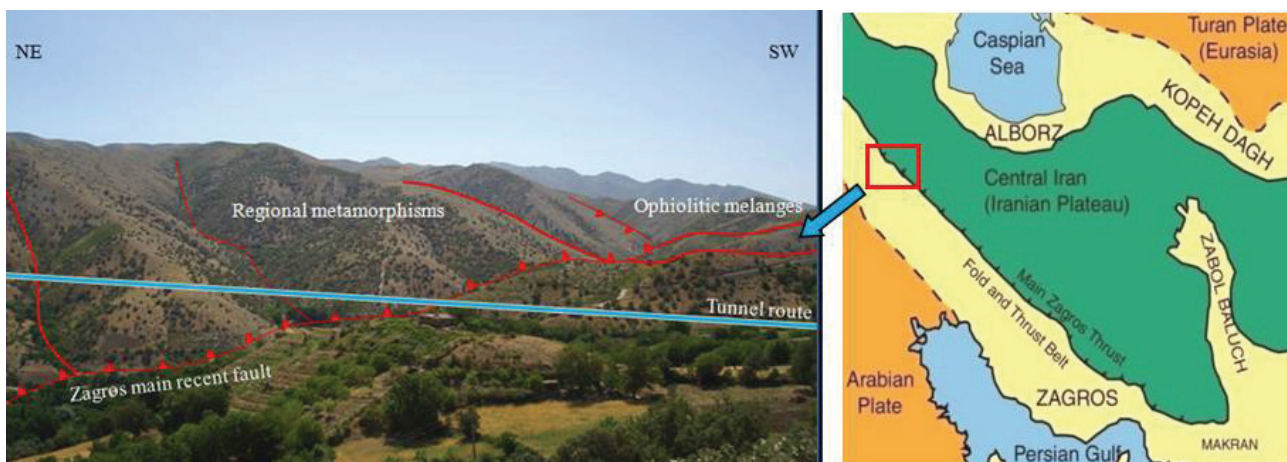
تونل آزاد دارای طول تقریبی ۱۲ کیلومتر و قطر ۶ متر می‌باشد. به دلیل موقعیت خاص تکتونیک این تونل و قرارگیری آن در محل زمین‌درز زاگرس و زون فرورانش صفحه‌عربی به زیر صفحه ایران (Berberian 1995, Regard et al. 2010, Sepehr & Cosgrove 2004)، مسیر تونل به دو بخش کاملاً متفاوت با خصوصیات و رفتار مختلف تقسیم شده است. نیمه‌ی اول تونل درون زون ساختاری

### ۲- زمین‌شناسی مسیر تونل آزاد

بخش دوم تونل آزاد، درون زون ساختاری افیولیت ملانژهای زاگرس رانده قرار دارد که توسط گسل اصلی و جوان زاگرس (شاخه چم پایگلان)، از بخش اول تونل و زون سنندج سیرجان جدا می‌شود (تصویر ۱). این بخش از تونل، شامل پوسته‌ی اقیانوسی قدیمی است که در اثر برخورد دو صفحه‌ی ایران و عربی، فرارانش یافته (آقنات‌ی ۱۳۸۳) و لیتولوژی آن عمدتاً شامل سکانس افیولیتی سنگ‌های الترابازیک تا بازیک همراه با پوشش رسوبی کربناته و آهک‌های ریزدانه و بخش ناچیزی هم ماسه‌سنگ و لای‌سنگ می‌باشد. به‌واسطه‌ی تکتونیک فعال و تنش‌های برجای زیاد منطقه، سیستم‌های ناپیوستگی توسعه زیادی داشته و در بیشتر نقاط مسیر تونل، وسعت زون‌های توده‌سنگ‌های خردشده و گسله قابل ملاحظه است (شجاعی و ارومیه‌ای ۱۳۸۷). مشخصات سیستم‌های اصلی ناپیوستگی‌های توده سنگ‌های افیولیت ملانژی مسیر تونل آزاد در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۳- طبقه‌بندی مهندسی و ارزیابی خصوصیات توده‌سنگ

جهت ارزیابی کمی و کیفی سنگ‌ها، روش‌های متعددی وجود دارد که طبقه‌بندی مهندسی سنگ یکی از رایج‌ترین این روش‌هاست (Basarir 2006). با توجه به تنوع لیتولوژی توده‌سنگ‌های سکانس افیولیت ملانژی، آن‌ها را در ۳ زون ژئوتکنیکی با خصوصیات و رفتار مهندسی تقریباً نزدیک به هم تقسیم‌بندی نموده و به مطالعه‌ی آن‌ها پرداخته شد. زون A شامل سنگ‌های آذرین سکانس افیولیتی، زون B شامل آهک‌ها و رادیولاریت‌ها و زون C نیز ماسه‌سنگ‌ها و لای‌سنگ‌های انتهای مسیر تونل را دربرمی‌گیرد. پس از حفاری ۴ گمانه اکتشافی به طول ۷۷۵ متر درون این ۳ زون، نمونه‌های مناسبی جهت انجام آزمون‌های آزمایشگاهی تهیه شد که خلاصه‌ای از نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. از آن‌جاکه هر سیستم طبقه‌بندی، بر روی پارامترهای متفاوتی تأکید می‌کند، جهت ارزیابی کیفیت مهندسی توده‌سنگ‌های مسیر تونل آزاد، طبقه‌بندی‌های RMR، GSI و Q در طول مسیر تونل انجام شد.



تصویر ۱- موقعیت جغرافیایی و شرایط زمین‌شناسی تونل آزاد

جدول ۱- خصوصیات سیستم‌های ناپیوستگی اصلی توده سنگ‌های مسیر تونل آزاد

رادیولاریتها				توده سنگ‌های آذرین				ماسه سنگ‌ها و لای‌سنگ‌ها		لیتولوژی	
J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	دسته درزه	
۷۵	۷۵	۸۵	۶۵	۸۰	۷۰	۸۰	۷۵	۸۵	شیب	مختصات	
۲۸۵	۱۶۵	۳۲۵	۲۳۰	۲۸۰	۱۹۰	۳۳۵	۲۳۰	۱۳۵	جهت شیب	سیستم‌های ناپیوستگی	

نمایش سیستم‌های ناپیوستگی		

#### ۵- ارزیابی پتانسیل لهدگی زمین

به منظور تعیین شرایط لهدگی و پتانسیل بروز این پدیده، روش‌های کمی و کیفی مختلفی توسط محققین ارائه شده است. روش‌های کیفی (تجربی) بر پایه سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ استوار می‌باشند، ولی در روش‌های کمی شاخص‌هایی جهت ارزیابی پتانسیل لهدگی مورد استفاده قرار می‌گیرد که متداول‌ترین این شاخص‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری توده سنگ و وضعیت تنش‌های برجا (ناشی از سرباره تونل) می‌باشد (Hoek & Marinos 2000). در این تحقیق از بین روش‌های تجربی رایج، روش گوئل و همکاران و از بین روش‌های کمی نیز روش هوک و مارینوس استفاده گردید.

#### ۵-۱- روش گوئل و همکاران

گوئل و همکاران (Goel et al. 1995) به منظور پیش‌بینی وضعیت لهدگی توده سنگ‌ها، از دو پارامتر عمق تونل (H)، شاخص عدد توده سنگ (Q) و قطر دهانه تونل (B) مطابق با رابطه ۱ استفاده نموده و حالت‌های مختلف لهدگی زمین را طبق جدول ۵ معرفی نمودند (Singh & Goel 1999):

$$H = (275N^{0.33})B^{-0.1} \quad (1)$$

#### ۵-۲- روش هوک و مارینوس

در این روش نیز برای ارزیابی پتانسیل لهدگی توده سنگ‌ها از نسبت

نتایج این طبقه‌بندی‌ها به همراه مدول تغییر شکل برجای تخمین زده از طریق آن‌ها در هر ۳ زون ژئوتکنیکی مسیر تونل، در جدول ۲ ارائه شده است. در اغلب تحلیل‌هایی که به هر شکل برای طراحی فضاهای زیرزمینی در توده سنگ صورت می‌گیرد، به ارزیابی معتبر و با ارزشی از خواص مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری توده‌های سنگی نیاز می‌باشد (طاهریان ۱۳۸۱).

به منظور دستیابی تخمینی از پارامترهای مهندسی افیولیت ملائزهای مسیر تونل آزاد علاوه بر نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی از تحلیل مقادیر طبقه‌بندی‌های توده سنگ بدست آمده در محیط نرم‌افزار Rock work استفاده شده است (جدول ۳).

#### ۴- پیش‌بینی سیستم نگهدارنده تونل بر اساس طبقه‌بندی توده سنگ

جهت طراحی سیستم نگهدارنده تونل آزاد درون توده سنگ‌های افیولیت ملائزی، از طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ RMR و Q استفاده شده است (جدول ۴).

از آنجا که سنگ‌های خردشده و تحت تکنیک فعال، دارای پتانسیل زیادی جهت رفتار لهدگی (Squeezing) می‌باشند لذا ارزیابی از پتانسیل لهدگی نیز براساس روش‌های گوئل و همکاران (Goel et al. 1995) و هوک و مارینوس (Hoek & Marinos 2000) صورت گرفته است.

جدول ۲- خصوصیات شاخص و آزمایشگاهی زون‌های ژئوتکنیکی مسیر تونل

ماسه سنگ‌ها و لای سنگ‌ها (زون C)			رادپولاریت‌ها (زون B)			توده سنگ‌های آذرین (زون A)			زون ژئوتکنیکی
E <sub>(m)</sub> Gpa	class	rating	E <sub>(m)</sub> Gpa	class	rating	E <sub>(m)</sub> Gpa	class	rating	رده‌بندی توده سنگ
۶/۶۸	III	۴۳	۱۲	III	۶۱	۷/۴۹	III	۴۵	RMR
۴/۰۴	-	۳۸	۱۴/۲	-	۵۸	۸/۹۴	-	۵۰	GSI
۸/۵۷	poor	۱/۳۴	۱۷/۹	good	۷/۳۳	۹/۴۷	fair	۴/۱۲	Q

جدول ۳- تخمینی از پارامترهای مهندسی سنگ‌های

#### افیولیت ملائزی مسیر تونل آزاد

ماسه سنگ و لای سنگ (C)	آذرین رادیولاریت‌ها (B)	آذرین رادیولاریت‌ها (A)	زون ژئوتکنیکی
۳۱/۴۵	۳۲/۸۶	۳۸/۴۵	زاویه اصطکاک درونی (φ)
۲/۱۹	۴/۵۴	۱/۹۶	مقاومت چسبندگی (Mpa)
۴۵	۸۱	۸۷	مقاومت تک محوری سنگ بکر (Mpa)
۰/۰۲۵	۰/۳۳۷	۰/۰۲۸	مقاومت کششی توده سنگ (Mpa)
۷/۸۳	۱۶/۶۷	۸/۱۵	مقاومت فشاری توده سنگ (Mpa)

مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ ( $\delta_{ci}$ ) به تنش برجا ( $P_0$ ) و میزان کرنش شعاعی جداره تونل ( $\epsilon$ ) استفاده می‌شود. کرنش شعاعی جداره تونل طبق رابطه (۲) که توسط هوک در سال ۲۰۰۰ ارائه شده، قابل محاسبه است (Hoek & Marinos 2000).

#### ۴- تفسیر سیستم نگهدارنده تونل با استفاده از ارزیابی

##### لهیدگی

محققان پس از مطالعات مفصل بر روی شرایط لهیدگی صورت دادند (Singh & Goel 1999)، پیشنهاداتی را جهت حفاری و نگهداری سازه‌های زیرزمینی ارائه دادند. بعد از ارزیابی پتانسیل لهیدگی توده سنگ‌های افیولیت ملانژی مسیر تونل آزاد، حفاری و سیستم نگهدارنده تونل مطابق جدول ۸ ارائه می‌شود.

$$\epsilon_t (\%) = (0.2 - \frac{0.25 \times P_i}{P_0}) \left( \frac{\delta_{cm}}{P_0} \right)^{(2.4 \times (\frac{P_i}{P_0} - 2))} \quad (2)$$

که در این رابطه  $P_i$  فشار وارد بر سیستم نگهدارنده و  $P_0 = \gamma \times h$  تنش برجاست. هوک و مارینوس شرایط لهیدگی زمین را بر اساس نرخ کرنش شعاعی جداره تونل طبق جدول ۶ معرفی نمودند. نهایتاً بر اساس دو روش ارائه شده جهت ارزیابی لهیدگی، پتانسیل لهیدگی

#### جدول ۴- نگهدارنده پیشنهادی تونل درون سکناس افیولیتی براساس طبقه‌بندی RMR و Q

زون ژئوتکنیکی	A	B	C
سیستم نگهدارنده پیشنهادی	RMR	شاتکریت ۵cm در سقف و شاتکریت ۳cm در دیواره	شاتکریت ۵-۱۰cm در سقف و ۳cm در دیواره
پیشنهادی	بالت گذاری منظم ۴ تا ۵ متری و نصب تور سیمی در سقف	بالت گذاری منظم ۳ متری با فاصله بالت گذاری منظم ۴ تا ۵ متری همراه تور سیمی موضعی	بالت گذاری منظم ۴ تا ۵ متری و نصب تور سیمی در سقف
Q	اجرای شاتکریت غیرمسلح ۵cm و اجرای شاتکریت غیرمسلح ۵cm و پیچ سنگ با فاصله ۱/۸ متری	اجرای شاتکریت غیرمسلح ۵cm و پیچ سنگ با فاصله ۲ متری	شاتکریت مسلح فبری با ضخامت ۵mm و نصب پیچ سنگ منظم

#### جدول ۵- وضعیت های مختلف لهیدگی زمین و شرایط وقوع آنها طبق مطالعات گوئل و همکاران (Goel et al. 1995)

عدم لهیدگی	-	$N^{0.33} \cdot B^{-0.1}$
لهیدگی کم	انسداد ۱-۳٪ دهانه تونل	$(275N^{0.33}) B^{-0.1} < H < (450N^{0.33}) B^{-0.1}$
لهیدگی متوسط	انسداد ۳-۵٪ دهانه تونل	$(450N^{0.33}) B^{-0.1} < H < (630N^{0.33}) B^{-0.1}$
لهیدگی زیاد	انسداد > ۵٪ دهانه تونل	$(630N^{0.33}) B^{-0.1} < H$

#### جدول ۶- وضعیت های مختلف لهیدگی زمین و شرایط وقوع آنها طبق مطالعات هوک و مارینوس (۲۰۰۰)

۱	NS	عدم لهیدگی	$\epsilon_t \leq 1$
۲ <th>MS</th> <th>لهیدگی کم</th> <th><math>1 &lt; \epsilon_t \leq 2.5</math></th>	MS	لهیدگی کم	$1 < \epsilon_t \leq 2.5$
۳ <th>SS</th> <th>لهیدگی زیاد</th> <th><math>2.5 &lt; \epsilon_t \leq 5</math></th>	SS	لهیدگی زیاد	$2.5 < \epsilon_t \leq 5$
۴ <th>VSS</th> <th>لهیدگی خیلی زیاد</th> <th><math>5 &lt; \epsilon_t \leq 10</math></th>	VSS	لهیدگی خیلی زیاد	$5 < \epsilon_t \leq 10$
۵ <th>ES</th> <th>لهیدگی شدید</th> <th><math>\epsilon_t &gt; 10</math></th>	ES	لهیدگی شدید	$\epsilon_t > 10$

#### جدول ۷- پتانسیل لهیدگی توده سنگ‌های مسیر تونل آزاد

زون	ضخامت روباره (m)	روش هوک و مارینوس				روش گوئل و همکاران		پتانسیل لهیدگی	
		$P_0$	$P_i$	$\delta_{cm}$	$\epsilon_t$	N	$N^{0.33} B^{-0.1}$	هوک	گوئل
A	۱۸	۸/۲۸	۱۴/۸	۰/۴۶	۱/۰۹	۰/۷۲	۰/۷۴۶	لهیدگی کم	لهیدگی کم
B	۲۷	۱۶/۳۲	۲۶/۷	۷/۷۸	۰/۳۹	۱۰	۱/۷۷	عدم لهیدگی	لهیدگی کم
C	۳۰	۱۴/۶۳	۲۴/۲	۲/۶۸	۰/۸۷	۸/۶۶	۱/۶۹	عدم لهیدگی	عدم لهیدگی

جدول ۸- تخمین حفاری و نگهداری جهت توده سنگ‌های افیولیت ملائزی طبق معیار سینگ و گوئل (Singh & Goel 1999)

پیشنهادات	نوع نگهدارنده	روش حفاری	شرایط زمین
اجرای اولین لایه شاتکریت چند روز بعد از حفاری به منظور رها شدن تنش سنگ	شاتکریت و میل مهار پیش تنیده با ظرفیت لازم	حفاری کامل و انفجار کنترل شده	بدون لهیدگی
مقطع دایره ای، نیمی از نگهدارنده پس از هر انفجار صورت گیرد	شبکه منظم میل مهار تزریقی و شاتکریت مسلح	حفاری و انفجار پله ای	لهیدگی کم
مقطع دایره ای، نصب نگهدارنده پس از هر انفجار، نصب ابزارنگاری در کف جهت ممانعت از تورم	شبکه منظم میل مهار شکل پذیر، شاتکریت مسلح اجرای میل مهار در کف جهت ممانعت از تورم	حفاری و انفجار پله ای	لهیدگی متوسط

## ۷- نتیجه‌گیری

توده سنگ‌های افیولیت ملائزی به واسطه‌ی لیتولوژی متنوع و تکتونیک فعالی که دارند، جنبه‌های مهندسی بسیار متغیری در مهندسی تونل دارند. با استفاده از روش‌های عددی و معیارهای تجربی، تخمینی از پارامترهای ژئومکانیکی این سنگ‌ها صورت گرفت. در این تحقیق مشخص شد که آهک‌ها و رادیولاریت‌های سکانس افیولیتی کیفیت مهندسی بهتری نسبت به سایر سنگ‌های مجموعه‌ی سکانس دارند و پیش‌بینی می‌شود، حجم گسیختگی‌ها و تنش‌های القایی در این سنگ‌ها کمتر باشد. چنانچه جهت تخمین سیستم نگهدارنده‌ی تونل از پارامترهای ژئومکانیکی و طبقه‌بندی مهندسی سنگ استفاده گردد، مقدار ضخامت روباره‌ی تونل مورد توجه قرار نمی‌گیرد. در این تحقیق جهت رفع این نقیصه از روش‌های پیشنهادی سینگ و گوئل و ارزیابی پتانسیل لهیدگی زمین استفاده شده و سیستم نگهدارنده‌ی بهینه و کارآمدتری جهت تونل آزاد طراحی شده است.

## مراجع

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳، "زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۱۶ ص.
- شجاعی، ح. و ارومیه‌ای، ع.، ۱۳۸۷، "ارزیابی عددی رابطه بین لیتولوژی، گسلش و درزه داری توده سنگ"، اولین همایش سراسری فن‌آوری‌های علوم زمین، محلات.
- طاهریان، ع.، ۱۳۸۱، "مهندسی سنگ کاربردی"، چاپ اول، انتشارات دهخدا، تهران، ۵۱۲ ص.
- Basarir, H., 2006, "Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site, Turkey", *Engineering Geology*, Vol. 86: 225–237.
- Berberian, M., 1995, "Master Blind thrust fault hidden under the Zagros fold : active basement tectonics and surface morphotectonics", *Tectonophysics*, Vol. 241: 193–224.
- Bortolotti, V., Marroni, M., Nicolac, I., Pandolfi, L., Principi, G. & Saccani, E., 2002, "Geodynamic implications of Jurassic ophiolites associated with Island-Arc Volcanics, South Apuseni Mountains, Western Romania", *International Geological Review*, Vol. 44: 938–955.
- Ghasemi, A. & Talbot, C. J., 2006, "A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran)", *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 26 (6): 683–693.
- Hoek, E., Marinos, P. & Benissi, M., 1998-a, "Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of the Athens Schist Formation", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 57: 151–160.
- Hoek, E., Kaiser, P. K. & Bawden, W. F., 1998-b, "Support of underground excavation in hard rock", *A. A. Balkema, Rotterdam*, 275 pp.
- Hoek, E. & Marinos, P., 2000, "Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock mass", *Tunnels and Tunneling International*, part one: 45–51, part two: 33–36.
- Goel, R. K., Jethwa, J. L. & Paithankar, A. G., 1995, "An empirical approach for predicting ground condition for tunnelling and its practical benefits", *Proc. 35th US Rock Mech. Symposium*: 431–436.
- Mazhari, S. A., Bea, F., Amini, S., Ghalamghash, J., Molina, J. F., Montero, P., Scarrow, J. H. & Williams, I. S., 2009, "The Eocene bimodal Piranshahr massif of the Sanandaj–Sirjan Zone, NW Iran: a marker of the end of the collision in the Zagros orogen", *Journal of the Geological Society*, Vol. 166 (1): 53–69.
- Regard, V., Hatzfeld, D., Molinaro, M., Aubourg, C., Bayer, R., Bellier, O., Yamini-Fard, F., Peyret, M. & Abbassi, M., 2010, "The transition between Makran subduction and the Zagros collision: recent advances in its structure and active deformation", *Geological Society, London, Special Publications*, Vol. 330: 43–64.
- Sepehr, M. & Cosgrove, J. W., 2004, "Structural framework of the Zagros Fold–Thrust Belt, Iran", *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 21: 829–843.
- Singh, B. & Goel, R. K., 1999, "Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering", *Elsevier Science*, 282 pp.