

# بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی توده‌سنگ‌های میزبان تونل قطعه سوم آزادراه ارومیه - تبریز و پیشنهاد سیستم نگهدارنده بر اساس روش‌های تجربی و عددی

حسام جمالی‌زاده\*، محمود فاطمی عقدا، مهدی تلخابلو<sup>۱</sup>، احسان مختاری<sup>۲</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- گروه راه و راه‌آهن، شرکت طرح نو اندیشان، تهران، ایران

(پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۲/۴ تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵

## چکیده

یکی از مهم‌ترین مباحث در علم مکانیک سنگ و همچنین زمین‌شناسی مهندسی، تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی قبل از انجام حفاری است. بحث این مقاله پیرامون خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی توده‌سنگ، تحلیل پایداری و پیشنهاد سیستم نگهدارنده برای تونل قطعه سوم آزادراه ارومیه- تبریز است. محل حفاری این تونل درون سنگ‌های آذرین جزیره اسلامی است که با توجه به مسائل مهندسی مختلف به پنج واحد ژئوتکنیکی متفاوت تقسیم شد. از روش‌های رایج تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی استفاده از روش‌های تجربی و عددی است. در این مقاله برای تحلیل پایداری تونل قطعه سوم آزادراه ارومیه- تبریز از روش‌های تجربی طبقه‌بندی RMR، Q، GSI و RMI و روش عددی اجزاء محدود استفاده شد. در تحلیل به روش عددی از نرم افزار PLAXIS و برای تشخیص گوه‌های بحرانی از نرم افزار Unwedge بهره برده شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که در حفاری تک مرحله‌ای جابه‌جایی توده‌سنگ بیش از حد مجاز به دست آمده از روش ساکورایی است، بنابراین پیشنهاد شد حفاری به صورت دو مرحله‌ای انجام شود. در ادامه سیستم نگهداری موقتی که ضریب اطمینان مورد نیاز را تأمین کند، با استفاده از روش‌های تجربی و عددی پیشنهاد گردید. همچنین به منظور اعتبارسنجی و تأیید صحت روند مدل‌سازی در نرم افزار PLAXIS<sup>2</sup>، از نرم افزار Phase<sup>2</sup> استفاده شد.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل پایداری، تونل قطعه سوم آزادراه ارومیه- تبریز، خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی، سیستم نگهدارنده، طبقه‌بندی تجربی، نرم افزار PLAXIS و Unwedge.

**مقدمه**

در طول چند دهه اخیر به منظور کوتاه کردن مسیر سازه‌های خطی، انتقال آب، دستیابی به مواد معدنی و غیره، اجرای حفاری‌های زیرزمینی سرعت فزاینده‌ای به خود گرفته است. مسئله پایداری و حفظ ساختار توده‌سنگ یکی از موارد اجتناب‌ناپذیر برای ساخت سازه‌های زیرزمینی است (اجل لویان و همکاران، ۱۳۹۵). طرح ملی ساخت آزادراه ارومیه- تبریز با طولی برابر با ۱۱۸ کیلومتر در قالب ۵ قطعه در حال اجرا است که با بهره‌برداری کامل از آن مسافت تبریز به ارومیه ۱۲۰ کیلومتر کاهش می‌یابد. قطعه سوم پروژه آزادراه ارومیه- تبریز مهم-ترین قطعه این آزادراه به شمار می‌رود که با اجرای دو دستگاه تونل جمعاً به طول تقریبی ۴/۴ کیلومتر در هنگام بهره‌برداری باعث کاهش ۱۲ کیلومتری طول مسیر می‌شود. تونل شمالی در محدوده

کیلومتر ۲۸۵+۴۷ تا ۴۹۵+۴۹ به طول ۲۲۱۰ متر و تونل جنوبی در محدوده کیلومتر ۲۸۵+۴۷ تا ۴۹+۴۸۵ به طول ۲۲۰۰ متر اجرا خواهد شد (شرکت مهندسی طرح نو اندیشان، ۱۳۹۶). از نظر تقسیم‌بندی کشوری، گستره مورد بررسی در غرب استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است. قطعه سوم آزادراه ارومیه- تبریز از منطقه‌ای می‌گذرد که جزیره اسلامی خوانده می‌شود. این جزیره در موقعیت جغرافیایی ۳۵° ۳۵' تا ۳۰° ۲۴' طول شرقی و ۵۶° ۳۷' تا ۱۰° ۴۳' عرض شمالی واقع شده است. شکل ۱ محدوده قرارگیری تونل را بر روی نقشه راه‌های موجود، نشان می‌دهد. مختصات ورودی و خروجی تونل (از کیلومتر کمتر به بیشتر) نیز در سیستم مختصات UTM در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه و راه‌های اصلی مرتبط با آن (اقتباس از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰۰، راه‌ها، ۱۳۹۲)

جدول ۱: مختصات محدوده ورودی و خروجی تونل مورد مطالعه در سیستم مختصات UTM

مختصات	زون: ۳۸ N	محدوده ورودی تونل	محدوده خروجی تونل
X		۵۴۳۲۰۵	۵۴۵۲۴۹
Y		۴۱۸۷۵۷۹	۴۱۸۸۵۰۱

از جابه‌جایی‌های پیش‌بینی شده با جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده مطابقت دارند. لازم به ذکر است، این مطالعه نیز نوعی مطالعه کاربردی است که در آن با استفاده از روش‌های موجود، پایداری یک تونل مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع نوآوری مقاله، مطالعه روی تونل قطعه سوم آزادراه ارومیه- تبریز برای اولین بار می‌باشد که امید است در بحث‌های آتی تونل مفید واقع گردد.

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی بخشی از رشته کوه البرز و پهنه آتشفشانی ارومیه- بزمان می‌باشد. رشته کوه البرز در شمال ایران کمان مرتفعی است که از رشته کوه تالش در باختر تا کپه داغ در خاور گسترده شده است که شامل ردیف‌های ضخیمی از سنگ‌های پرکامبرین پسین تا عهد حاضر است (نبوی، ۱۳۵۵). فعالیت آتشفشانی در ایران مرکزی به نام کمر بند آتشفشانی ارومیه- بزمان به صورت رشته کوه‌هایی از آذربایجان (سهند و سبلان) تا بزمان- تفتان در بلوچستان امتداد دارد. این کمر بند ۱۷۰۰ کیلومتر طول و با عرض ۱۰۰ کیلومتر به موازات منطقه رو رانده زاگرس گسترش دارد. فعالیت آتشفشانی در این کمر بند از کرتاسه شروع شده و در دوره ائوسن به نهایت شدت خود می‌رسد (آقناباتی، ۱۳۸۵). براساس نقشه‌های زمین‌شناسی موجود که توسط سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده است (نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ ارومیه و آذرشهر)، مجموعه‌ای از انواع مختلف سنگ‌های آذرین و رسوبی با سن میوسن تا عهد حاضر در گستره محدوده مورد مطالعه برون‌زد دارند (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۴؛ قدیرزاده و انوری، ۱۳۸۱). بر اساس مطالعات میدانی صورت گرفته واحدهای سنگی محدوده را می‌توان به دو واحد مجزا با ویژگی‌های زمین‌شناختی متفاوت تقسیم نمود.

تاکنون تحقیق و پژوهش‌های بسیار زیادی درباره بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و تحلیل پایداری تونل‌ها در نقاط مختلف جهان صورت گرفته است. در ادامه به خلاصه برخی از این پژوهش‌ها اشاره شده است.

پوروانو و همکاران (Purwanto et al, 2013) در سال ۲۰۱۳ با انجام روش‌های تجربی بر روی دو معدن طلا زیرزمینی در کشور اندونزی سیستم‌های نگهدارنده را پیشنهاد داده و با یکدیگر مقایسه کردند. رحیمی و همکاران (Rahimi et al, 2014) در سال ۲۰۱۴ به ارزیابی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی توده سنگ تونل راه‌آهن قزوین- رشت پرداخته و با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری و تحلیل عددی سیستم نگهدارنده مورد نیاز را تعریف کردند. یاسیتلی (Yasitli, 2016) در سال ۲۰۱۶ با انجام تحقیقی بیان داشت، روش‌های عددی به شدت وابسته به پارامترهای ورودی مربوط به توده- سنگ هستند که از مطالعات صحرایی و یا آزمون- های آزمایشگاهی به دست می‌آید. در همین راستا پیشنهاد کرد که همواره روش‌های عددی همراه با روش‌های تجربی استفاده شوند. رحمان و همکاران (Rehman et al, 2020) در سال ۲۰۲۰ با بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی توده سنگ تونل لواری در پاکستان، جنبه‌های اصلی در طراحی تونل را برآورد دقیق شرایط و رفتار زمین معرفی کردند. همچنین با استفاده از روش تجربی تنش‌های درجا را تخمین و سپس با روش عددی به تحلیل پایداری تونل پرداختند. یارتوتانولا و همکاران (Yertutanola et al, 2020) در سال ۲۰۲۰ به پایش<sup>۱</sup> تونل دوقلو کوناک که در از میر ترکیه قرار دارد، پرداختند. سیستم نگهدارنده این تونل با استفاده از طبقه‌بندی‌های تجربی  $GSI, Q, RMR$  تعیین و با روش عددی اجزاء محدود مدل‌سازی شده بود. ارزیابی‌ها نشان داد که حدود ۷۰ درصد

### مواد و روش‌ها

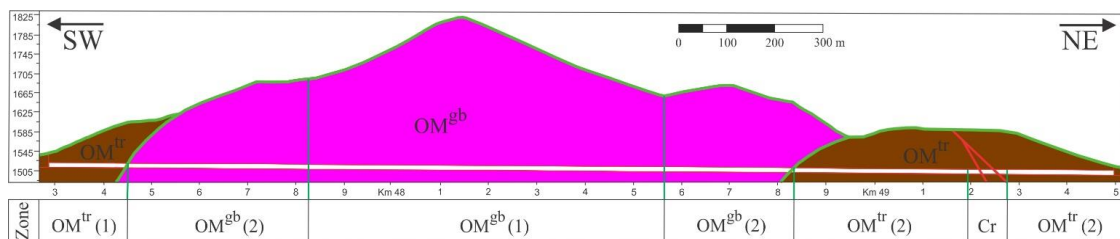
همان‌طور که گفته شد مسیر تونل از دو واحد سنگی اصلی عبور می‌کند که با توجه به مسائل مهندسی مختلف از جمله اختلاف خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی، ارتفاع روباره و غیره، به واحدهای ریزتر به نام‌های  $OM^{tr}$  (1)،  $OM^{gb}$  (2)،  $OM^{tr}$  (1)،  $OM^{gb}$  (1) و  $Cr$  تقسیم شده‌اند که در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که واحد  $OM^{tr}$  (1) با توجه به در نظر گرفتن روباره کم و داشتن خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی مشابه با واحد  $OM^{tr}$  (2)، بیشتر برای قسمت‌های ورودی و خروجی تونل در نظر گرفته شده است. بررسی زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی توده‌سنگ‌های میزبان معمولاً شامل برداشت ناپیوستگی، حفاری اکتشافی و طبقه‌بندی مهندسی توده‌های سنگی می‌باشد و همچنین در ادامه آن، با استفاده از نرم افزار PLAXIS به تحلیل با روش عددی پرداخته می‌شود.

### واحد تراکیتی ( $OM^{tr}$ )

این واحد قهوه‌ای تا قرمز رنگ با سن الیگومیوسن دارای ترکیبی تراکیتی تا تراکی‌اندزیتی است و دارای بافت پورفیری و مگاپورفیری است. ابتدای تونل در سمت روستای آق گنبد تا متر ۱۶۰ و از متر ۱۵۵۰ تا انتهای تونل در سمت روستای سرای از این واحد تشکیل شده است (شرکت مهندسی طرح نو اندیشان، ۱۳۹۶).

### واحد گابرویی ( $OM^{gb}$ )

این واحد که قدیمی‌ترین واحد مسیر تونل است با سن الیگومیوسن دارای ترکیبی عمدتاً گابرویی است و با رنگ تیره و ظاهر توده‌ای تشکیل دهنده بیشتر مسیر تونل مورد مطالعه است. این واحد تشکیل دهنده بلندترین قله‌های مسیر بوده و در بخش‌های میانی مسیر از متر ۱۶۰ تا ۱۵۵۰ مسیر تونل قابل مشاهده است (شرکت مهندسی طرح نو اندیشان، ۱۳۹۶).



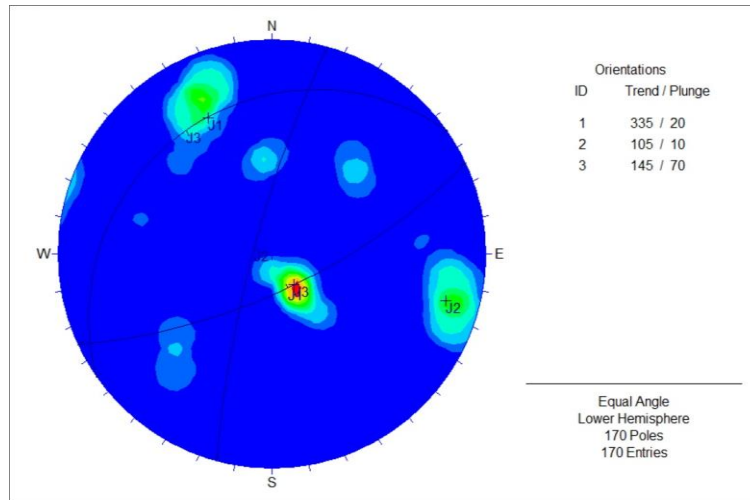
شکل ۲: مقطع زمین‌شناسی تونل قطعه سوم و تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی

(ISR, 1981) برداشت و با استفاده از نرم افزار Dips 5.1 مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. برخی از سیستم‌های ناپیوستگی مسیر تونل با توجه به روند تکتونیک محدود، در کل مسیر قابل شناسایی هستند و برخی دیگر با تغییرات چندی در بخش‌های مختلف دیده می‌شوند. دیگر پارامترهای مهم ناپیوستگی‌ها در جدول ۲ آمده است.

### بحث و نتایج

#### مشخصات ناپیوستگی‌ها

شرایط ناپیوستگی‌ها از جمله مهم‌ترین شاخصه‌های یک واحد سنگی هستند که به همراه ویژگی‌های ماده‌سنگ، تعیین کننده رفتار مکانیکی توده‌های سنگی می‌باشند. به طور کلی ویژگی‌های ۱۷۰ ناپیوستگی در واحدهای سنگی مسیر تونل، براساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ



شکل ۳: تصویر استریوگرافی ناپیوستگی‌های مسیر تونل

جدول ۲: ویژگی‌های سطوح ناپیوستگی‌های مسیر تونل در واحدهای مختلف

واحد	نشانه درزه	مقدار شیب (درجه)	جهت شیب	وضعیت زبری	بازشدگی (میلی‌متر)	پایینی (متر)	فاصله‌داری (سانتی‌متر)	درصد بردشدگی	وضعیت آبداری	هوازدگی
OM <sup>tr</sup>	J <sub>1</sub>	۶۰-۵۵	۱۶۰-۱۵۰	نرم	۵-۲	۲۰-۱۰	۱۰۰-۵۰	٪۵۰ سخت	خشک تا مرطوب	متوسط
	J <sub>2</sub>	۸۵-۸۰	۲۹۰-۲۸۰	زبر	۳-۱	۱۰-۳	۶۰-۴۰	٪۵۰ سخت	خشک تا مرطوب	متوسط
	J <sub>3</sub>	۲۵-۲۰	۳۳۰-۳۲۵	کمی زبر	۳-۱	۲۰-۱۰	۲۰۰-۱۰۰	٪۵۰ سخت	خشک تا مرطوب	کم
OM <sup>gb</sup> (2)	J <sub>1</sub>	۸۰-۷۵	۱۶۰-۱۵۰	کمی زبر	۳-۱	۲۰-۱۰	۶۰-۴۰	٪۵۰ سخت	خشک	متوسط
	J <sub>2</sub>	۸۵-۸۰	۲۹۰-۲۸۰	زبر	۳-۱	۱۰-۳	۲۰۰-۱۰۰	٪۵۰ سخت	خشک	متوسط
	J <sub>3</sub>	۲۵-۲۰	۳۳۰-۳۲۵	زبر	۳-۱	۱۰-۳	۱۰۰-۴۰	٪۵۰ سخت	خشک	تازه تا کم
OM <sup>gb</sup> (1)	J <sub>1</sub>	۸۰-۷۵	۱۶۰-۱۵۰	زبر	۱-۰	۱۰-۳	۶۰-۴۰	-	خشک	تازه تا کم
	J <sub>2</sub>	۸۵-۸۰	۲۹۰-۲۸۰	خیلی زبر	۱-۰	۱۰-۳	۲۰۰-۱۰۰	-	خشک	تازه
	J <sub>3</sub>	۲۵-۲۰	۳۳۰-۳۲۵	خیلی زبر	۱-۰	۱۰-۳	۱۳۰۰-۱۰۰	-	خشک	کم

### مطالعات صحرائی

به منظور مطالعه و شناخت دقیق‌تر شرایط زیرسطحی و همچنین اخذ نمونه‌های سنگی برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، اقدام به حفر گمانه در گستره مورد مطالعه شد. جهت این امر چهار

حلقه گمانه ماشینی با قطر ۷۶ میلی‌متر و به نام-های BH 1، BH 2، BH 3 و BH 4 حفاری شد که اطلاعات مربوط به آن‌ها در جدول ۳ ارائه گردیده است.

جدول ۳: مشخصات گمانه‌های حفاری شده در گستره مورد مطالعه

شماره گمانه	کیلومتر	عمق حفاری شده (متر)	زاویه حفاری (درجه)
BH 1	۴۷+۶۰۰	۱۳۰	۹۰
BH 2	۴۸+۵۰	۲۷۰	۹۰
BH 3	۴۸+۷۵۰	۱۷۰	۹۰
BH 4	۴۹+۲۰۰	۱۱۰	۹۰

رودخانه در محدوده مورد مطالعه پایین‌تر از تراز خط پروژه قرار دارد.

#### آزمون‌های آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگی به دست آمده از حفاری‌های اکتشافی، در جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی توده‌سنگ‌های میزبان تونل انجام شده است. آزمون‌های آزمایشگاهی از جمله آزمون مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و آزمون تعیین چگالی براساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ انجام شده است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

گمانه‌های BH 1، BH 2 و BH 3 تا عمق حدود ۴ متری از آبرفت (ماسه گراولی تا سیلتی) و بعد از آن عمدتاً از جنس گابرو و آندزیت می‌باشد که از مقاومت خوبی برخوردار می‌باشند. RQD برای گمانه‌های BH 1 و BH 3 در حدود ۵۰ تا ۷۵ و برای گمانه BH 2 حدود ۸۰ تا ۱۰۰ می‌باشد. گمانه BH 4 تا عمق حدود ۳ متری از تالوس و در ادامه عمدتاً از جنس تراکیت می‌باشد که از مقاومت نسبتاً خوبی برخوردار می‌باشد. RQD برای این گمانه حدود ۴۰ تا ۶۰ می‌باشد. همچنین نتایج بررسی گمانه‌های حفاری شده نشان می‌دهد تراز

جدول ۴: پارامترهای به دست آمده از آزمون‌های انجام شده

واحد	پارامتر	چگالی [gr/cm <sup>3</sup> ]	مقاومت فشاری تک محوری [MPa]	نسبت پواسون (ν)
OM <sup>tr</sup> (1)	۲/۵۵	۷۰	۰/۲۵	
OM <sup>gb</sup> (2)	۲/۶	۸۰	۰/۲۴	
OM <sup>gb</sup> (1)	۲/۶	۱۰۰	۰/۲۴	
OM <sup>tr</sup> (2)	۲/۵۵	۷۰	۰/۲۵	
Cr	۲/۵۵	۷۰	۰/۲۵	

استفاده قرار می‌گیرد. امروزه یک رده‌بندی توده-سنگ علاوه بر فراهم کردن داده‌های کمی، برای برآورد پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ و تخمین اولیه از تحکیمات مورد نیاز، نقش‌های دیگری از قبیل فراهم کردن یک خط مشی جهت ارتباط بین گروه‌های اکتشافی، طراحی و پیمانکاری را نیز دارد (طریق ازلی، ۱۳۸۳). در سال‌های اخیر به تجربه ثابت شده که اگر طبقه‌بندی یک توده‌سنگ به دقت

#### طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ‌های میزبان مسیر تونل

طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ شامل فرایند جمع-آوری و تحلیل داده‌های کیفی و کمی می‌باشد که در نهایت به عنوان یک ابزار سریع جهت تخمین ملزومات اولیه سیستم نگهدارنده، ارزیابی پارامتر-های مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ مورد

Hoek et al, 1998; ) GSI, (Barton et al, 1980) (Palmstrom, 1996) RMI و (Cai et al, 2004) مورد تقسیم‌بندی قرار گرفتند که نتایج آن به صورت خلاصه در جدول ۵ ارائه شده است.

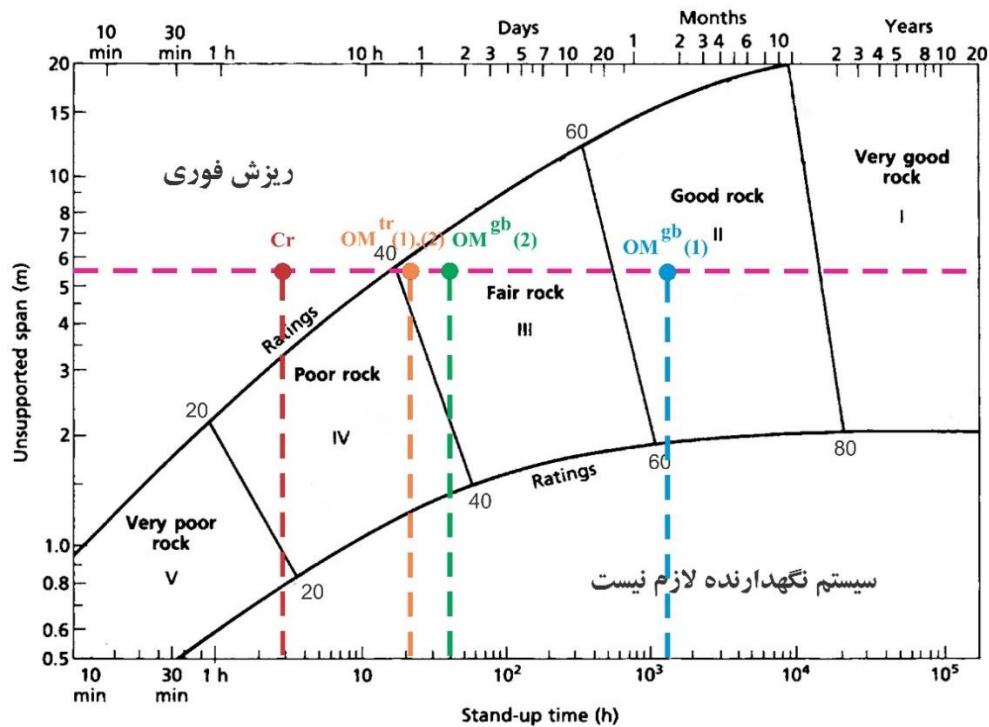
صورت گیرد، می‌تواند به عنوان یک ابزار نیرومند در طراحی‌ها و تحلیل پایداری فضای زیرزمینی به کار گرفته شود (Singh and Goel, 1999). با توجه به موارد گفته شده، توده‌سنگ‌های مسیر تونل طبق چهار طبقه‌بندی RMR (Bieniawski, 1989)، Q

جدول ۵: طبقه‌بندی توده‌سنگ‌های میزبان مسیر تونل

Cr	OM <sup>tr</sup> (2)	OM <sup>gb</sup> (1)	OM <sup>gb</sup> (2)	OM <sup>tr</sup> (1)	واحد سنگی	
					مقدار	پارامتر
۳۱	۴۱	۶۴	۴۴	۴۱	مقدار	<b>RMR</b>
ضعیف	متوسط	خوب	متوسط	متوسط	رده	
۰/۱	۰/۳	۱۶/۶۶	۰/۳۴	۰/۳	مقدار	<b>Q</b>
بسیار ضعیف	خیلی ضعیف	خوب	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	رده	
۰/۱۸	۰/۱۸	۴/۷	۰/۱۸	۰/۱۸	مقدار	<b>RMI</b>
نسبتاً مقاوم	نسبتاً مقاوم	مقاوم	نسبتاً مقاوم	نسبتاً مقاوم	رده	
۳۰-۲۵	۴۰-۳۵	۶۰-۵۵	۴۵-۴۰	۴۰-۳۵	مقدار	<b>GSI</b>
بلوکی و به هم ریخته و سطوح درزه ضعیف	بلوکی به هم ریخته و سطوح درزه خوب تا متوسط	بلوکی با سطح درزه خوب تا متوسط	شدیداً بلوکی با سطح درزه متوسط	بلوکی به هم ریخته و سطوح درزه خوب تا متوسط	رده	

نگهدارنده را با توجه به نمودار شکل ۴ که توسط بنیائوسکی (Bieniawski, 1989) ارائه شده است، مشخص نمود. بر این اساس مدت زمان خود پایداری برای واحد (1) OM<sup>gb</sup> حدود ۲ ماه، برای واحد (2) OM<sup>gb</sup> حدود ۲ روز، برای واحدهای (1) OM<sup>tr</sup>، (2) OM<sup>tr</sup> حدود ۱ روز و برای واحد Cr ریزش فوری می‌باشد. برای جلوگیری از ریزش فوری می‌توان مراحل حفاری را به سه یا چهار مرحله افزایش داد و یا همراه حفاری در واحد، با کمی فاصله از سینه‌کار، سریعاً شروع به نصب سیستم نگهدارنده اولیه شود. در نهایت براساس امتیازبندی صورت گرفته در این روش، سیستم نگهدارنده در جدول ۶ خلاصه گردیده است.

روش تجربی طراحی سیستم نگهدارنده طراحی سیستم نگهدارنده براساس طبقه‌بندی ژئومکانیکی (RMR) (Bieniawski, 1973) اولین بار در سال ۱۹۷۳ و براساس ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ ارائه شد که در سال ۱۹۸۹ بنیائوسکی (Bieniawski, 1989) طبقه‌بندی اولیه خود را اصلاح کرد. آنچه در این تحقیق آمده است بر مبنای رده‌بندی سال ۱۹۸۹ می‌باشد. با در نظر گرفتن مقادیر RMR در جدول ۵ و با توجه به اندازه دهانه تونل (که به دلیل دو مرحله‌ای بودن حفاری حدود ۵/۵ متر در نظر گرفته می‌شود)، می‌توان زمان پایداری تونل بدون نیاز به سیستم



شکل ۴: وضعیت پایداری توده‌سنگ‌های مسیر تونل براساس طبقه‌بندی ژئومکانیکی برای حفاری دو مرحله‌ای

جدول ۶: سیستم نگهدارنده پیشنهادی تونل طبق طبقه‌بندی ژئومکانیکی

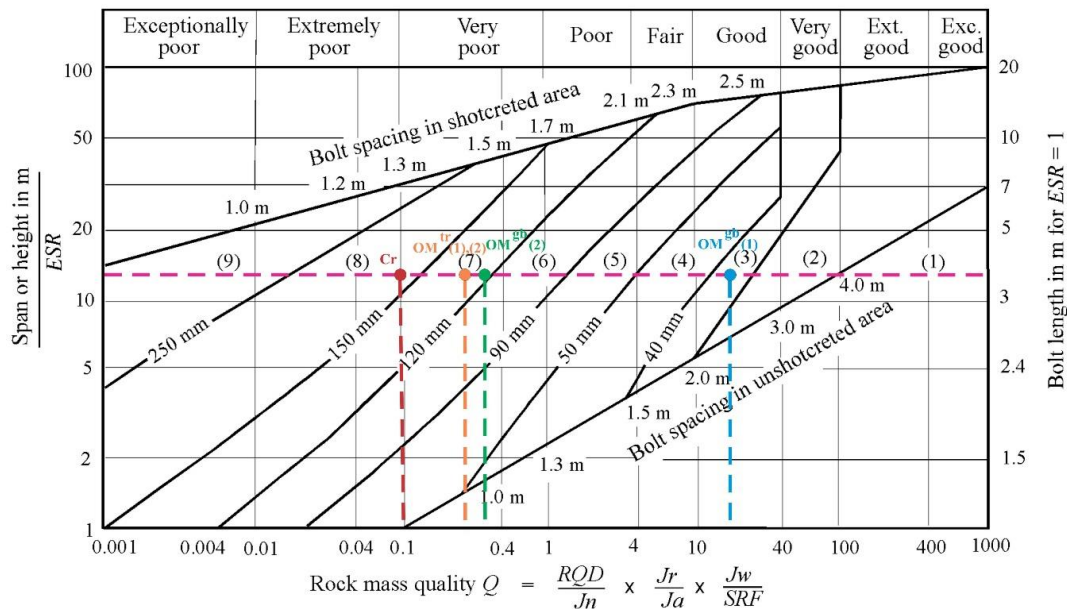
واحد	RMR	کلاس	پیچ‌سنگ (قطر ۲۰ میلی‌متر و با اتصال کابل)	شاتکریت	قاب فلزی
OM <sup>tr</sup> (1)	۴۱	III	به طور منظم، به طول ۴ متر و به فاصله ۱/۵ تا ۲ متر در تاج و دیواره‌ها، تور سیمی در تاج	۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در تاج و ۳ سانتی‌متر در اطراف	نیازی نیست
OM <sup>gb</sup> (2)	۴۴	III	به طور منظم، به طول ۴ متر و به فاصله ۱/۵ تا ۲ متر در تاج و دیواره‌ها، تور سیمی در تاج	۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در تاج و ۳ سانتی‌متر در اطراف	نیازی نیست
OM <sup>gb</sup> (1)	۶۴	II	به طور موضعی در سقف به طول ۳ متر و به فاصله ۲/۵ متر و به طور موضعی با تور سیمی	در صورت لزوم ۵ سانتی‌متر در تاج	نیازی نیست
OM <sup>tr</sup> (2)	۴۱	III	به طور منظم، به طول ۴ متر و به فاصله ۱/۵ تا ۲ متر در تاج و دیواره‌ها، تور سیمی در تاج	۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در تاج و ۳ سانتی‌متر در اطراف	نیازی نیست
Cr	۳۱	IV	به طور منظم، به طول ۴ تا ۵ متر و به فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره‌ها با تور سیمی	۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر در تاج و ۱۰ سانتی‌متر در اطراف	قاب فلزی سبک به فاصله ۱/۵ متر در صورت لزوم

(در صورت لزوم) پارامتر بعد معادل ( $D_e$ ) به صورت تقسیم دهانه (قطر تونل) بر کمیت نسبت نگهداری حفاری (ESR)، به دست می‌آید. در این طبقه‌بندی با در نظر گرفتن ۱ برای ESR (به دلیل استفاده از تونل برای قسمتی از آزادراه) و با توجه به دهانه ۱۲/۵۲ متری تونل، بعد معادل، ۱۲/۵۲ برآورد شده

طراحی سیستم نگهدارنده براساس طبقه‌بندی Q بارتون و همکارانش (Barton et al, 1980) بر مبنای ارزیابی ۲۰۰ مورد حفاری زیرزمینی، شاخصی موسوم به شاخص کیفی تونل‌سازی (Q) را ارائه کردند. با هدف ارتباط شاخص کیفی تونل‌سازی (Q) با رفتار سازه زیرزمینی و حائل‌بندی مورد نیاز



است، لذا سیستم نگهدارنده پیشنهادی این طبقه-بندی با استفاده از شکل ۵ انتخاب گردید که نتایج در جدول ۷ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که در این تحقیق از آخرین بازنگری شاخص Q (Grimstad and Barton, 1993) استفاده شده است.



شکل ۵: وضعیت پایداری توده‌سنگ‌های مسیر تونل براساس طبقه‌بندی Q

جدول ۷: سیستم نگهدارنده پیشنهادی تونل طبق طبقه‌بندی Q

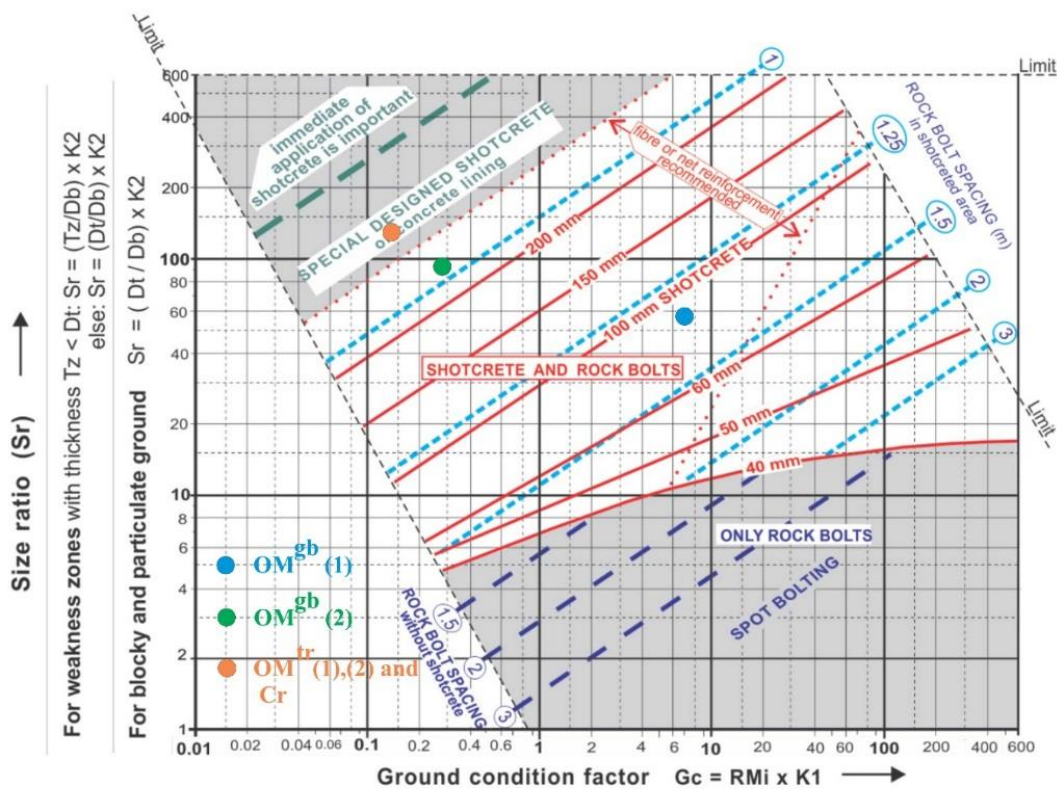
سیستم نگهدارنده	واحد	Q	کلاس
پیچ‌سنگ به همراه شاتکریت مسلح با الیاف فولادی به ضخامت ۱۲ تا ۱۵ سانتی‌متر	OM <sup>tr</sup> (1)	۰/۳	۷
	OM <sup>sb</sup> (2)	۰/۳۴	۷
پیچ‌سنگ به صورت سیستماتیک پیچ‌سنگ به همراه شاتکریت مسلح با الیاف فولادی به ضخامت ۱۲ تا ۱۵ سانتی‌متر	OM <sup>sb</sup> (1)	۱۶/۶۶	۳
	OM <sup>tr</sup> (2)	۰/۳	۷
پیچ‌سنگ به همراه شاتکریت مسلح با الیاف فولادی به ضخامت بیش از ۱۵ سانتی‌متر	Cr	۰/۱	۸

شامل فاکتور کیفیت زمین ( $G_c$ ) (شامل ۹ پارامتر: مقاومت فشاری تک‌محوری، پارامتر درزه‌داری، حجم بلوک، زبری درزه، هوازدگی درزه، فاکتور شرایط درزه، ضرایب تداوم درزه، فاکتور تعدیل سطح تنش و فاکتور تعدیل نیروی ثقل) و فاکتور اندازه ( $S_r$ ) (شامل ۴ پارامتر: ضخامت یا بعد بلوک، قطر یا عرض تونل، فاکتور تعدیل جهت دسته درزه-

طراحی سیستم نگهدارنده براساس طبقه‌بندی **RMi** پالمستروم (Palmstrom, 1996) مطالعاتی براساس تأثیر ناپیوستگی‌های گوناگون (از قبیل لایه‌بندی، گسل، درزه و غیره) در پارامترهای مقاومتی توده-سنگ انجام داد و سرانجام در سال ۱۹۹۶ برای تعیین خصوصیات مقاومتی توده‌سنگ به عنوان یک ماده ساختمانی، شاخص توده‌سنگ (**RMi**) را پیشنهاد نمود. روش **RMi** متکی به دو فاکتور اصلی

خلاصه نتایج سیستم‌های نگهدارنده پیشنهادی برای مشاهده و مقایسه راحت‌تر و سریع‌تر سیستم‌های نگهدارنده پیشنهادی توسط طبقه‌بندی‌های RMR، Q و RMI جدول ۹ تهیه شد.

های اصلی و فاکتورهای تعدیل تعداد درزه‌ها) می‌باشد که با استفاده از آن‌ها می‌توان سیستم نگهدارنده مورد نیاز تونل را پیشنهاد داد (Palmstrom, 2000). بر همین مبنا، سیستم نگهدارنده مورد نیاز با استفاده از شکل ۶، به صورت جدول ۸ خلاصه شده است.



شکل ۶: وضعیت پایداری توده‌سنگ‌های مسیر تونل براساس طبقه‌بندی RMI

جدول ۸: سیستم نگهدارنده پیشنهادی تونل طبق طبقه‌بندی RMI

سیستم نگهدارنده	RMI	واحد
طراحی شاکریت یا پوشش بتنی مخصوص	۰/۱۸	OM <sup>tr</sup> (1)
پیچ‌سنگ با فاصله‌بندی ۰/۸ متر و ۲۰ سانتی‌متر شاکریت همراه با تور سیمی	۰/۱۸	OM <sup>gb</sup> (2)
پیچ‌سنگ با فاصله‌بندی ۱/۳۵ متر و ۶ سانتی‌متر شاکریت همراه با تور سیمی	۴/۱۷	OM <sup>gb</sup> (1)
	۰/۱۸	OM <sup>tr</sup> (2)
طراحی شاکریت یا پوشش بتنی مخصوص	۰/۱۸	Cr

جدول ۹: خلاصه نتایج سیستم‌های نگهدارنده پیشنهادی طبقه‌بندی‌های RMR، Q و RMI

RMI		Q		RMR			طبقه‌بندی واحد	
ضخامت شاتکریت [cm]	فاصله پیچ‌سنگ [m]	ضخامت شاتکریت [cm]	پیچ‌سنگ	قاب فلزی	ضخامت شاتکریت [cm]	پیچ‌سنگ		
						فاصله [m]		طول [m]
طراحی مخصوص	-	۱۲ تا ۱۵	نیاز است	نیاز نیست	۵ تا ۱۰	۱/۵ تا ۲	۴	OM <sup>tr</sup> (1)
۲۰	۰/۸	۱۲ تا ۱۵	نیاز است	نیاز نیست		۱/۵ تا ۲	۴	OM <sup>gb</sup> (2)
۶	۱/۳۵	-	به صورت سیستماتیک	نیاز نیست	۵ (در صورت لزوم)	۲/۵	۳	OM <sup>gb</sup> (1)
طراحی مخصوص	-	۱۲ تا ۱۵	نیاز است	نیاز نیست	۵ تا ۱۰	۱ تا ۱/۵	۴	OM <sup>tr</sup> (2)
طراحی مخصوص	-	بیش از ۱۵	نیاز است	سبک (در صورت لزوم)	۱۰ تا ۱۵	۱ تا ۱/۵	۴ تا ۵	Cr

واحدهای توده‌سنگی مسیر تونل که در جدول ۲ ارائه شده است، احتمال تشکیل چندین گوه وجود دارد که در شکل‌های ۷ و ۹ نشان داده شده است. اطلاعات این گوه‌ها نیز در جداول ۹ و ۱۰ ارائه شده است. با توجه به یکسان بودن شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها در دو واحد OM<sup>gb</sup> (1) و OM<sup>gb</sup> (2) و همچنین واحدهای OM<sup>tr</sup> (1) و OM<sup>tr</sup> (2) و Cr با یکدیگر، گوه‌های متشکل از تقاطع این ناپیوستگی‌ها، در واحدهای OM<sup>gb</sup> و واحدهای OM<sup>tr</sup> تقریباً به یک شکل و اندازه می‌باشد اما به دلیل اختلاف ارتفاع روباره، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ناپیوستگی‌ها در واحدهای مختلف، ضریب اطمینان متفاوتی برای هر گوه به دست آمده است (جدول ۱۰ و ۱۱). در تحلیل‌ها مشاهده می‌شود که گوه شماره ۸ که در بالای تونل سمت راست قرار دارد، در همه واحدها به طور کامل ناپایدار بوده و سقوط خواهد کرد. برای جلوگیری از سقوط این گوه نرم افزار Unwedge نشان می‌دهد که به ترتیب با اجرای ۱ و ۰/۲۵ سانتی‌متر شاتکریت به همراه تور سیمی در واحدهای OM<sup>gb</sup> و واحدهای OM<sup>tr</sup>، به

شناسایی گوه‌های بحرانی و ارائه سیستم

نگهدارنده با استفاده از نرم افزار Unwedge

در تونل‌هایی که در توده‌سنگ‌های درزه‌دار و در عمق کم حفر می‌شوند، متداول‌ترین و شایع‌ترین نوع گسیختگی، به سقوط گوه‌ها از سقف و یا لغزش بلوک‌های منفرد از دیواره‌ها مربوط می‌گردد (Hoek et al, 1998). Unwedge یکی از نرم افزارهای قدرتمند است که برای تحلیل پایداری گوه‌ها به‌ویژه برای معدنکاری و تونل‌سازی در سنگ‌های سخت تهیه شده و از آن در مصور کردن هندسه سه بعدی گوه‌ها استفاده می‌شود. اطلاعاتی که این نرم افزار برای تحلیل به آن احتیاج دارد شامل امتداد و شیب سازه زیرزمینی، موقعیت شیب و جهت شیب سه سیستم درزه‌ای که احتمال تشکیل گوه را می‌دهند، فاصله درزه‌ها، وزن مخصوص سنگ، خصوصیات برشی سطوح درزه‌ها (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) می‌باشند. لازم به ذکر است که این نرم افزار تداوم (پایایی) ناپیوستگی‌ها را بینهایت در نظر می‌گیرد. با توجه به شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌های موجود در

ضریب اطمینان مورد نیاز (یعنی ۱/۵۰) است، در نتیجه نیازی به نصب راک بولت نیست. نیاز به ذکر است که با توجه به شرایط، اجرای ۰/۲۵ سانتی‌متر شاتکریت در عمل قابل اجرا نمی‌باشد.

خوبی پایداری گوه‌ها پس از اعمال این سیستم نگهدارنده تأمین می‌شود به طوری که ضریب اطمینان پس از نصب این سیستم نگهدارنده ۱/۵۳۰ می‌باشد که این مقدار بزرگ‌تر از حداقل

		OM <sup>gb</sup> (1)	OM <sup>gb</sup> (2)
		<b>Wedge Information</b> <b>Upper Left wedge [2]</b> Factor of Safety: 30.820 Wedge Volume: 32.433 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 84.325 tonnes <b>Floor wedge [3]</b> Factor of Safety: stable Wedge Volume: 5.538 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 14.399 tonnes <b>Roof wedge [6]</b> Factor of Safety: 33.527 Wedge Volume: 0.061 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 0.160 tonnes <b>Lower Right wedge [7]</b> Factor of Safety: 172.961 Wedge Volume: 3.253 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 8.459 tonnes <b>Upper Right wedge [8]</b> Factor of Safety: 0.000 Wedge Volume: 3.098 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 8.055 tonnes <b>Near End wedge [9]</b> Factor of Safety: 168.818 Wedge Volume: 16.621 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 43.213 tonnes <b>Far End wedge [10]</b> Factor of Safety: 53.217 Wedge Volume: 16.369 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 42.560 tonnes	<b>Wedge Information</b> <b>Upper Left wedge [2]</b> Factor of Safety: 18.754 Wedge Volume: 32.433 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 84.325 tonnes <b>Floor wedge [3]</b> Factor of Safety: stable Wedge Volume: 5.538 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 14.399 tonnes <b>Roof wedge [6]</b> Factor of Safety: 20.067 Wedge Volume: 0.061 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 0.160 tonnes <b>Lower Right wedge [7]</b> Factor of Safety: 104.801 Wedge Volume: 3.253 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 8.459 tonnes <b>Upper Right wedge [8]</b> Factor of Safety: 0.000 Wedge Volume: 3.098 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 8.055 tonnes <b>Near End wedge [9]</b> Factor of Safety: 102.328 Wedge Volume: 16.621 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 43.213 tonnes <b>Far End wedge [10]</b> Factor of Safety: 32.123 Wedge Volume: 16.369 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 42.560 tonnes

شکل ۷: گوه‌های تشکیل شده در واحدهای OM<sup>gb</sup>(1) و OM<sup>gb</sup>(2) و مشخصات کلی آن‌ها قبل از نصب سیستم نگهدارنده

		OM <sup>gb</sup> (1)	OM <sup>gb</sup> (2)
		<b>Wedge Information</b> <b>Upper Left wedge [2]</b> Factor of Safety: 30.723 Wedge Volume: 32.433 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 84.325 tonnes <b>Floor wedge [3]</b> Factor of Safety: stable Wedge Volume: 5.538 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 14.399 tonnes <b>Roof wedge [6]</b> Factor of Safety: 66.792 Wedge Volume: 0.061 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 0.160 tonnes <b>Lower Right wedge [7]</b> Factor of Safety: 172.280 Wedge Volume: 3.253 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 8.459 tonnes <b>Upper Right wedge [8]</b> Factor of Safety: 1.881 Wedge Volume: 3.098 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 8.055 tonnes <b>Near End wedge [9]</b> Factor of Safety: 168.818 Wedge Volume: 16.621 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 43.213 tonnes <b>Far End wedge [10]</b> Factor of Safety: 53.217 Wedge Volume: 16.369 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 42.560 tonnes	<b>Wedge Information</b> <b>Upper Left wedge [2]</b> Factor of Safety: 18.796 Wedge Volume: 32.433 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 84.325 tonnes <b>Floor wedge [3]</b> Factor of Safety: stable Wedge Volume: 5.538 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 14.399 tonnes <b>Roof wedge [6]</b> Factor of Safety: 55.475 Wedge Volume: 0.061 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 0.160 tonnes <b>Lower Right wedge [7]</b> Factor of Safety: 105.600 Wedge Volume: 3.253 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 8.459 tonnes <b>Upper Right wedge [8]</b> Factor of Safety: 1.881 Wedge Volume: 3.098 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 8.055 tonnes <b>Near End wedge [9]</b> Factor of Safety: 102.328 Wedge Volume: 16.621 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 43.213 tonnes <b>Far End wedge [10]</b> Factor of Safety: 32.123 Wedge Volume: 16.369 m <sup>3</sup> Wedge Weight: 42.560 tonnes

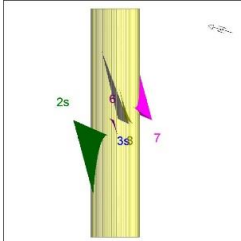
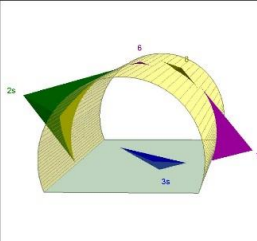
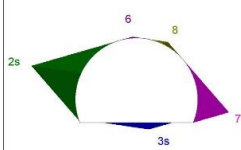
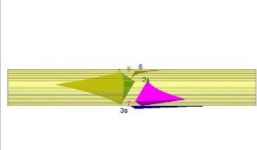
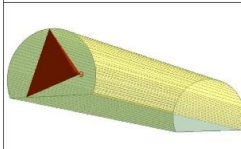
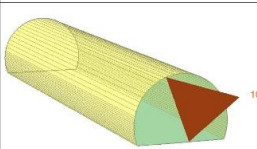
شکل ۸: گوه‌های تشکیل شده در واحدهای OM<sup>gb</sup>(1) و OM<sup>gb</sup>(2) و مشخصات کلی آن‌ها بعد از نصب سیستم نگهدارنده

جدول ۱۰: نتایج تحلیل صورت گرفته به کمک نرم افزار Unwedge در واحدهای (1)  $OM^{gb}$  و (2)  $OM^{gb}$

شماره گوه	موقعیت	وزن گوه [t]	حجم گوه [m <sup>3</sup> ]	وضعیت پایداری	ضریب اطمینان قبل از نصب نگهدارنده	ضریب اطمینان بعد از نصب نگهدارنده
۲	بالا سمت چپ	۸۴/۳۲۵	۳۲/۴۳۳	لغزش روی درزه ۱ و ۲	۳۰/۷۲۳	۱۸/۷۹۶
۳	کف	۱۴/۳۹۹	۵/۵۳۸	پایدار	پایدار	پایدار
۶	سقف	۰/۱۶۰	۰/۰۶۱	لغزش روی درزه ۲	۳۳/۵۲۷	۲۰/۰۶۷
۷	پایین سمت راست	۸/۴۵۹	۳/۲۵۳	لغزش روی درزه ۲ و ۳	۱۷۲/۹۶۱	۱۰۴/۸۰۱
۸	بالا سمت راست	۸/۰۵۵	۳/۰۹۸	سقوط	۱/۸۸۱	۰/۰۰۰
۹	انتهای نزدیک <sup>۲</sup>	۴۳/۲۱۳	۱۶/۶۲۱	لغزش روی درزه ۲ و ۳	۱۶۸/۸۱۸	۱۰۲/۳۲۸
۱۰	انتهای دور <sup>۳</sup>	۴۲/۵۶	۱۶/۳۶۹	لغزش روی درزه ۱ و ۲	۵۳/۲۱۷	۳۲/۱۲۳

$OM^{tr}$ (1)	$OM^{tr}$ (2)	Cr
<p><b>Wedge Information</b></p> <p><u>Upper Left wedge [2]</u> Factor of Safety: 3.130 Wedge Volume: 99.324 m3 Wedge Weight: 253.275 tonnes</p> <p><u>Floor wedge [3]</u> Factor of Safety: stable Wedge Volume: 5.292 m3 Wedge Weight: 13.494 tonnes</p> <p><u>Roof wedge [6]</u> Factor of Safety: 2.425 Wedge Volume: 0.054 m3 Wedge Weight: 0.137 tonnes</p> <p><u>Lower Right wedge [7]</u> Factor of Safety: 9.723 Wedge Volume: 27.948 m3 Wedge Weight: 71.267 tonnes</p> <p><u>Upper Right wedge [8]</u> Factor of Safety: 0.000 Wedge Volume: 0.526 m3 Wedge Weight: 1.342 tonnes</p> <p><u>Near End wedge [9]</u> Factor of Safety: 11.801 Wedge Volume: 36.295 m3 Wedge Weight: 92.552 tonnes</p> <p><u>Far End wedge [10]</u> Factor of Safety: 4.582 Wedge Volume: 32.140 m3 Wedge Weight: 81.956 tonnes</p>	<p><b>Wedge Information</b></p> <p><u>Upper Left wedge [2]</u> Factor of Safety: 9.357 Wedge Volume: 99.324 m3 Wedge Weight: 253.275 tonnes</p> <p><u>Floor wedge [3]</u> Factor of Safety: stable Wedge Volume: 5.292 m3 Wedge Weight: 13.494 tonnes</p> <p><u>Roof wedge [6]</u> Factor of Safety: 11.358 Wedge Volume: 0.054 m3 Wedge Weight: 0.137 tonnes</p> <p><u>Lower Right wedge [7]</u> Factor of Safety: 32.096 Wedge Volume: 27.948 m3 Wedge Weight: 71.267 tonnes</p> <p><u>Upper Right wedge [8]</u> Factor of Safety: 0.000 Wedge Volume: 0.526 m3 Wedge Weight: 1.342 tonnes</p> <p><u>Near End wedge [9]</u> Factor of Safety: 42.313 Wedge Volume: 36.295 m3 Wedge Weight: 92.552 tonnes</p> <p><u>Far End wedge [10]</u> Factor of Safety: 16.495 Wedge Volume: 32.140 m3 Wedge Weight: 81.956 tonnes</p>	<p><b>Wedge Information</b></p> <p><u>Upper Left wedge [2]</u> Factor of Safety: 8.897 Wedge Volume: 99.324 m3 Wedge Weight: 253.275 tonnes</p> <p><u>Floor wedge [3]</u> Factor of Safety: stable Wedge Volume: 5.292 m3 Wedge Weight: 13.494 tonnes</p> <p><u>Roof wedge [6]</u> Factor of Safety: 10.723 Wedge Volume: 0.054 m3 Wedge Weight: 0.137 tonnes</p> <p><u>Lower Right wedge [7]</u> Factor of Safety: 30.463 Wedge Volume: 27.948 m3 Wedge Weight: 71.267 tonnes</p> <p><u>Upper Right wedge [8]</u> Factor of Safety: 0.000 Wedge Volume: 0.526 m3 Wedge Weight: 1.342 tonnes</p> <p><u>Near End wedge [9]</u> Factor of Safety: 40.103 Wedge Volume: 36.295 m3 Wedge Weight: 92.552 tonnes</p> <p><u>Far End wedge [10]</u> Factor of Safety: 15.633 Wedge Volume: 32.140 m3 Wedge Weight: 81.956 tonnes</p>

شکل ۹: گوه‌های تشکیل شده در واحدهای (1)  $OM^{tr}$ ، (2)  $OM^{tr}$  و Cr و مشخصات کلی آنها قبل از نصب سیستم نگهدارنده

		OM <sup>tr</sup> (1)	OM <sup>tr</sup> (2)	Cr
		<b>Wedge Information</b> <b>Upper Left wedge [2]</b> Factor of Safety: 3.149 Wedge Volume: 99.324 m3 Wedge Weight: 253.275 tonnes <b>Floor wedge [3]</b> Factor of Safety: stable Wedge Volume: 5.292 m3 Wedge Weight: 13.494 tonnes <b>Roof wedge [6]</b> Factor of Safety: 12.516 Wedge Volume: 0.054 m3 Wedge Weight: 0.137 tonnes <b>Lower Right wedge [7]</b> Factor of Safety: 9.828 Wedge Volume: 27.948 m3 Wedge Weight: 71.267 tonnes <b>Upper Right wedge [8]</b> Factor of Safety: 1.530 Wedge Volume: 0.526 m3 Wedge Weight: 1.342 tonnes <b>Near End wedge [9]</b> Factor of Safety: 11.801 Wedge Volume: 36.295 m3 Wedge Weight: 92.552 tonnes <b>Far End wedge [10]</b> Factor of Safety: 4.582 Wedge Volume: 32.140 m3 Wedge Weight: 81.956 tonnes	<b>Wedge Information</b> <b>Upper Left wedge [2]</b> Factor of Safety: 9.370 Wedge Volume: 99.324 m3 Wedge Weight: 253.275 tonnes <b>Floor wedge [3]</b> Factor of Safety: stable Wedge Volume: 5.292 m3 Wedge Weight: 13.494 tonnes <b>Roof wedge [6]</b> Factor of Safety: 23.442 Wedge Volume: 0.054 m3 Wedge Weight: 0.137 tonnes <b>Lower Right wedge [7]</b> Factor of Safety: 32.179 Wedge Volume: 27.948 m3 Wedge Weight: 71.267 tonnes <b>Upper Right wedge [8]</b> Factor of Safety: 1.906 Wedge Volume: 0.526 m3 Wedge Weight: 1.342 tonnes <b>Near End wedge [9]</b> Factor of Safety: 42.313 Wedge Volume: 36.295 m3 Wedge Weight: 92.552 tonnes <b>Far End wedge [10]</b> Factor of Safety: 16.495 Wedge Volume: 32.140 m3 Wedge Weight: 81.956 tonnes	<b>Wedge Information</b> <b>Upper Left wedge [2]</b> Factor of Safety: 8.912 Wedge Volume: 99.324 m3 Wedge Weight: 253.275 tonnes <b>Floor wedge [3]</b> Factor of Safety: stable Wedge Volume: 5.292 m3 Wedge Weight: 13.494 tonnes <b>Roof wedge [6]</b> Factor of Safety: 22.840 Wedge Volume: 0.054 m3 Wedge Weight: 0.137 tonnes <b>Lower Right wedge [7]</b> Factor of Safety: 30.550 Wedge Volume: 27.948 m3 Wedge Weight: 71.267 tonnes <b>Upper Right wedge [8]</b> Factor of Safety: 1.906 Wedge Volume: 0.526 m3 Wedge Weight: 1.342 tonnes <b>Near End wedge [9]</b> Factor of Safety: 40.103 Wedge Volume: 36.295 m3 Wedge Weight: 92.552 tonnes <b>Far End wedge [10]</b> Factor of Safety: 15.633 Wedge Volume: 32.140 m3 Wedge Weight: 81.956 tonnes
				
				

شکل ۱۰: گوه‌های تشکیل شده در واحدهای (2), OM<sup>tr</sup> (1), OM<sup>tr</sup> و Cr و مشخصات کلی آن‌ها بعد از نصب سیستم نگهدارنده

جدول ۱۱: نتایج تحلیل صورت گرفته به کمک نرم افزار Unwedge در واحدهای (1), OM<sup>tr</sup> (2), OM<sup>tr</sup> و Cr

شماره گوه	موقعیت	وزن گوه [t]	حجم گوه [m <sup>3</sup> ]	وضعیت پایداری	ضریب اطمینان قبل از نصب نگهدارنده	OM <sup>tr</sup> (2)	OM <sup>tr</sup> (1)	ضریب اطمینان بعد از نصب نگهدارنده	ضریب اطمینان قبل از نصب نگهدارنده	ضریب اطمینان بعد از نصب نگهدارنده
۲	سمت چپ بالا	۲۵/۲۷۵	۹۹/۳۲۴	لغزش روی درزه ۱ و ۲	۸/۹۲۱	۹/۳۷۰	۳/۱۴۹	۹/۳۵۷	۸/۸۹۷	۸/۹۲۱
۳	کف	۱۲/۴۹۴	۵/۲۹۲	پایدار	پایدار	پایدار	پایدار	پایدار	پایدار	پایدار
۶	سقف	۰/۱۳۷	۰/۰۵۴	لغزش روی درزه ۲	۲۲/۸۴۰	۲۳/۴۴۲	۱۲/۵۱۶	۱۱/۳۵۸	۱۰/۷۲۳	۱۰/۷۲۳
۷	سمت راست پایین	۷۱/۲۶۷	۲۷/۹۴۸	لغزش روی درزه ۲ و ۳	۳۰/۵۵۰	۳۲/۱۷۹	۹/۸۲۸	۳۲/۰۹۶	۳۰/۴۶۳	۳۰/۴۶۳
۸	سمت راست بالا	۱/۳۴۲	۰/۵۲۶	سقوط	۱/۹۰۶	۱/۹۰۶	۱/۵۳۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۹۰۶
۹	انتهای نزدیک	۹۲/۵۵۲	۳۶/۲۹۵	لغزش روی درزه ۲ و ۳	۴۰/۱۰۳	۴۲/۳۱۳	۱۱/۸۰۱	۴۲/۳۱۳	۴۰/۱۰۳	۴۰/۱۰۳
۱۰	انتهای دور	۸۱/۹۵۶	۳۲/۱۴۰	لغزش روی درزه ۱ و ۲	۱۵/۶۳۳	۱۶/۴۹۵	۴/۵۸۲	۱۶/۴۹۵	۱۵/۶۳۳	۱۵/۶۳۳

**برآورد پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ**

برای برآورد پارامترهای مقاومتی و برآورد ضریب تغییر شکل توده سنگ از معیار هوک- براون (Hoek and Brown, 1998) و نرم افزار RocData استفاده شده است. ورودی‌های این نرم افزار شامل چهار پارامتر مقاومت فشاری تک محوری ( $\sigma_c$ ),

شاخص مقاومت زمین‌شناختی (GSI)، ثابت توده-سنگ ( $m_i$ ) و فاکتور آشفستگی (D) می‌باشد. از خروجی‌های این نرم افزار می‌توان به ضریب اصطکاک داخلی، چسبندگی، مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک محوری و ضریب تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ اشاره کرد که در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۱۲: پارامترهای ورودی و خروجی نرم افزار RocData برای واحدهای مختلف مسیر تونل

Ct	مقدار				پارامترهای خروجی	Ct	مقدار				پارامترهای ورودی
	OM <sup>tr</sup> (2)	OM <sup>pb</sup> (1)	OM <sup>pb</sup> (2)	OM <sup>tr</sup> (1)			OM <sup>tr</sup> (2)	OM <sup>pb</sup> (1)	OM <sup>pb</sup> (2)	OM <sup>tr</sup> (1)	
۰/۵۳۵	۰/۸۶۱	۳/۷۲۱	۱/۸۲۲	۰/۸۶۱	mb	۷۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۷۰	$\sigma_c$ [MPa]
۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۳	s	۳۰	۴۰	۶۰	۴۵	۴۰	GSI
۰/۵۲۲	۰/۵۱۱	۰/۵۰۳	۰/۵۰۸	۰/۵۱۱	a	۱۵	۱۵	۲۵	۲۵	۱۵	$m_i$
۱/۰۰۴	۱/۰۸۳	۳/۱۸۹۰	۲/۱۸۴	۰/۲۱۲	$\sigma_3$ [MPa]						
۰/۳۰۶	۰/۴۱۸	۱/۸۹۵	۰/۸۷۳	۰/۱۷۲	C [MPa]	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	D
۴۳/۶۱	۴۷/۶۸	۵۲/۵۰	۴۹/۵۹	۵۹/۰۱	$\phi$ [deg]						
-۰/۰۱۱	-۰/۰۲۷	-۰/۱۲۹	-۰/۰۲۸	-۰/۰۲۷	Sigt <sup>4</sup> [MPa]	۲۴/۹۹	۲۴/۹۹	۲۵/۴۸	۲۵/۴۸	۲۴/۹۹	Unit weight [ $\frac{KN}{m^3}$ ]
۰/۵۳۴	۱/۱۷۱	۶/۸۴۴	۱/۹۲۷	۱/۱۷۱	Sigc <sup>5</sup> [MPa]						
۶/۱۰۵	۸/۲۶۶	۲۵/۹۶	۱۴/۰۲۶	۸/۲۶۶	Sigcm <sup>6</sup> [MPa]						
۱/۹۸۴	۳/۵۲۸	۱۳/۳۳۷	۵/۰۳۰	۳/۵۲۸	E <sub>m</sub> <sup>7</sup> [GPa]	۸۰	۸۵	۳۰۲	۱۷۰	۱۵	Depth [m]

رابطه (۲)

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad (II)$$

رابطه (۳)

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad (III)$$

در این روابط  $\varepsilon_c$ : کرنش بحرانی برحسب درصد و E: ضریب تغییر شکل<sup>۸</sup> برحسب کیلوگرم نیرو بر سانتی متر مربع ( $Kgf/cm^2$ ) می‌باشد. ساکورایی تراز

**تحلیل پایداری به روش تجربی**

ساکورایی (Sakurai, 1997) در سال ۱۹۹۷ روشی را برای ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی با توجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها سه تراز هشدار خطر به صورت روابط ۱ تا ۳ ارائه دادند.

رابطه (۱)

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad (I)$$

هشدار خطر ۲ را به عنوان مبنای طراحی تونل‌ها پیشنهاد کرده است. چنانچه مقادیر به دست آمده از نرم افزارهای عددی، از سطح هشدار خطر ۲ کمتر باشد، سازه پایدار تلقی می‌شود. با تعیین کرنش بحرانی از رابطه ۲ و با استفاده از رابطه ۴ جابه‌جایی بحرانی مشخص می‌گردد (Sakurai et al, 2008).

رابطه ۴)

$$U_c = \varepsilon_c \cdot a$$

در این روابط  $U_c$ : جابجایی مجاز در سقف یا دیواره (cm) و  $a$  شعاع تونل (cm) می‌باشند. در ادامه موارد ذکر شده برای تونل محاسبه و در جدول ۱۳ ارائه شده است.

جدول ۱۳: کرنش بحرانی به همراه جابه‌جایی‌های مجاز برای واحدهای مختلف

واحد	E [Kgf/cm <sup>2</sup> ]	v	a [m]	$\varepsilon_c$ [%]	$U_c$ [cm]
OM <sup>tr</sup> (1)	۳۷۱۷۳/۳۱	۰/۲۵	۶/۲۶	۰/۴۳	۲/۷۱
OM <sup>gb</sup> (2)	۵۲۹۸۴/۳۵	۰/۲۴	۶/۲۶	۰/۳۹	۲/۴۸
OM <sup>gb</sup> (1)	۱۴۰۴۸۷/۵۳	۰/۲۴	۶/۲۶	۰/۳۱	۱/۹۴
OM <sup>tr</sup> (2)	۳۷۱۷۳/۳۱	۰/۲۵	۶/۲۶	۰/۴۳	۲/۷۱
Cr	۲۰۸۹۸/۷۹	۰/۲۵	۶/۲۶	۰/۵۰	۳/۱۳

#### تحلیل پایداری به روش عددی

جهت تحلیل عددی پایداری تونل، در این پژوهش از نرم افزار PLAXIS استفاده شد. این نرم افزار یک برنامه اجزاء محدود<sup>۱</sup> (FEM) برای تحلیل دو بعدی تغییر شکل و پایداری در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. در این روش، نرم افزار توده‌سنگ مورد مطالعه را به قطعات کوچک‌تری تقسیم می‌کند که هر کدام از آن‌ها یک جزء نامیده می‌شوند. همچنین فرض می‌گردد که این اجزا دارای خواص مخصوص به خود بوده و در نقاط مشخصی به نام گره<sup>۱</sup> به یکدیگر متصل می‌شوند.

جابه‌جایی‌ها در محل گره‌ها اتفاق می‌افتد، بنابراین در این روش توده سنگی که بی‌نهایت درجه آزادی دارد به جسمی شبیه‌سازی می‌شود که تنها ۲ تا ۳ برابر تعداد گره‌ها درجه آزادی دارد (Varadarajan, )

(2001). ورودی‌های لازم برای تحلیل عددی در نرم افزار PLAXIS شامل وزن مخصوص (γ)، زاویه اصطکاک داخلی (φ)، چسبندگی (C)، ضریب کشسانی (E)، نسبت پواسون (ν) و نسبت تنش افقی به تنش قائم (K) می‌باشد که در جدول ۱۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای نسبت تنش افقی به تنش قائم، با استفاده از روابط ترزاقی و ریچارت (Terzaghi and Richart, 1952)، براون و هوک (Brown and Hoek, 1978)، مک کوتچین (McCutchin, 1982) و شئوری (Sheory, 1994)، نسبت تنش افقی به تنش قائم محاسبه و از میانگین آن‌ها استفاده شده است. همچنین برخی از این پارامترها برای توده‌سنگ، از نرم افزار RocData به دست آمده است.

جدول ۱۴: پارامترهای ورودی جهت تحلیل عددی واحدهای سنگی

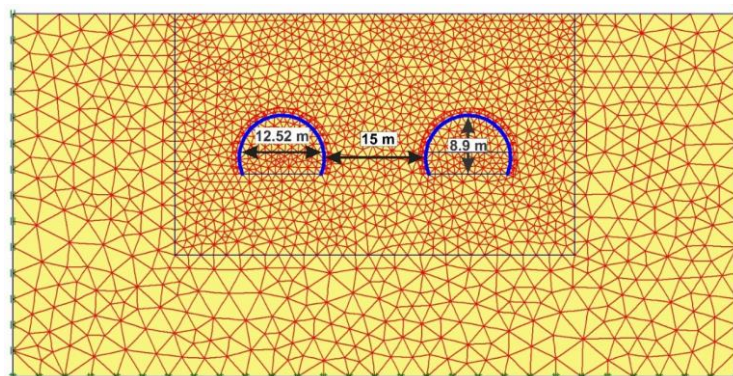
واحد	روباره [m]	γ [KN/m <sup>3</sup> ]	E [GPa]	v	C [KPa]	φ [deg]	$K_{ave}$
OM <sup>tr</sup> (1)	۱۵	۲۴/۹۹	۳/۵۲۹	۰/۲۵	۱۷۴	۵۹	۲/۴۸
OM <sup>gb</sup> (2)	۱۷۰	۲۵/۴۸	۵/۰۳۰	۰/۲۴	۸۸۴	۴۹	۰/۵۸



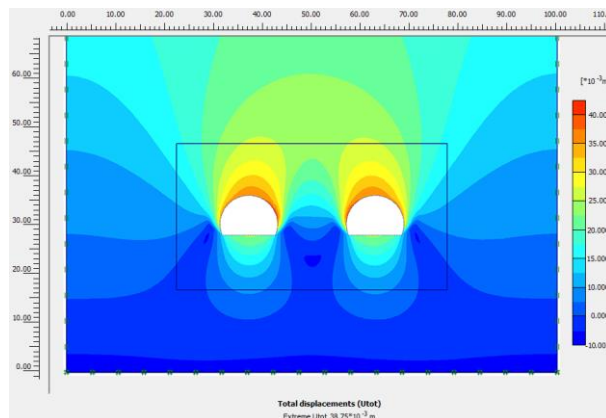
۰/۵۶	۵۲	۱۹۱۸	۰/۲۴	۱۳/۳۳۷	۲۵/۴۸	۳۰۲	OM <sup>sb</sup> (1)
۰/۷۹	۴۸	۴۲۳	۰/۲۵	۳/۵۲۹	۲۴/۹۹	۸۵	OM <sup>tr</sup> (2)
۰/۷۶	۴۳	۳۱۰	۰/۲۵	۱/۹۸۴	۲۴/۹۹	۸۰	Cr

حفاری دو مرحله‌ای پیش‌بینی شده است. ابتدا بخش فوقانی (طاق) با ارتفاع ۵/۵ متر و سپس بخش تحتانی (پا طاق) با ارتفاع ۳/۴ متر حفاری می‌شود. جهت بررسی این امر که با انجام حفاری یک مرحله‌ای جابه‌جایی کل توده‌سنگ اطراف تونل به چه میزان است، واحد Cr با استفاده از نرم افزار PLAXIS به صورت یک مرحله‌ای مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که در حفاری یک مرحله‌ای حداکثر جابه‌جایی کل توده‌سنگ اطراف تونل به میزان ۳/۸۷ سانتی‌متر است که این مقدار بیش از حد مجاز تعیین شده توسط روابط و محاسباتی که ذکر شد، می‌باشد.

جهت تحلیل عددی با نرم افزار PLAXIS ابتدا باید هندسه تونل را در محیط نرم افزار رسم نمود. تونل قطعه سوم آزادراه ارومیه- تبریز یک تونل دوقلو با مقطع نعل اسبی با قطر ۱۲/۵۲ متر و حداکثر ارتفاع ۸/۹ متر و حداقل فاصله عرضی ۱۵ متر از یکدیگر می‌باشد. با توجه به روباره زیاد، وجود یک محدوده خردشده، خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی توده-سنگ، قطر زیاد تونل و همچنین مدت زمان خود پایداری طبقه‌بندی RMR، در حفاری یک مرحله-ای امکان ایجاد مشکل و خطراتی هم چون جابه-جایی بیش از حد مجاز، علی‌الخصوص در سقف تونل وجود دارد (شکل ۱۲). لذا برای این تونل،



شکل ۱۱: هندسه تونل و شبکه جزء بندی در اطراف فضای حفاری شده (تعداد اجزا ۳۳۷۰ می‌باشد)



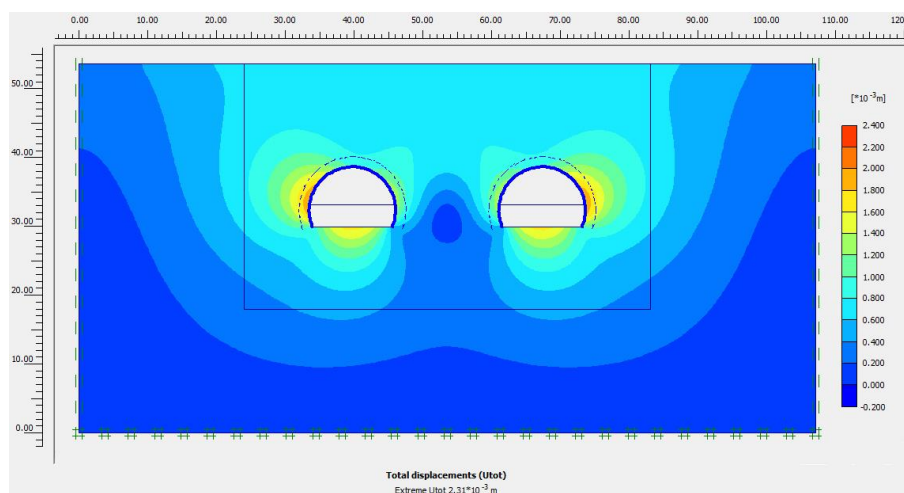
شکل ۱۲: وضعیت جابه‌جایی کل در واحد Cr در حفاری تک مرحله‌ای

در نرم افزار PLAXIS سیستم‌های نگهدارنده متفاوتی تعریف شده است. با توجه به مدل‌سازی‌های متعدد و اعمال سیستم نگهدارنده متفاوت و همچنین دید مهندسی، سیستم نگهدارنده شاتکریت همراه با شبکه‌بندی فولادی انتخاب شد. نتیجه حاصل بدین گونه بود که ضخامت شاتکریت با مقاومت فشاری  $250 \text{ kg/cm}^2$  در واحد  $OM^{tr}(1)$ ،  $5$  سانتی‌متر، در واحدهای  $OM^{gb}(2)$ ،  $OM^{gb}(1)$  و  $OM^{tr}(2)$ ،  $10$  سانتی‌متر و در واحد Cr،  $15$  سانتی‌متر مدل شد. با مقایسه نتایج حاصل از روابط ساکورایی (جدول ۱۳) و روش عددی، مشاهده می‌شود که حداکثر جابه‌جایی در تمام واحدهای تونل از مقدار محاسبه شده به روش ساکورایی در سطح

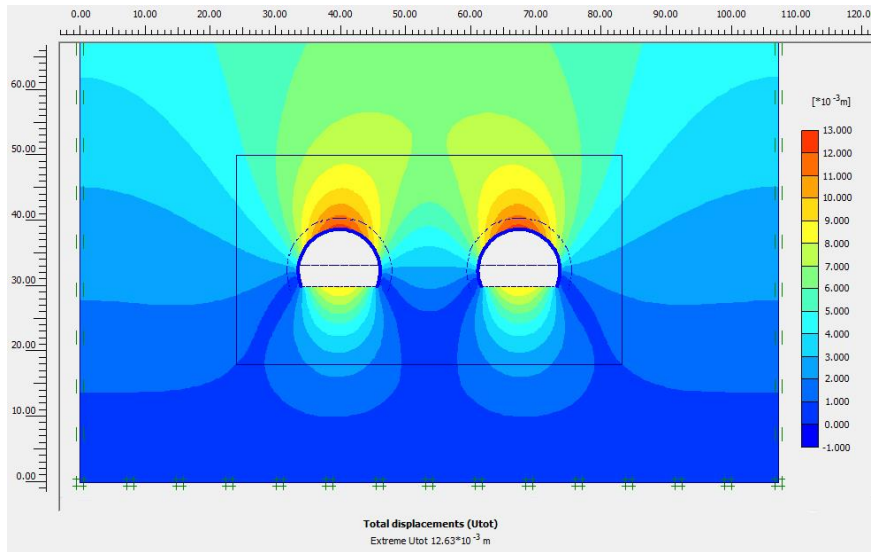
هشدار ۲، کمتر است. این بدین معناست که سیستم نگهدارنده اجرا شده کفایت لازم را برای نگهداری تونل داراست. همچنین ضریب اطمینان واحدهای مختلف تونل بعد از نصب سیستم نگهدارنده که توسط نرم افزار PLAXIS به دست آمده، نشان می‌دهد که کمترین ضریب اطمینان  $2/13$  و مربوط به واحد  $OM^{tr}(1)$  می‌باشد که از حداقل ضریب اطمینان مورد نیاز (یعنی  $1/5$ ) بیشتر است. قابل ذکر است که در بحث تونل‌سازی برای سازه‌های خطی مانند جاده‌ها، معمولاً ضریب اطمینان  $1/5$  و کمتر از آن را به منزله شکست در نظر می‌گیرند (Torres and Diederichs, 2009).

جدول ۱۵: وضعیت پایداری تونل بعد از حفر کامل و نصب نگهدارنده

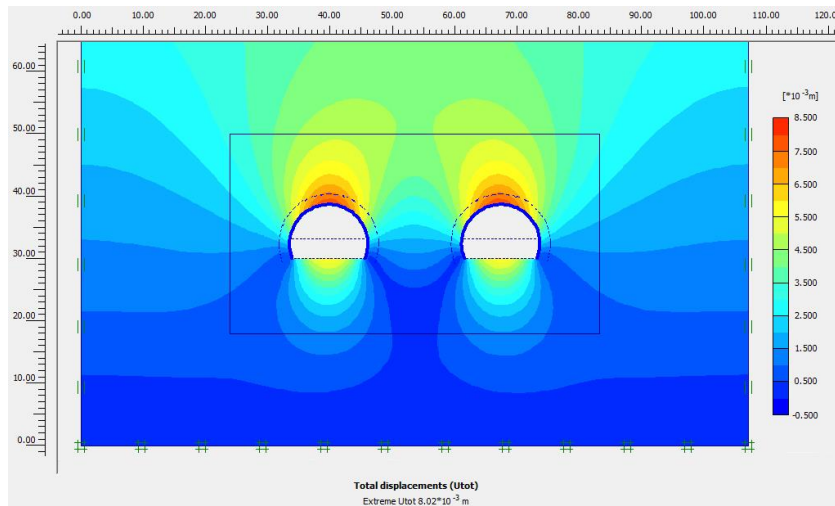
واحد	سیستم نگهدارنده [cm]	ضریب اطمینان به دست آمده از نرم افزار PLAXIS بعد از نصب سیستم نگهدارنده
$OM^{tr}(1)$	۰/۲۳	۲/۱۳
$OM^{gb}(2)$	۱/۲۶	۲/۹۴
$OM^{gb}(1)$	۰/۸	۳/۲۲
$OM^{tr}(2)$	۰/۸۶	۲/۸۴
Cr	۱/۵۷	۲/۲۷



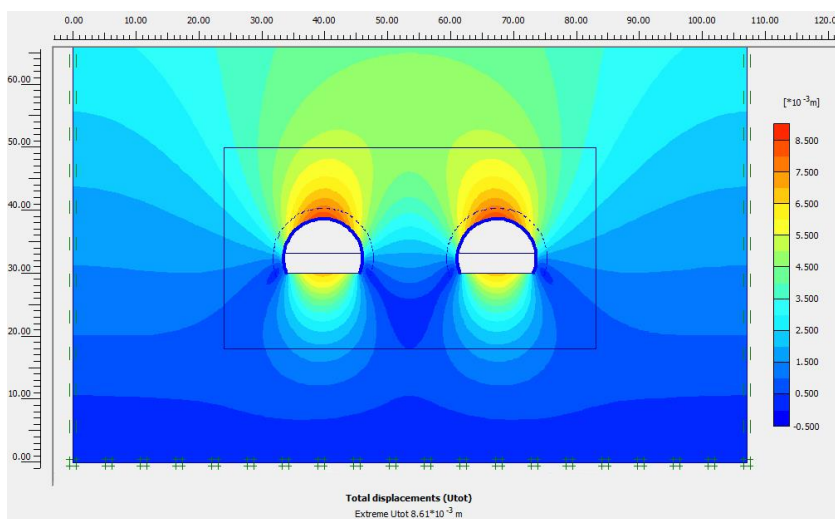
شکل ۱۳: وضعیت جابه‌جایی کل در واحد  $OM^{tr}(1)$  بعد از حفر کامل تونل و نصب نگهدارنده



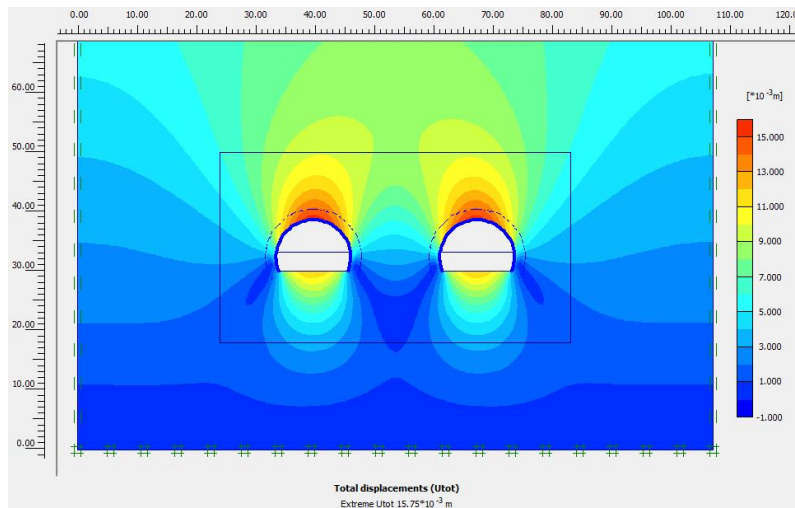
شکل ۱۴: وضعیت جابه‌جایی کل در واحد (2)  $OM^{gb}$  بعد از حفر کامل تونل و نصب نگهدارنده



شکل ۱۵: وضعیت جابه‌جایی کل در واحد (1)  $OM^{gb}$  بعد از حفر کامل تونل و نصب نگهدارنده



شکل ۱۶: وضعیت جابه‌جایی کل در واحد (2)  $OM^{tr}$  بعد از حفر کامل تونل و نصب نگهدارنده

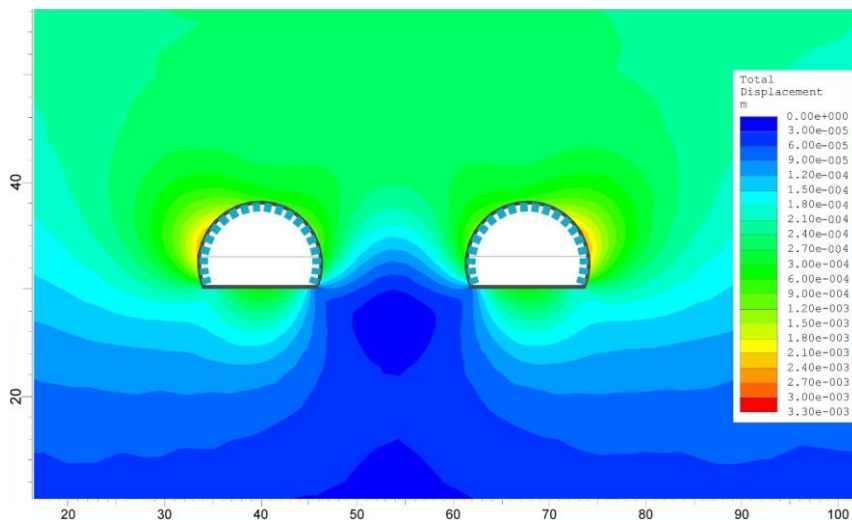


شکل ۱۷: وضعیت جابه‌جایی کل در واحد Cr بعد از حفر کامل تونل و نصب نگهدارنده

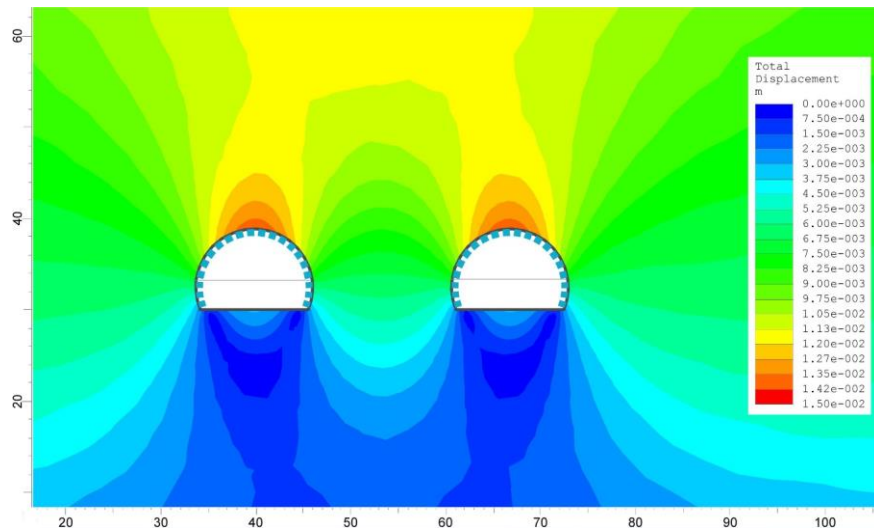
### اعتبارسنجی مدل‌سازی

در مباحث علم ژئوتکنیک اعتبارسنجی از اهمیت بالایی برخوردار است. پس از مدل‌سازی و به دست آوردن نتایج مدل نیاز است مدل‌های ساخته شده، اعتبارسنجی شوند تا به صحت مدل‌سازی پی برده شود. به منظور اعتبارسنجی و صحت روند مدل‌سازی در نرم افزار PLAXIS، از نرم افزار Phase<sup>2</sup> استفاده شده است. این نرم افزار از روش عددی اجزاء محدود برای محاسبه تنش‌ها و جابجایی‌ها در اطراف فضا‌های زیرزمینی حفاری شده استفاده می‌نماید. جهت پرهیز از تکرار مکررات دو واحد OM<sup>tr</sup>

(1) و Cr مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. همان‌طور که در شکل ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار جابه‌جایی در واحد (1) OM<sup>tr</sup>، ۰/۲۴ سانتی‌متر و در واحد Cr، ۱/۴۱ سانتی‌متر می‌باشد. این مقادیر از مقادیر تجربی کمتر و بسیار نزدیک به مقادیر روش عددی که از نرم افزار PLAXIS به دست آمده است، می‌باشد. از این رو می‌توان صحت مدل‌های ساخته شده با نرم افزار PLAXIS را تأیید کرد.



شکل ۱۸: وضعیت جابه‌جایی کل در واحد (1) OM<sup>tr</sup> بعد از حفر کامل و نصب نگهدارنده در نرم افزار Phase<sup>2</sup>



شکل ۱۹: وضعیت جابه‌جایی کل در واحد Cr بعد از حفر کامل و نصب نگهدارنده در نرم افزار Phase<sup>2</sup>

### نتیجه‌گیری

وضعیت تنش‌ها و جابه‌جایی‌های حاصل از حفاری در تحلیل پایداری فضا‌های زیرزمینی از مسائل بسیار مهم است و همواره بایستی قبل از اجرا، مورد بررسی قرار گیرد. برای رسیدن به این اهداف به طور معمول از روش‌های تجربی به همراه مدل‌سازی عددی استفاده می‌شود. با استفاده از مدل‌سازی عددی می‌توان به درک توزیع مجدد تنش، رفتار توده‌سنگ، نواحی شکست و پیش‌بینی مقادیر تغییر شکل ناشی از حفاری دست یافت. در این پژوهش از روش‌های تجربی RMI، Q، GSI و RMI و از نرم افزار PLAXIS برای تحلیل پایداری تونل قطعه سوم آزادراه ارومیه- تبریز استفاده شد. با توجه به طبقه‌بندی‌های تجربی، کیفیت توده‌سنگ واحد OM<sup>tr</sup> (1) خوب، واحدهای OM<sup>gb</sup> (2)، OM<sup>tr</sup> (1) و OM<sup>tr</sup> (2) متوسط و واحد Cr ضعیف تعیین شد و با نظر به کیفیت توده‌سنگ‌ها، سیستم نگهدارنده توسط طبقه‌بندی‌های تجربی پیچ‌سنگ به طول ۳ متر و به فاصله ۱/۳۵ تا ۲/۵ متر به همراه شاتکریت مسلح به ضخامت ۵ تا ۶ سانتی‌متر برای واحد OM<sup>gb</sup> (1)، پیچ‌سنگ به طول ۴ متر و به فاصله ۱ تا ۲ متر به همراه شاتکریت مسلح به ضخامت ۱۰

تا ۱۵ سانتی‌متر برای واحدهای OM<sup>gb</sup> (2)، OM<sup>tr</sup> (1) و (2) و پیچ‌سنگ به طول ۴ تا ۵ متر و به فاصله ۱ تا ۲ متر به همراه شاتکریت مسلح به ضخامت بیش از ۱۵ سانتی‌متر برای واحد Cr پیشنهاد شد. با وجود سه دسته درزه اصلی در طول تونل، گوه‌های بحرانی با کمک نرم افزار Unwedge تشخیص داده شد و برای پایداری آن‌ها نرم افزار شاتکریت مسلح با ضخامت ۱ سانتی‌متر را پیشنهاد داد. مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار PLAXIS نشان داد که در حفاری تک مرحله‌ای، جابه‌جایی کل بیشتر از حد تعیین شده توسط روابط تجربی است؛ بنابراین حفاری به صورت دو مرحله‌ای مدل شد. با توجه به سیستم پیشنهاد شده توسط طبقه‌بندی‌های تجربی و مدل‌سازی‌های متعدد در نرم افزار PLAXIS، اجرای شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر برای واحد OM<sup>tr</sup> (1)، با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر برای واحدهای OM<sup>gb</sup> (1)، OM<sup>gb</sup> (2) و OM<sup>tr</sup> (2) و با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر برای واحد Cr به عنوان سیستم نگهدارنده پیشنهاد شد. در این حالت جابه‌جایی کل برای واحدهای مختلف کمتر از حد تعیین شده توسط روابط تجربی است؛ و کمترین ضریب اطمینان حاصل شده با

### سپاسگزاری

بدینوسیله نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت طرح نو اندیشان که در انجام بازدیدهای صحرایی و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز یاری-رسانمان بوده‌اند، ابراز می‌دارند.

مقدار  $2/13$  برای واحد  $OM^H(1)$  است که از ضریب اطمینان در نظر گرفته  $(1/5)$  بیشتر است. همچنین جهت تأیید صحت مدل‌سازی، مدل با نرم افزار  $Phase^2$  نیز اعتبارسنجی شد که نتایج حاصل شده بسیار به یکدیگر نزدیک بودند.

### پانویس

- 1-Monitoring
- 2-Near End
- 3-Far End
- 4-Rock mass tensile strength
- 5-Uniaxial rock mass compressive strength

- 6-Global rock mass compressive strength
- 7-Rock mass modulus of deformation
- 8-Modulus of Elasticity
- 9-Finite Element Method
- 10-Node

### منابع

-طریق ازلی، ص.، ۱۳۸۳. تحلیل پایداری تونل انحراف سد درونگر و ارائه سیستم نگهدارنده، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.  
-قدیرزاده، ا. و انوری، ا.، ۱۳۸۱. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ آذرشهر، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.  
-نبوی، م.ح.، ۱۳۵۵. دیپاچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران، ۱۰۹ ص.  
-نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰۰ راه‌ها، ۱۳۹۲. سازمان نقشه‌برداری کشور.

-اجل لوثیان، ر.، دادخواه، ر. و حسین میرزایی، ز.، ۱۳۹۵. کاربرد زمین‌شناسی مهندسی در تونل‌ها، چاپ اول، انتشارات علوی، تهران. ۳۳۳ ص.  
-آقانباتی، ع.، ۱۳۸۵. زمین‌شناسی ایران، چاپ دوم، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، تهران. ۶۴۰ ص.  
-سلطانی سیسی، غ.، امینی آذر، ر.، یوسفی راد، ا. و جلال‌زاده، م.، ۱۳۸۴. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ارومیه، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.  
-شرکت مهندسی طرح نو اندیشان، ۱۳۹۶. گزارش زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک مسیر قطعه ۳ آزادراه ارومیه - تبریز، تهران، ۱۵۸ ص.

-Barton, N., Loset-Lien, R. and Lunde, J., 1980. Application of the Q-system in design decisions: In *Subsurface space*, v. 2, p. 553-561.  
-Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass classification*: Wiley, New York, 251 p.  
-Bieniawski, Z.T., 1973. *Engineering classification of jointed rock masses*: *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs*, v. 15, p. 335-344.

-Brown, E.T. and Hoek, E., 1978. Trends in relationships between measured rock in situ stresses and depth. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, v. 15, p. 211-215.  
-Cai, M., Kaiser, P.K., Uno, H., Tasaka, Y. and Minami, M., 2004. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, v. 41, p. 3-19.

- Carranza Torres, C. and Diederichs, M., 2009. Mechanical analysis of circular Liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets. *Tunneling and underground space technology*, v. 24, p. 506-532.
- Grimstad, E. and Barton, N., 1993. Updating the Q-System for NMT: Proc. Int. Symp. On Sprayed Concrete Modern use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes, (eds Kompen, Opsahl and Berg). Oslo: Norwegian Concrete Assn, v. 9, p. 119-127.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1988. The Hoek-Brown failure criterion – update: Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (ed. J.H. Toronto: Civil Engineering Dept., University of Toronto), p. 167-179.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W. F., 1998. Support of underground excavation in hard rock: A. A. Balkema, Rotterdam, 275 p.
- Hoek, E., Marinos, P. and 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: *Bulletin Engineering Geology and the environment*, v. 57, p. 151-160.
- Hsiao, F.Y., Wang, C.L. and Chern, J.C., 2009. Numerical simulation of rock deformation for support design: *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 24, p. 14-21.
- ISRM, 1981. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses: Rock Characterization, Testing and Monitoring, London. Pergamon, Oxford, 221 p.
- McCutchin, W.R., 1982. Some Elements of a Theory of Insitu Stresses, *Int. Jr. Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Pergamon, v. 19, p. 201-203.
- Palmstrom, A., 1996. Characterizing rock mass by the Rmi for use in practical rock engineering, Part 2: some practical application of the Rock Mass index: *Tunneling and underground space technology*, v. 11, p. 287-303.
- Palmström, A., 2000. Recent developments in rock support estimates by the Rmi: *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, v. 6, p. 1-19.
- Purwanto, P., 2013. Fundamental study on support systemat cibaliung underground gold mine, Indonesia, *procedia earth and planetary science*, v. 6, p. 419-425.
- Rahimi, B., Shahriar, K. and Sharifzadeh, M., 2014. Evaluation of rock mass engineering geological properties using statistical analysis and selecting proper tunnel design approach in Qazvin–Rasht railway tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 41, p. 206-222.
- Rehman, H., Najji, A.M., Ali, W., Junid, M., Abdullah, R.A. and Yoo, H., 2020. Numerical evaluation of new Austrian tunneling method excavation sequences: A case study. *International Journal of Mining Science and Technology*, v. 30, p. 381-386.
- Sakurai, S., 1997. Lessons learned from field measurements in tunneling: *Tunneling and underground space technology*, v. 12, p. 453- 460.
- Sakurai, S., Akutagawa, S., Takeuchi, K., Shinji, M. and Shimizu, N., 2008. Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method: *Tunneling and Underground Space Technology*, v. 62, p. 185-196.
- Sheory, P.R., 1994. A theory for in Situ Stresses in Isotropic and Transversely Isotropic Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences &*

- Geomechanics Abstracts, v. 31, p. 23 - 34.
- Singh, B. and Goel, R.K., 1999. Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering: Elsevier Science, 282 p.
- Terzaghi, K. and Richart, F.E., 1952. Stresses in rock about cavities. Geotechnique, v. 3, p. 57-90.
- Varadarajan, A., Sharma, K.G., Desai, C.S. and Hashemi, M., 2001. Analysis of a powerhouse cavern in the Himalaya: Int. J. Geomech, v. 1, p. 109-127.
- Yasitli, N.E., 2016. Comparison of input parameters regarding rock mass in analytical solution and numerical modelling. Journal of African Earth Sciences. Southern Africa, v. 45, p. 188-216.
- Yertutanol, K., Akgün, H. and Sopacı, E., 2020. Displacement monitoring, displacement verification and stability assessment of the critical sections of the Konak tunnel, İzmir, Turkey. Tunnelling and Underground Space Technology, v. 101.