

ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های مسیر تونل پیرشریف واقع در آزاد راه اراک-خرم‌آباد و پیشنهاد سیستم نگهدارنده بر اساس روش‌های تجربی و عددی

علی محمودیان هریس*^۱، محمدرضا آصف^۲، علی قنبری^۳ و حسین قربانی^۴

۱ و ۲- دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران

۳- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی تهران

۴- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اصفهان

نویسنده مسئول: alimahmudian815@yahoo.com *

دریافت: ۹۴/۱۰/۲۸ پذیرش: ۹۵/۵/۱۱

چکیده

در این پژوهش به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و برآورد کیفیت توده‌های سنگی و تمهیدات سیستم نگهدارنده مقدماتی برای تونل پیرشریف، از روش‌های مختلف تجربی و عددی استفاده شد. در روش تجربی از چهار سیستم طبقه‌بندی RMR (طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ)، Q (شاخص کیفی تونل‌زنی)، GSI (اندیس مقاومت زمین‌شناسی) و RMI (شاخص توده‌سنگ) استفاده گردید. در روش عددی نیز از روش تعادل حدی (نرم‌افزار Unwedge) و روش المان محدود (نرم‌افزار Phase²) استفاده شد. هم‌چنین به منظور تخمین پارامترهای مقاومتی توده‌سنگی از معیار تجربی هوک - براون استفاده شد.

نتایج تحلیل‌های تجربی نشان داد که مقطع اول تونل نسبت به مقطع دوم آن شرایط ناپایدارتری دارد. نتایج تحلیل با Unwedge نیز نشان داد که بیش‌ترین نوع ناپایداری، لغزشی و ریزش‌های گوه سنگی از دیواره و سقف تونل می‌باشد. هم‌چنین تحلیل با Phase² مشخص کرد که حفر یک مرحله‌ای به علت ایجاد جابه‌جایی‌های بیش از حد مجاز، امکان‌پذیر نیست. لذا حفاری در دو مرحله‌ای حفر طاق و پطاق پیش‌بینی شد. در ادامه سیستم نگهداری موقت با استفاده از روش‌های تجربی و عددی پیشنهاد گردید. در نهایت اینکه باید در نظر داشت که چگونگی استفاده روش‌های مختلف تجربی و عددی در طراحی تونل از اهمیت زیادی برخوردار است، چرا که، به ترتیب از روش‌های تجربی به روش‌های عددی بر میزان دقت و اعتمادپذیری طراحی انجام شده، افزوده می‌شود. البته باید ذکر کرد که این روش‌ها جدا از یکدیگر نبوده، بلکه با قرارگیری در راستای یکدیگر می‌توانند موجب تکامل روند طراحی سازه‌های زیرزمینی گردند و نتایج قابل اطمینان‌تری نسبت به حالتی که تنها از یک روش استفاده شود، ارائه نماید. هم‌چنین استفاده از روش‌های متعدد و جدید تجربی می‌تواند در صحت‌سنجی نتایج روش‌های عددی که معمولاً خطایشان مشهود نیست، کمک نماید.

واژه‌های کلیدی: ژئومکانیک، توده‌سنگ، تونل پیرشریف، سیستم نگهدارنده، المان محدود

۱- مقدمه

صورت می‌گیرد.

تونل پیرشریف به مختصات جغرافیایی "۳۶' ۴۳" ۴۸° طول شرقی و "۴۸' ۴۱" ۳۳° عرض شمالی در قطعه سوم آزاد راه و در کیلومتر ۹۵+۵۰۹ (ورودی) الی ۹۵+۶۶۰ (خروجی) واقع شده است. تونل پیرشریف (تونل شماره ۳) در حدود ۲۳ کیلومتری جنوب‌غربی شهر بروجرد و حدود ۳۸ کیلومتری شمال‌شرق خرم‌آباد قرار دارد.

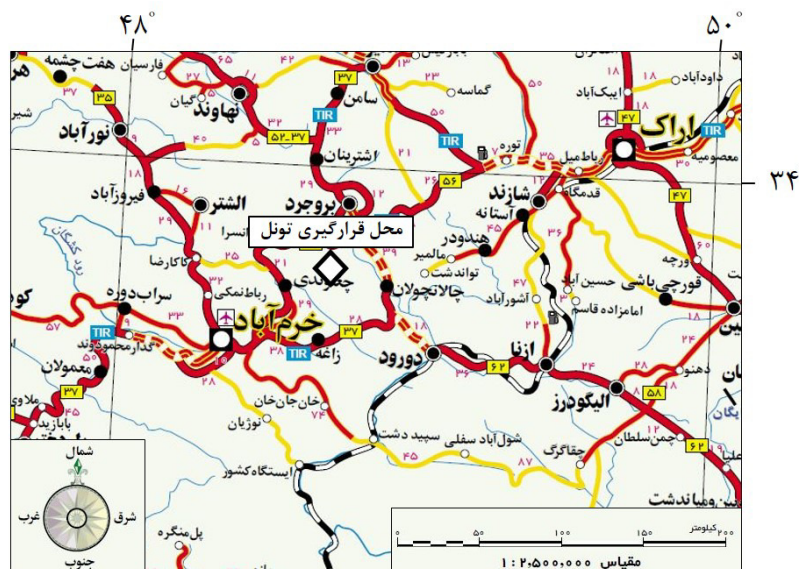
تونل مزبور دارای طول تقریبی ۱۵۱ متر و با روباره‌ی حداکثری ۲۷ متر بوده و توده‌سنگ‌های مسیر تونل نیز عمدتاً از سنگ‌آهک مارنی نازک - متوسط لایه و سنگ آهک توده‌ای ضخیم لایه تشکیل شده است. مقطع تونل با توجه به نیازهای طرح به شکل D با عرض ۱۵/۳۵ متر

پروژه ملی آزاد راه اراک - خرم‌آباد، بخشی از مسیر آزاد راهی شمال - جنوب کشور به شمار می‌آید که به طول ۱۳۴ کیلومتر از شازند به سمت چالانچولان و از آنجا به سمت منطقه پیرشریف بروجرد در حال اجرا است. این پروژه در دو فاز انجام می‌گیرد که فاز اول آن ۶۸ کیلومتر طول دارد و شهر بروجرد را به اراک متصل می‌کند و فاز دوم آن از چالانچولان تا بروجرد در ۴ قطعه انجام می‌شود. این پروژه از این نظر نیز حائز اهمیت می‌باشد که حذف موانع دشوار طول مسیر از طریق احداث شش دستگاه تونل جمعاً به طول بیش از ۹۰۰۰ متر که تونل پیرشریف (تونل شماره ۳) نیز یکی از آنهاست،

توسط زاگرس چین‌خورده محدود می‌گردد. حداکثر ارتفاع موجود در منطقه ۱۹۰۰ متر است که گه‌گاه ارتفاعات سنگ‌خارائی شامل کوه‌های سردره با ارتفاع ۲۵۴۶ متر و کوه سه‌کورا با ارتفاع ۲۳۱۰ متر در میان آن‌ها دیده می‌شود [۳].

واحدهای سنگ‌چینه‌ایی تشکیل‌دهنده تونل‌ها عمدتاً از جنس سنگ‌آهک، سنگ‌آهک مارنی و مارن می‌باشد که واحدهای سنگ‌آهکی و سنگ‌آهک مارنی در محدوده مورد مطالعه، گسترش بیش‌تری دارند. گستره مورد مطالعه شامل سازندهای شهبازان و آسماری متعلق به دوران سنوزئیک می‌باشد و تونل در سازند آسماری واقع شده است [۱].

شکل (۲) مقطع زمین‌شناسی تونل پیرشریف را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت قرارگیری و نقشه راه‌های دسترسی به تونل

برداشت شده است [۱۰]. در ادامه به بررسی تحلیل آماری نتایج برداشت‌های صحرایی ناپیوستگی‌ها توسط نرم‌افزار Dips 5.1 پرداخته شد. براساس نتایج بدست آمده دو دسته ناپیوستگی غالب (دو دسته درزه به همراه سیستم لایه‌بندی) هم در محدوده دهانه ورودی تونل و هم در محدوده دهانه خروجی تونل تشخیص داده شد. مطالعات تکتونیکی صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه نیز نشان‌دهنده لایه‌بندی با شیب حدود ۱۵ تا ۴۰ درجه در تونل می‌باشد. نتایج مربوطه بطور خلاصه در جدول (۱) ارائه شده است.

و ارتفاع ۹/۷ متری طراحی شده است [۳]. مهم‌ترین راه‌های دسترسی به گستره مورد مطالعه تونل، از طریق جاده ارتباطی بروجرد - چغلوندی و روستاهای دینارآباد و پیرشریف می‌باشد (شکل ۱).

۲- زمین‌شناسی مسیر تونل

گستره مورد مطالعه در زون ساختاری زاگرس خرد شده (زاگرس مرتفع) قرار دارد. این زون با روند عمومی شمال غرب جنوب‌شرق و به موازات زون سنندج - سیرجان و زاگرس چین‌خورده از یک سری ارتفاعات بلند و دیوارساز تشکیل شده است و به صورت نوار باریکی دیده می‌شود، که دارای عرض‌های متغیری است.

حد شمالی ناحیه مذکور با زون سنندج - سیرجان به وسیله گسل راست‌الغز راست‌گرد دورود و حد جنوبی آن

۳- بررسی زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی

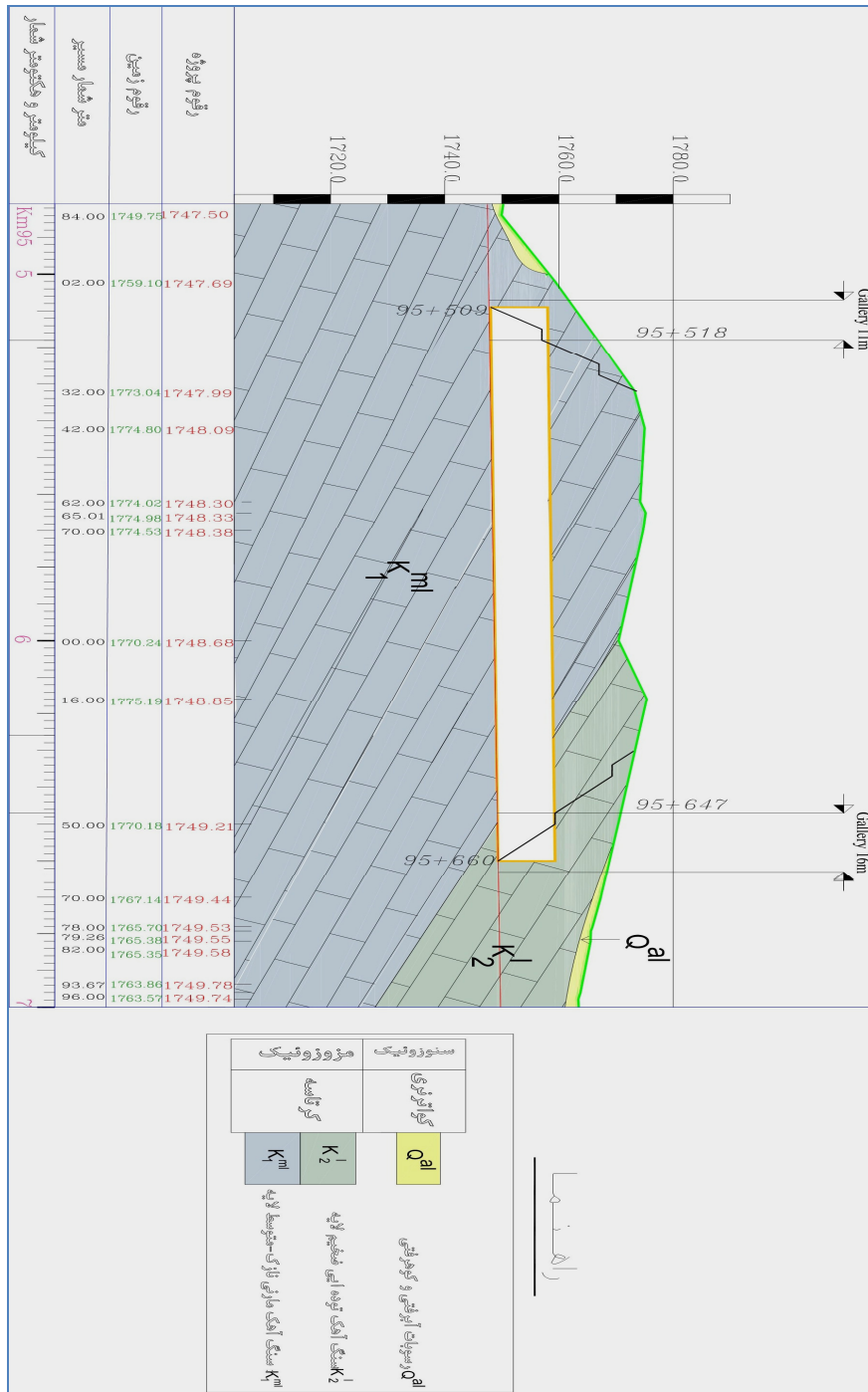
توده‌های سنگی مسیر تونل

بررسی زمین‌شناسی مهندسی و مطالعات ژئوتکنیکی عمدتاً شامل: برداشت ناپیوستگی‌ها، حفاری‌های اکتشافی و طبقه‌بندی مهندسی توده‌های سنگی می‌باشد.

۳-۱- برداشت ناپیوستگی‌ها

به طور کلی اطلاعات مربوط به ۱۱۸ ناپیوستگی در طول مسیر تونل (۷۳ ناپیوستگی در محدوده دهانه ورودی و ۴۵ ناپیوستگی نیز در محدوده دهانه خروجی) بر اساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ^۱ ISRM

^۱ International Society for Rock Mechanics



شکل ۲. مقطع زمین‌شناسی تونل پیرشریف

جدول ۱. موقعیت ناپیوستگی‌ها در مسیر تونل

موقعیت	نشانه درزه	نوع ناپیوستگی	جهت شیب / شیب
محدوده ورودی تونل	J ₁	درزه غالب	۸۰ / ۰۳۰
	J ₂	درزه غالب	۵۵ / ۱۲۵
	B	لایه بندی	۴۰ / ۱۹۷
محدوده خروجی تونل	J ₁	درزه غالب	۷۵ / ۱۴۰
	J ₂	درزه غالب	۷۰ / ۲۱۰
	B	لایه بندی	۴۲ / ۲۱۰

ارتفاع روباره این زون ۲۷ متر می‌باشد و حدود ۱۱۷ متر از طول تونل را در خود جای داده است. زون دوم از کیلومتر ۹۵+۶۲۶ الی ۹۵+۶۶۰ می‌باشد و شامل سنگ‌آهک توده‌ای ضخیم لایه است که متوسط ارتفاع روباره این زون در تونل ۱۲ متر می‌باشد. حدود ۳۴ متر از تونل نیز در این زون واقع شده است.

۳-۲- حفاری‌های اکتشافی

به منظور آگاهی از شرایط زیرسطحی و همچنین اخذ نمونه‌های سنگی برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، اقدام به حفر گمانه شده است. مطالعات صحرایی انجام شده بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه‌های ماشینی BH:TU09 و BH:TR02 صورت گرفته که اطلاعات مربوط به آن‌ها در جدول (۲) ارائه گردیده است. همچنین نمای کلی از سایت گمانه‌های BH:TU09 و BH:TR02 در شکل (۳) دیده می‌شود.

مسیر تونل پیرشریف از واحد سنگ‌آهک مارنی نازک-متوسط لایه عبور می‌نماید که در مسیر انتهایی به سنگ آهک توده‌ای می‌رسد. شیب لایه‌بندی از بخش ورودی به سمت خروجی تونل (از کیلومتر کمتر به پیش‌تر) می‌باشد. در بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی یک منطقه، توده‌سنگ‌های با مشخصات ساختاری و لیتولوژیکی یکسان و مشابه تحت عنوان مناطق ساختاری در نظر گرفته می‌شوند. لذا بخش‌بندی توده‌های سنگی در طول تونل، با توجه به تشکیلات رسوبی، جهت‌گیری و تراکم ناپیوستگی‌ها، عمق هوازدگی و ارتفاع روباره تونل صورت گرفته و تونل به دو بخش تقسیم‌بندی شده است. زون اول از محدوده‌ی ورودی تونل و کیلومتر ۹۵+۵۰۹ الی ۹۵+۶۲۶ می‌باشد. جنس سنگ‌های این لایه از آهک مارنی نازک - متوسط لایه تشکیل شده است. حداکثر



شکل ۳. نمایی از محل گمانه‌ها

جدول ۲. مختصات محل گمانه‌های تونل گستره مورد مطالعه

شماره گمانه	کیلومتر	موقعیت	عمق حفاری شده (متر)	زاویه حفاری (درجه)
BH:TU09	۹۵+۵۵۰	نیمه خروجی تونل پیرشریف (تونل سوم)	۳۰	۹۰
BH:TR02	۹۵+۷۰۰	مابین تونل‌های سوم و چهارم	۱۶	۹۰

گمانه BH:TR02 هم تا عمق ۱۳ متری آبرفت، و ۳ متر انتهایی آن سنگ‌آهک مارنی می‌باشد. مقدار RQD نیز به طور متوسط در حدود ۹۵ می‌باشد. همچنین نتایج بررسی‌ها در گمانه حفر شده در محدوده تونل‌های مورد مطالعه نشان از عدم وجود آب در اعماق حفاری شده می‌باشد. به بیان دیگر سطح ایستابی از اعماق حفاری شده در گمانه‌ها پایین‌تر می‌باشد.

گمانه BH:TU09 تا عمق ۴ متری آبرفت و پس از آن تا آخر گمانه سنگ‌آهک مارنی است که دارای مقاومت نسبتاً خوبی می‌باشد. به طور متوسط مقدار RQD^۱ تا عمق ۱۵ متر در حدود ۶۵ و از عمق ۱۵ تا ۳۰ متر در حدود ۸۰ می‌باشد.

^۱ Rock Quality Destination

۳-۳- مطالعات آزمایشگاهی

به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی واحدهای سنگی دربرگیرنده تونل پیرشریف، آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگی بدست آمده از حفاری‌های اکتشافی، انجام شده است. آزمون‌های مذکور بر اساس استاندارد ISRM [۱۰] انجام شده و شامل: آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، وزن واحد حجم و تخلخل است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

۴- طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ

طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها، پایه و اساس روش‌های تجربی بوده و کاربرد گسترده‌ای در مهندسی سنگ دارد. به طور کلی، با ترکیب یافته‌های مشاهده شده به همراه تجربه و قضاوت مهندسی، می‌توان توده‌سنگ را طبقه‌بندی نموده و شرایط توده‌سنگ و میزان نگهداری لازم را مورد ارزیابی قرار داد. هر طبقه‌بندی، کوششی برای ارزیابی توده‌سنگ در هر پروژه بوده و از این رو گزینش پارامترهای آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد [۲].

میلن^۲ و همکاران کاربرد اصلی روش‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ را در برآورد شرایط پایدار برای توده‌سنگ‌های دربرگیرنده فضاهای زیرزمینی، ارائه سیستم نگهداری مناسب، مشخص نمودن مواد سنگی با خواص ژئومکانیکی یکسان و فراهم آوردن شرایط برای تخمین پارامترهای مقاومتی و ژئومکانیکی توده‌سنگ بیان کرده‌اند [۱۱].

بر این اساس، کیفیت توده‌سنگ‌های دربرگیرنده تونل پیرشریف، با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی RMR^۳ [۴]، Q^۴ [۶]، GSI^۵ [۵] و RMI^۶ [۱۲]، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این طبقه‌بندی‌ها به طور خلاصه در جدول (۴) ارائه شده است.

۴-۱- زمان پابرجایی تونل بدون سیستم نگهدارنده (Stand - up time)

در این مطالعه جهت ارزیابی و تعیین زمان پابرجایی تونل، بدون سیستم نگهدارنده از نمودار شکل (۴) که توسط بنیاوسکی ارائه گردیده، استفاده شده است [۴].

در این نمودار، زمان پابرجایی تونل براساس رابطه بین مقدار RMR و عرض فضای حفاری شده (که در تونل آزاد راهی پیرشریف، ۱۵.۳۵ متر می‌باشد) و یا فاصله جبهه کار تا محل پوشش گذاری شده برآورد گردیده، و نتایج حاصل از آن در جدول (۵) ارائه شده است.

۴-۲- طراحی سیستم نگهدارنده بر اساس روش RMR

در سال ۱۹۸۹ بنیاوسکی تمهیداتی را برای انتخاب سیستم نگهداری تونل‌ها بر اساس شاخص RMR منتشر ساخت [۴]. این تمهیدات برای مقاطع مختلف تونل در جدول (۶) ارائه شده است.

۴-۳- طراحی سیستم نگهدارنده بر اساس روش Q

با هدف ارتباط شاخص کیفی تونل‌سازی (Q) با رفتار سازه زیرزمینی و حائل‌بندی مورد نیاز (در صورت لزوم) پارامتر بعد معادل (D_e) به صورت تقسیم دهانه (قطر تونل) بر کمیت نسبت نگهداری حفاری (ESR)، به‌دست می‌آید [۶]. در این طبقه‌بندی با در نظر گرفتن ۱ برای (ESR) و با توجه به دهانه ۱۵/۳۵ متری تونل، بعد معادل (D_e)، ۱۵ برآورد شده است، لذا سیستم نگهداری پیشنهادی این طبقه‌بندی با استفاده از شکل (۵) انتخاب گردید که نتایج آن در جدول (۷) مشاهده می‌شود.

۴-۴- طراحی سیستم نگهدارنده بر اساس طبقه‌بندی RMI

این طبقه‌بندی اولین بار توسط آقای پالمستروم^۷ در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است و یکی از جدیدترین و ساده‌ترین طبقه‌بندی‌ها علاوه بر داشتن فرمول‌های زیاد می‌باشد [۱۲]. طبق مقاله ارائه شده توسط آقای پالمستروم در سال ۲۰۰۹، با محاسبه دو فاکتور کیفیت زمین (G_e) (مشمول بر ۹ متغیر: فاکتور تعدیل سطح تنش، فاکتور تعدیل نیروی ثقل، مقاومت فشاری تک‌محوری، پارامتر درزه‌داری، حجم بلوک، فاکتور شرایط درزه، ضرایب تداوم درزه، زبری درزه و هوازدگی درزه) و فاکتور اندازه (S_r) (مشمول بر ۴ متغیر: قطر یا عرض تونل، ضخامت یا بعد بلوک، فاکتورهای تعدیل تعداد درزه‌ها و فاکتور تعدیل جهت دسته درزه‌های اصلی) می‌توان سیستم نگهدارنده مورد نیاز را پیشنهاد داد [۱۳]. بر این اساس، سیستم نگهدارنده مورد نیاز با استفاده از شکل (۶)، به صورت جدول (۸) خلاصه شده است.

² Milen

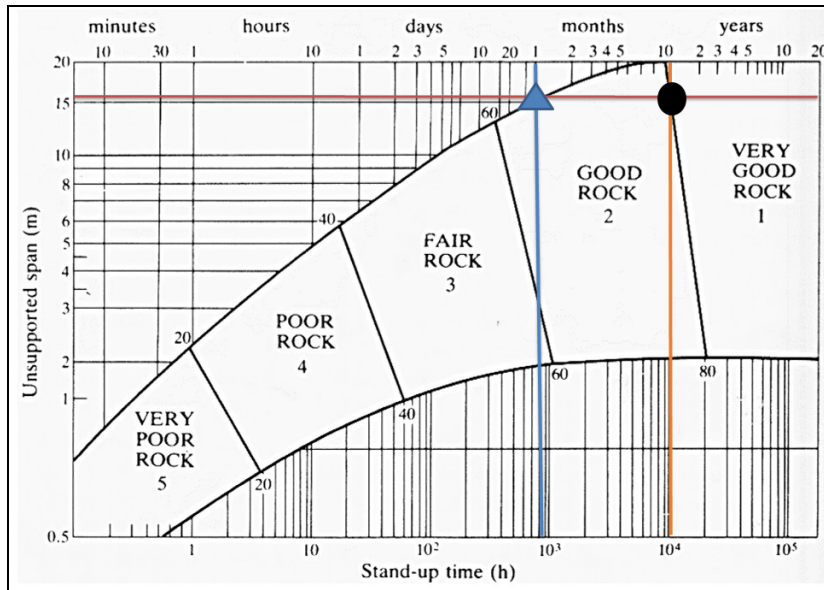
³ Rock Mass Rating

⁴ Rock Mass Quality

⁵ Geological Strength Index

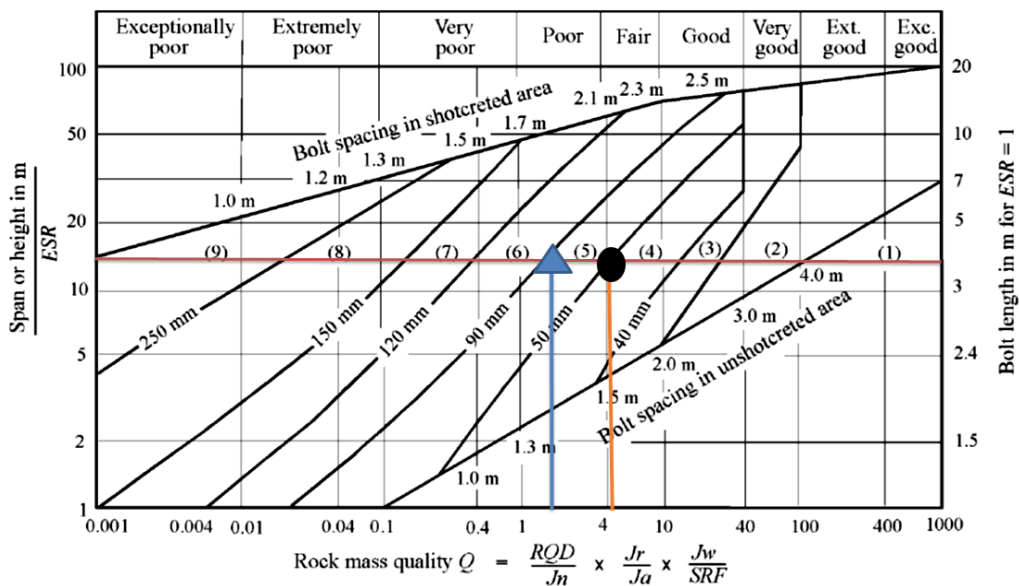
⁶ Rock Mass index

⁷ Palmstrom



شکل ۴. ارتباط بین زمان پایداری با عرض فضای حفاری بر اساس مقدار RMR [۴]

(● : limestone و ▲ : Marly limestone)

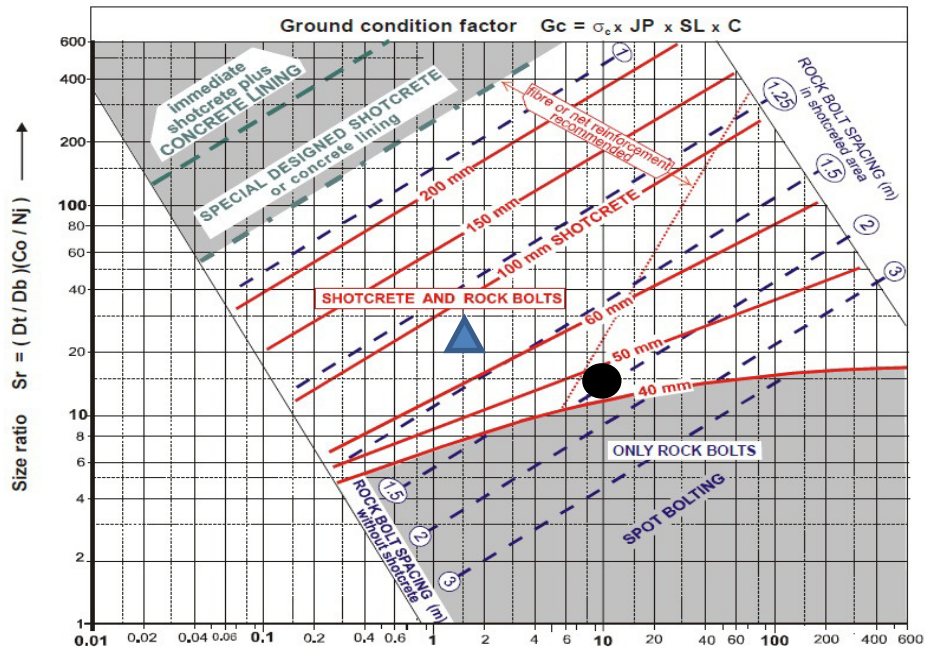


شکل ۵. وضعیت پایداری توده‌سنگ‌های مسیر تونل بر اساس طبقه‌بندی Q [۶]

(● : limestone و ▲ : Marly limestone)

جدول ۳. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ بکر

Limestone واحد سنگی			Marly limestone واحد سنگی			پارامتر
Ave	Max	Min	Ave	Max	Min	
۲/۴۰	۲/۴۴	۲/۳۷	۲/۳۹	۲/۴۱	۲/۳۷	وزن واحد حجم (γ) (gr/cm ³)
۲۶/۱۹	۳۱/۹۰	۲۰/۴۸	۲۵/۱۲	۲۸/۳۷	۲۱/۸۷	مقاومت فشاری تک محوری (UCS, (MPa)
۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۱۸	نسبت پواسون (ν)
۲/۹	۳/۱	۲/۷	۲/۷۵	۳/۴	۲/۱	تخلخل سنگ (%)



شکل ۶. وضعیت پایداری توده‌سنگ‌های مسیر تونل بر اساس طبقه‌بندی RMI [۱۲]

(● : limestone و ▲ : Marly limestone)

جدول ۴. خلاصه‌ای از نتایج طبقه‌بندی توده‌سنگ در مسیر تونل پیرشریف

مقدار RMI	مقدار GSI	مقدار Q	مقدار RMR	پارامتر واحد سنگی
۳/۶۵	۵۲-۵۸	۲/۱	۶۶	Marly limestone
مقاوم	سطوح درزه ضعیف و شدیداً بلوکی	ضعیف	خوب	رده توده‌سنگ
۱۶/۴۲	۶۳-۶۹	۴/۲	۸۰	Limestone
خیلی مقاوم	سطوح درزه خوب و بلوکی	متوسط	خوب	رده توده‌سنگ

جدول ۵. مقادیر زمان پایداری برای قطعات مختلف تونل بدون سیستم نگهدارنده

واحد سنگی limestone	واحد سنگی Marly limestone	پارامتر
۱۵/۳۵	۱۵/۳۵	عرض فضای حفاری (متر)
۸۰	۶۶	مقدار RMR
۱۳	۱	Stand-up time (ماه)

جدول ۶. سیستم نگهدارنده پیشنهادی تونل طبق طبقه‌بندی ژئومکانیکی

واحد	RMR	کلاس	پیچ سنگ (قطر ۲۰ میلی متر و با اتصال کابل)	شاتکریت	قاب فلزی
Marly limestone	۶۶	۲	به طور موضعی در سقف به طول ۳ متر و به فاصله ۲/۵ متر و به طور موضعی با تور سیمی	۵ cm در تاج در محل‌های مورد نیاز	لازم نیست
Limestone	۸۰	۲	به طور موضعی در سقف به طول ۳ متر و به فاصله ۲/۵ متر و به طور موضعی با تور سیمی	۵ cm در تاج در محل‌های مورد نیاز	لازم نیست

جدول ۷. سیستم نگهدارنده پیشنهادی تونل طبق طبقه‌بندی Q

واحد	Q	کلاس	پیچ سنگ (قطر ۲۰ میلی‌متر و با اتصال کابل)	شاتکریت	قاب فلزی
Marly limestone	۲/۱	۵	بولت‌های ۴ متری به فاصله ۱/۹ متر	۹۰ میلی‌متر (مسلح)	احتیاجی نیست
Limestone	۴/۲	۴	بولت‌های ۴ متری به فاصله ۲/۲ متر	۵۰ میلی‌متر (غیرمسلح)	احتیاجی نیست

جدول ۸. سیستم نگهدارنده پیشنهادی تونل طبق طبقه‌بندی RMI

واحد	RMI	پیچ سنگ	شاتکریت
Marly limestone	۳/۶۵	بولت‌های ۳/۲ متری در دیواره و ۴/۵ متری در سقف به فاصله ۱/۳ متر	۱۰۰ میلی‌متر شاتکریت مسلح با تور سیمی
Limestone	۱۶/۴۲	بولت‌های ۳ متری در دیواره و ۴/۲ متری در سقف به فاصله ۱/۷ متر	۶۰ میلی‌متر شاتکریت مسلح با تور سیمی

شده در این قسمت تونل در جدول (۱۰) نشان داده شده است که پس از نصب سیستم نگهدارنده، ضریب اطمینان به محدوده ایمنی بازگشته است. با توجه به لیتولوژی منطقه، عمق کم حفاری تونل و شرایط توده‌سنگ‌های درزه‌دار، به نظر می‌رسد بیش‌ترین نوع ناپایداری، لغزشی و ریزش‌های گوه‌سنگی از دیواره و سقف تونل می‌باشد.

تحلیل‌ها با Unwedge نشان می‌دهد که اجرای ۵ سانتی‌متر شاتکریت (با وزن واحد حجم ۲/۶ تن بر مترمکعب و مقاومت برشی ۲۰۰ تن بر مترمربع) به همراه مش فولادی و اعمال راک‌بالت به طول ۳ متر با قطر ۲۵ میلی‌متر در فواصل ۲/۵×۲/۵ متر و با زاویه عمود بر سطح داخلی تونل، به‌خوبی پایداری گوه‌ها پس از اعمال سیستم نگهداری را برای زون ۱ تونل تامین می‌کند. (شکل ۷ و جدول ۱۰)

در زون دوم تونل (Limestone) جهت دسته درزه‌ها نسبت به مسیر تونل تغییر می‌کند و بنابراین گوه‌های تشکیل شده نیز از لحاظ حجم، ضریب ایمنی و سایر پارامترها با هم‌دیگر و هم‌چنین با گوه‌های زون اول تونل متفاوت است. اطلاعات گوه‌های این زون در جدول (۱۱) آمده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که اجرای ۵ سانتی‌متر شاتکریت (با وزن واحد حجم ۲/۶ تن بر مترمکعب و مقاومت برشی ۲۰۰ تن بر مترمربع) به همراه مش فولادی و اعمال راک‌بالت به طول ۳ متر با قطر ۲۵ میلی‌متر در فواصل ۲/۵×۲/۵ متر و با زاویه عمود بر سطح داخلی تونل، به‌خوبی پایداری گوه‌ها پس از اعمال سیستم نگهداری را برای زون ۲ تونل تامین می‌کند. (شکل ۸ و جدول ۱۱).

۵- برآورد پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ

برای برآورد پارامترهای مقاومتی و برآورد مدول تغییر شکل توده‌سنگ از معیار هوک-براون [۸] و نرم‌افزار RocLab1.0 استفاده شده است. ورودی‌های این نرم‌افزار شامل ۴ پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_c)، شاخص مقاومت زمین‌شناختی (GSI)، ثابت توده سنگ (m_i) و فاکتور آشفستگی (D) می‌باشد. نتایج بدست آمده در جدول (۹) ارائه شده است.

۶- تحلیل عددی

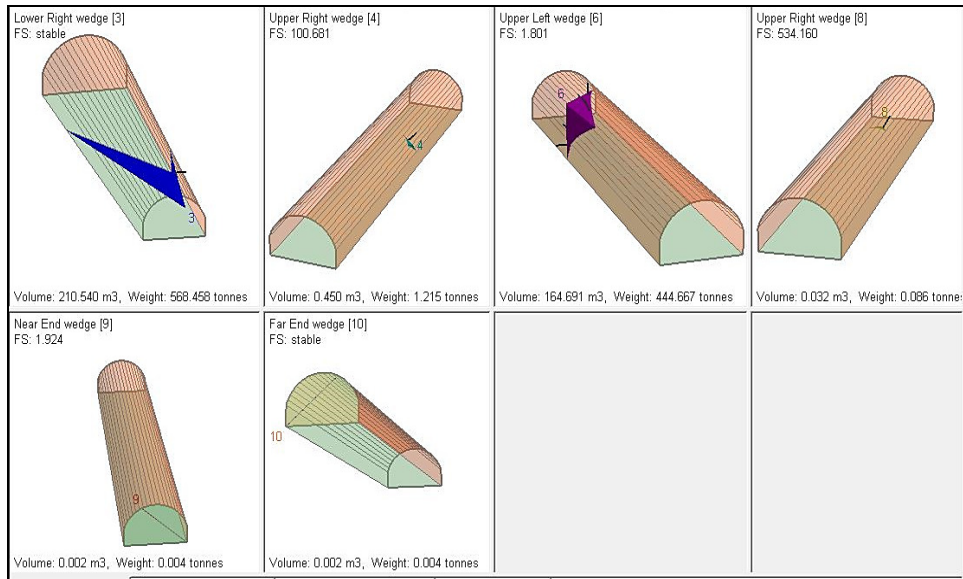
در این پژوهش برای تحلیل پایداری به روش عددی از نرم‌افزار دو بعدی Phase² ver.8.0 و نرم‌افزار تحلیل هندسی و پایداری گوه‌ای Unwedge 3.0 استفاده شد.

۱-۶- تحلیل عددی با Unwedge

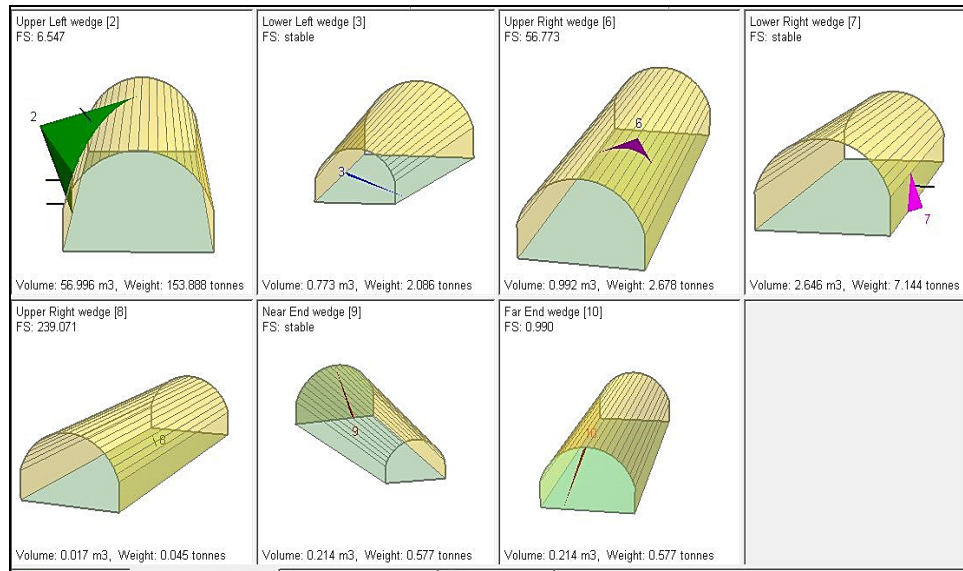
نرم‌افزار Unwedge برای تحلیل هندسی و پایداری گوه‌های حاصل از تقاطع ناپیوستگی‌های مختلف، بر اساس تحلیل‌های حدی در توده‌سنگ دربرگیرنده فضای زیرزمینی و در سنگ‌های سخت و نسبتاً سخت به‌کار می‌رود.

پارامترهای ورودی این نرم‌افزار شامل وزن مخصوص سنگ، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، ضریب زبری ناپیوستگی و مقاومت فشاری دیواره ناپیوستگی است. نرم‌افزار Unwedge بعد از تشخیص دادن گوه‌های ناپایدار و شناسایی آن‌ها، به کمک نرم‌افزار سیستمی با استفاده از شاتکریت-بولتینگ و با رعایت دو اصل تامین ضریب اطمینان و طراحی بهینه اقتصادی، نگهداری موقت را پیشنهاد می‌کند.

در زون اول تونل (Marly limestone) احتمال تشکیل چندین گوه وجود دارد. اطلاعات گوه‌های مهم تشکیل



شکل ۷. اطلاعات کلی گوه‌های تشکیل شده در زون اول بعد از نصب سیستم نگهدارنده



شکل ۸. اطلاعات کلی گوه‌های تشکیل شده در زون دوم بعد از نصب سیستم نگهدارنده

جدول ۹. نتایج پارامترهای مقاومت توده سنگ برای مقاطع مختلف تونل

واحد ۲	واحد ۱	پارامتر	
۹	۸/۵	m_i (ثابت ماده سنگ)	
Limestone	Marly limestone	لیتولوژی	
۱/۱۸۹	۰/۵۸۴	m_b	ثابت‌های هوک- براون
۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۱۱	S	
۰/۵۰۲	۰/۵۰۴	A	
۱۰۰۷۰/۷۵	۵۰۶۱/۶۲	E_m (مدول توده سنگ) (GPa)	
۶/۸۸۰	۱/۲۸۷	σ_{cm} (مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ) (MPa)	
-۰/۲۱۷	-۰/۰۷۵	σ_t (مقاومت کششی توده سنگ) (MPa)	
۴/۱۰۱	۳/۳۶۶	σ'_{cm} (مقاومت کلی توده سنگ) (MPa)	
۰/۳۹۲۰	۰/۳۶۶۸	σ_{3max} (حد نهایی σ_3) (MPa)	
۰/۵۳۶	۰/۲۴۳	C (مقاومت چسبندگی توده سنگ) (MPa)	
۵۱/۹۸	۴۷/۸۱	ϕ (زاویه اصطکاک داخلی)	

جدول ۱۰. نتایج تحلیل صورت گرفته به کمک نرم‌افزار Unwedge در زون ۱ تونل

شماره گوه	وزن گوه (تن)	موقعیت	حجم گوه (m ³)	وضعیت پایداری	ضریب اطمینان قبل از نصب نگهدارنده	ضریب اطمینان بعد از نصب نگهدارنده
۳	۵۶۸/۴۵۸	Lower right	۲۱۰/۵۴۰	پایدار	پایدار	پایدار
۴	۱/۳۱۵	Upper right	۰/۴۵۰	لغزش روی درزه ۱	۰/۳۴۵	۱۲۷/۰۲۵
۶	۴۴۴/۶۶۷	Upper left	۱۶۴/۶۹۱	لغزش روی درزه ۲	۰/۸۴۹	۱/۸۲۰
۸	۰/۰۸۶	Upper right	۰/۰۳۲	سقوط	۰/۰۰۰	۳۵۰/۴۰۹
۹	۰/۰۰۴	Near end	۰/۰۰۲	لغزش روی درزه ۲	۱/۹۲۴	۱/۷۷۲
۱۰	۰/۰۰۴	Far end	۰/۰۰۲	پایدار	پایدار	پایدار

جدول ۱۱. نتایج تحلیل صورت گرفته به کمک نرم‌افزار Unwedge در زون ۲ تونل

شماره گوه	وزن گوه (تن)	موقعیت	حجم گوه (m ³)	وضعیت پایداری	ضریب اطمینان قبل از نصب نگهدارنده	ضریب اطمینان بعد از نصب نگهدارنده
۲	۱۵۳/۸۸۸	Upper Left	۵۶/۹۹۶	لغزش روی درزه ۱ و ۲	۰/۸۸۱	۶/۵۴۷
۳	۲/۰۸۶	Lower Left	۰/۷۷۳	پایدار	پایدار	پایدار
۶	۲/۶۷۸	Upper right	۰/۹۹۲	لغزش روی درزه ۲	۰/۸۱۷	۵۶/۷۷۳
۷	۷/۱۴۴	Lower Right	۲/۶۴۶	پایدار	پایدار	پایدار
۸	۰/۰۴۵	Upper right	۰/۰۱۷	سقوط	۰/۰۰۰	۲۳۹/۰۷۱
۹	۰/۵۷۷	Near End	۰/۲۱۴	پایدار	پایدار	پایدار
۱۰	۰/۵۷۷	Far End	۰/۲۱۴	لغزش روی درزه ۲	۰/۹۹۰	۱/۹۹۷

با بررسی نتایج حاصل از جدول‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان گوه‌های ایجاد شده را در دو دسته‌ی گوه‌های با ناپایداری بزرگ (مثل گوه‌های شماره ۴ و ۶ در زون اول و شماره‌های ۲ و ۶ در زون دوم) و گوه‌های کوچک (مثل ۸ و ۹ در زون اول و ۸ و ۱۰ در زون دوم) با خطر ریزش‌های موضعی تقسیم‌بندی کرد. گوه‌های با ناپایداری بزرگ، با همان سیستم نگهداری که در بالا ذکر شد، پایدار می‌شوند ولی در رابطه با گوه‌های کوچک، می‌توان با اقداماتی چون لقی‌گیری، اجرای شاتکریت و یا مسلح‌سازی، خطرات این گوه‌ها را برطرف نمود. لازم به‌ذکر است که در رابطه با گوه‌های کوچک و ریزشی، تشخیص گوه‌های کلیدی نیز حائز اهمیت است، چرا که این گوه‌ها در صورت ریزش ممکن است باعث ناپایداری سایر گوه‌ها نیز گردند.

همچنین این نکته را نیز باید در نظر گرفت که نرم‌افزار Unwedge، جهت اعمال سیستم نگهدارنده برای پایدارسازی گوه‌های ناپایدار، بدترین وضعیت گوه ناپایدار را ملاک عمل قرار می‌دهد و سیستم نگهداری مناسب برای دستیابی به ضریب اطمینان بالاتر از ۱/۵ را برای آن محاسبه می‌کند لذا در چنین حالتی ممکن است برای گوه‌های کوچک ناپایدار (گوه‌های ۸ و ۹ در زون اول و ۸ و ۱۰ در زون دوم) بعد از اعمال سیستم نگهدارنده،

۴-۲- تحلیل عددی با Phase²

نرم‌افزار Phase² یک برنامه کرنش صفحه‌ای الاستو-پلاستیک بر پایه روش اجزای محدود (FEM^۱) بوده و مسائل را به روش دو بعدی حل می‌نماید. در این روش توده‌سنگ مورد مطالعه را به قطعات کوچک‌تری تقسیم می‌کنند که هر کدام به عنوان یک عنصر نام می‌گیرند. همچنین فرض می‌گردد که این عناصر دارای خواص مخصوص به خود بوده و در نقاط مشخصی که گره نامیده می‌شوند به یکدیگر متصل می‌شوند. جابجایی‌ها در محل گره‌ها اتفاق می‌افتد، بنابراین در این روش توده‌سنگی که بی‌نهایت درجه آزادی دارد به جسمی شبیه‌سازی می‌شود که تنها ۲ تا ۳ برابر تعداد گره‌ها درجه آزادی دارد [۱۶]. پارامترهای ورودی‌های لازم در نرم‌افزار Phase² در جدول (۱۲) آورده شده است. لازم به ذکر است که بخشی از این پارامترها از نرم‌افزار RocLab به‌دست آمده است.

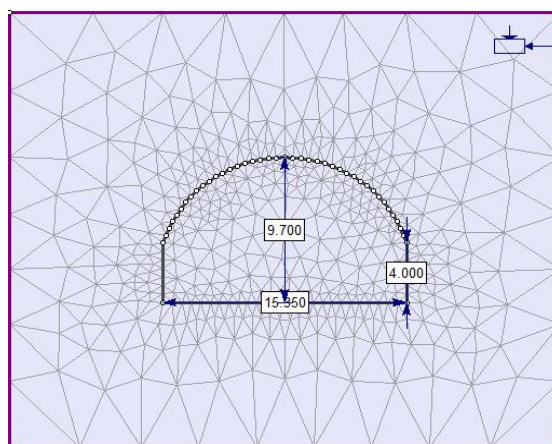
^۱ Finite Element Method

مثلی و تعداد گره‌ها در سطح منطقه حفاری، ۷۵ گره، اعمال شد که در نتیجه جمعاً ۶۹۱ گره در محیط حفاری تعریف شده تشکیل شد (شکل ۹).

برای تحلیل عددی ابتدا هندسه تونل را مطابق شکل (۹) در محیط Phase² ایجاد کردیم و در ادامه شبکه‌بندی (مش‌بندی) محیط به صورت المان‌های شش‌گوشی

جدول ۱۲. پارامترهای ورودی جهت تحلیل عددی واحدهای سنگی

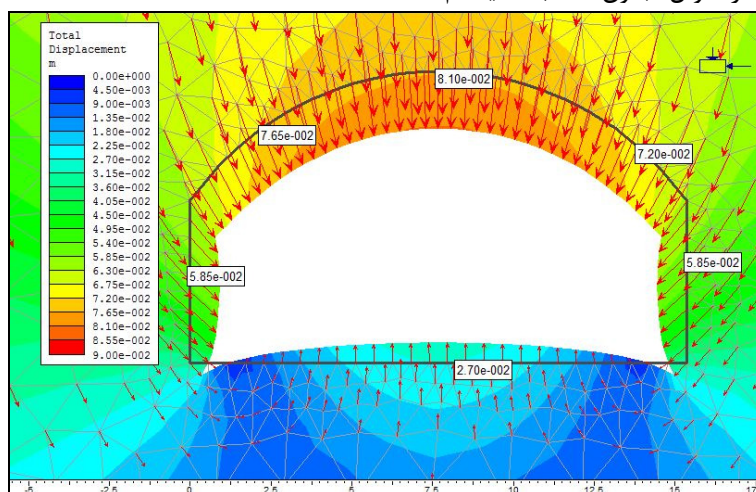
واحد	E (kgf/cm ²)	ν	حداکثر روبره (m)	C (Kpa)	ϕ	γ (MN/m ³)	k
زون ۱ (Marly limestone)	۵۳۱۶۳/۶۳	۰/۲۰	۲۷	۲۴۳	۴۷/۸۱	۰/۰۲۶	۱/۸۱
زون ۲ (Limestone)	۱۰۵۰۴/۰۸	۰/۲۱	۱۶	۵۳۶	۵۱/۹۸	۰/۰۲۷	۲/۳۷



شکل ۹. مش بندی اعمال شده در محیط نرم‌افزار Phase² برای تونل پیرشریف

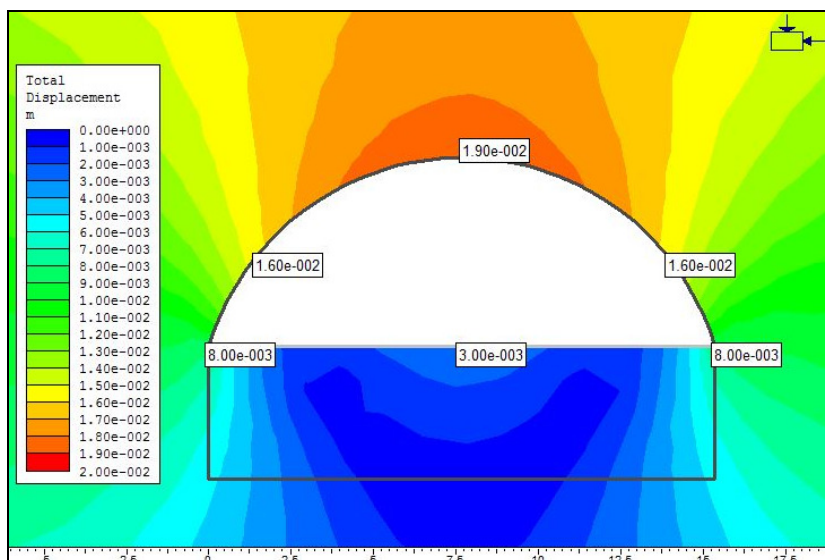
نگهداری، گسترش زون پلاستیک و افزایش تنش و در نتیجه تخریب تونل می‌باشد (شکل ۱۰). لازم به ذکر است که مدل‌سازی برای زون ۱ تونل (واحد سنگی Marly limestone) که شرایط ناپایداری دارد، انجام شد که نتایج برای زون ۲ نیز قابل تعمیم است. در ادامه مقادیر جابه‌جایی‌ها قبل و بعد از نصب نگهدارنده به همراه بیشینه کرنش برشی در جدول (۱۳) و تصاویر مربوطه در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) آمده است.

در ادامه اقدام به حفر تونل در یک مرحله می‌کنیم ولی همان‌طور که در شکل (۱۰) دیده می‌شود، حفر یک مرحله‌ای به علت ایجاد جابه‌جایی‌های بیش از حد مجاز و با توجه به قطر زیاد تونل، امکان‌پذیر نیست. لذا حفاری در دو مرحله پیش‌بینی شده است. بخش فوقانی (طاق)^۱ و بخش تحتانی (پاتاق)^۲ که به ارتفاع ۴ متر می‌باشد. در گام آغازین برای بررسی رفتار واقعی تونل، سعی شده تا پایداری آن در صورت عدم استفاده از سیستم نگهداری بررسی شود. نتیجه حفر تونل بدون نصب سیستم

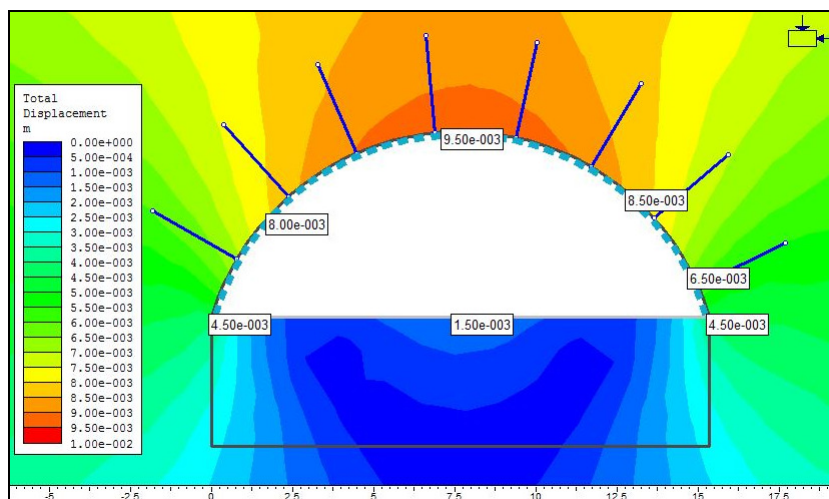


شکل ۱۰. ناپایداری و جابه‌جایی زیاد در حفر یک مرحله‌ای

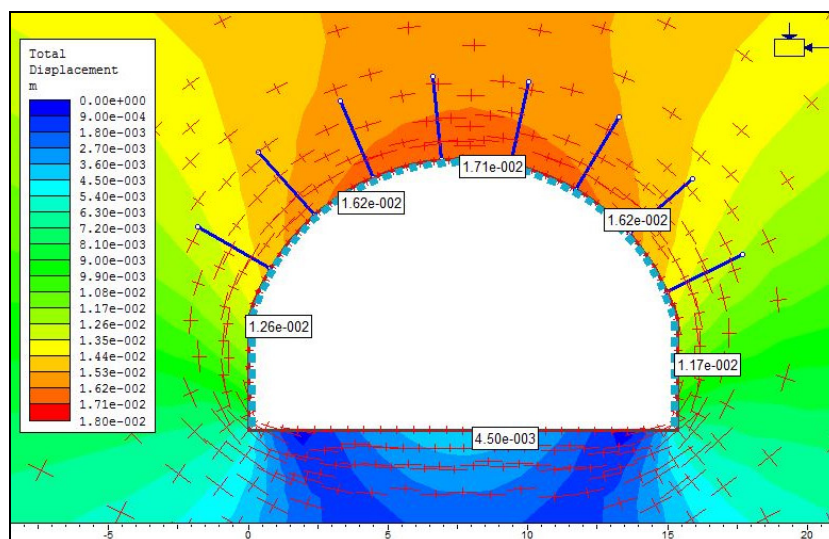
¹ Heading
² Benching



شکل ۱۱. مقادیر جابه‌جایی‌های پس از حفر طاق و بدون نصب نگهدارنده



شکل ۱۲. مقادیر جابه‌جایی‌های پس از حفر طاق و با نصب نگهدارنده



شکل ۱۳. مقادیر جابه‌جایی‌های پس از حفر کامل تونل و نصب نگهدارنده

جدول ۱۳. وضعیت پایداری تونل پیرشریف در نرم‌افزار Phase² قبل و بعد از نصب سیستم نگهدارنده

وضعیت نگهدارنده	بیشینه کرنش برشی	حداکثر جابجایی			واحد
		کف	دیواره	سقف	
قبل از نصب	۳/۵ درصد	۲ سانتی‌متر	۴/۸ سانتی‌متر	۸ سانتی‌متر	زون ۱ (Marly limestone)
بعد از نصب	۰/۱۲ درصد	۰/۴۵ سانتی‌متر	۱/۲۶ سانتی‌متر	۱/۷ سانتی‌متر	

که در آن V : ضریب پواسون γ_c : کرنش برشی بحرانی در حالت سه‌محوری و ϵ_c : کرنش محوری بحرانی در حالت فشاری محصور نشده در زمان اعمال تنش می‌باشد. با توجه به اینکه خروجی نرم‌افزار عددی به صورت میزان جابجایی است و کرنش بحرانی از روابط بالا محاسبه می‌شود، به منظور محاسبه جابجایی مجاز (U_c) و جابجایی برشی مجاز (U_{sh}) توده‌سنگ اطراف تونل نیز از روابط زیر استفاده شده است.

$$U_c = \epsilon_c \cdot a \quad (۵)$$

$$U_{sh} = \gamma_c \cdot a \quad (۶)$$

در این رابطه‌ها؛ a : شعاع معادل تونل (cm)، U_c : جابجایی مجاز در دیواره یا سقف (cm) و U_{sh} : جابجایی برشی مجاز (cm) می‌باشند.

در ادامه موارد گفته شده، برای تونل پیرشریف محاسبه شد و در جدول (۱۴) آمده است.

۴-۶- نتیجه تحلیل عددی و اعمال سیستم

نگهدارنده

با مقایسه نتایج جدول (۱۳) با جدول (۱۴) که مقادیر کرنش بحرانی و جابه‌جایی‌های مجاز براساس روش ساکورایی برای تونل پیرشریف محاسبه شده بود، می‌توان دریافت که مدل‌سازی عددی انجام شده به خوبی پایداری تونل را پیش‌بینی می‌کند.

همان‌گونه که از شکل (۱۳) پیداست حداکثر جابجایی بعد از نصب سیستم نگهدارنده به ۱/۷۱ سانتی‌متر تقلیل یافته است که این مقدار از جابجایی مجاز و حداکثر جابجایی برشی مجاز معرفی شده کمتر است و میزان حداکثر کرنش برشی حاصله بعد از نصب سیستم نگهدارنده ۰/۱۲ درصد شده است که از میزان ۰/۴۶ درصد مجاز، کمتر است و نشانگر پایداری سیستم نگهدارنده می‌باشد (شکل‌های ۱۴ و ۱۵).

۶-۳- ارزیابی پایداری تونل بر اساس مفهوم کرنش

برای تحلیل پایداری، مقادیر جابجایی به دست آمده در نقاط مختلف فضای زیرزمینی، حاصل از مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار Phase² با مقادیر جابجایی بحرانی حاصل از روابط ساکورایی مقایسه گردید.

ساکورایی^۱ و همکارانش روشی را برای ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی با توجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرده‌اند. آنها سه تراز هشدار خطر به صورت زیر ارائه دادند: [۱۵].

(۱) تراز هشدار خطر I

$$\text{Log} \epsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 0.85$$

(۲) تراز هشدار خطر II

$$\text{Log} \epsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 1.22$$

(۳) تراز هشدار خطر III

$$\text{Log} \epsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 1.59$$

در این رابطه‌ها:

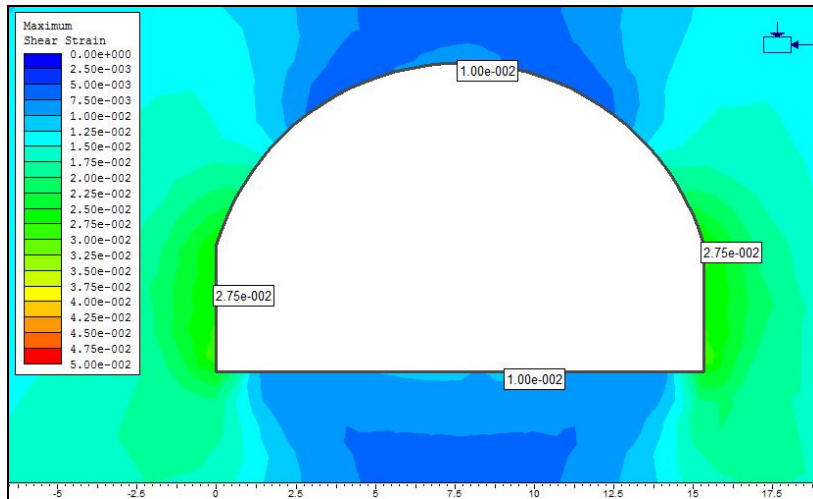
ϵ_c : کرنش بحرانی در حالت اعمال تنش بر حسب درصد و E : مدول تغییر شکل^۲ بر حسب (Kg/cm²) می‌باشد. ساکورایی تراز هشدار خطر (۲) را به عنوان مبنای طراحی تونل‌ها پیشنهاد کرده است. چنانچه مقادیر بدست آمده از نرم‌افزارهای عددی، از سطح هشدار خطر ۲ کمتر باشد، سازه پایدار است [۹].

به طور کلی در داخل فضاهای زیرزمینی، توده‌سنگ در معرض تنش سه‌محوری قرار دارد و معقول‌تر است که برای تحلیل پایداری مکانیکی از کرنش برشی ماکزیمم استفاده شود. ساکورایی و همکارانش در سال ۱۹۹۶ معادله زیر را برای محاسبه کرنش برشی بحرانی از کرنش نرمال پیشنهاد کردند [۱۴].

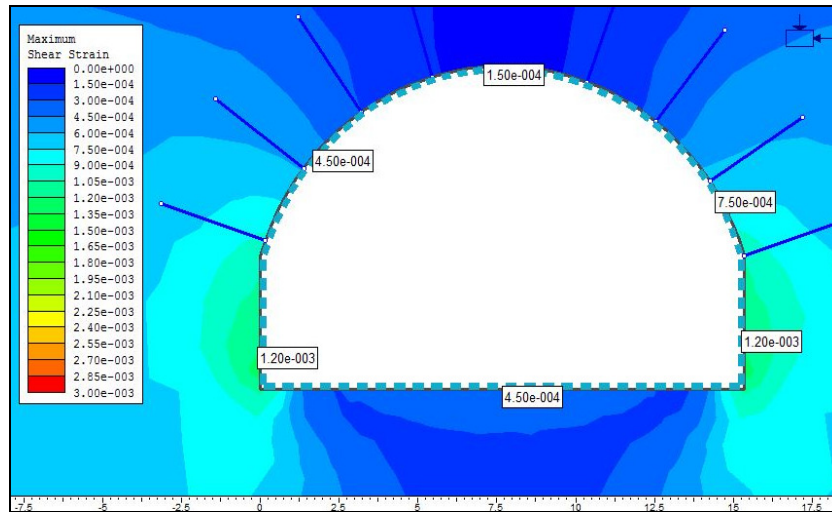
$$\gamma_c = (1 + \nu) \cdot \epsilon_c \quad (۴)$$

¹ Sakurai

² Modulus of Elasticity



شکل ۱۴. کرنش برشی قبل از نصب نگهدارنده



شکل ۱۵. کرنش برشی بعد از نصب نگهدارنده

جدول ۱۴. کرنش بحرانی و کرنش برشی بحرانی به همراه جابه‌جایی‌های مجاز برای تونل پیرشریف

U_{sh} (cm)	U_c (cm)	γ_c (%)	\mathcal{E}_c (%)	a (m)	ν	E (kgf/cm ²)	واحد
۳/۲۲	۲/۷۳	۰/۴۶	۰/۳۹	۷/۶۷	۰/۲۰	۵۳۱۶۳/۶۳	زون ۱ (Marly limestone)
۵/۰۴	۴/۲	۰/۷۲	۰/۶۰	۷/۶۷	۰/۲۱	۱۰۵۰۴/۰۸	زون ۲ (Limestone)

تزریق دوغاب سیمانی، می‌توان به پایداری لازم دست یافت.

۶-۵- تعیین ضریب ایمنی سیستم نگهداری با استفاده از نرم‌افزار Phase²

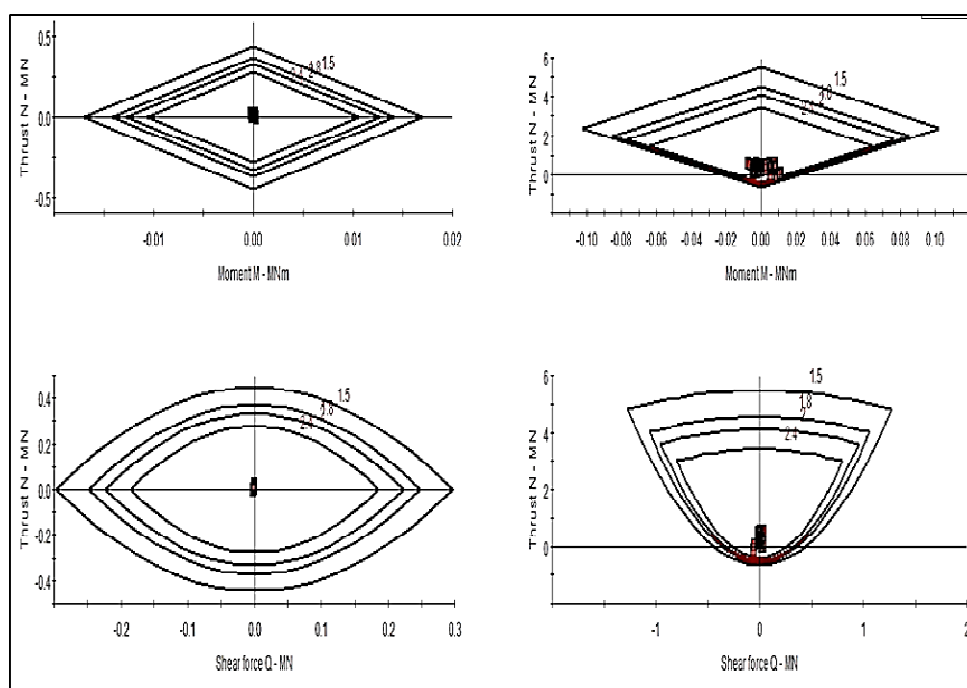
یکی از مناسب‌ترین روش‌ها در تعیین ضریب ایمنی سیستم نگهداری، استفاده از نرم‌افزار Phase² می‌باشد. در حالتی که از یک نگهداری ترکیبی مانند حائل فولادی به همراه شاتکریت استفاده شده باشد، نرم‌افزار چهار نمودار را نمایش می‌دهد. در هریک از چهار نمودار، پوش‌های

با توجه به اینکه نرم‌افزار Phase² اثر شاتکریت و راک بولت را به صورت توأمان لحاظ کرده و مورد تحلیل قرار می‌دهد، در نهایت پس از مدل‌سازی‌های متعدد و اعمال نگهدارنده‌های مختلف، این‌گونه نتیجه حاصل شد که با اعمال سیستم نگهدارنده شاتکریت مسلح به ضخامت ۵ سانتی‌متر (با مقاومت مشخصه ۳۵۰ kg/cm²) و راک بولت‌هایی به طول ۳ متر با قطر ۲۵ میلی‌متر با فاصله ۲/۵ متری از یکدیگر و با حفر چال‌های ۵۰ میلی‌متری و

در نظر گرفته شد که تمامی نقاط نیرو و گشتاوری در داخل هر چهار پوش قرار دارند که نشان‌دهنده بالا بودن ضریب ایمنی از حداقل در نظر گرفته شده یعنی ۱/۵ می‌باشد. یعنی سیستم نگهداری پیش‌بینی شده ضریب ایمنی لازمه را داراست. در ادامه با انجام آزمون سعی و خطا در ابزار Filter Data by FS، مقدار عددی ضریب ایمنی در سقف و دیواره تونل تعیین می‌گردد که بر این اساس ضریب ایمنی در بالاترین نقطه از سیستم نگهداری در سقف تونل برابر ۳/۵ و ضریب ایمنی در نقاطی از دیواره‌های تونل برابر ۴/۸ به‌دست آمد.

مربوط به ضریب ایمنی که تعداد آن‌ها توسط کاربر تعیین می‌گردد، نمایش داده شده است. در شکل (۱۶) علاوه بر پوش‌ها، تعدادی نقاط مربعی کوچک که معرف نیروها و گشتاورهای وارده در هر گره یا نقطه از سیستم نگهداری است، دیده می‌شود.

چنانچه این نقاط مربعی در داخل یک پوش قرار بگیرند، در این صورت، نقاط مورد نظر ضریب ایمنی بزرگ‌تر از مقدار آن پوش دارند و اگر تعدادی از نقاط خارج از پوش قرار بگیرند، نقاط مذکور ضریب ایمنی کوچک‌تر از آن پوش دارند. همان طور که در شکل (۱۶) نیز مشاهده می‌شود، چهار پوش به ضرایب ایمنی ۱/۵، ۱/۸، ۲ و ۲/۴



شکل ۱۶. وضعیت پوش‌های ضرایب ایمنی در نرم‌افزار Phase²

سیستم نگهدارنده سنگین‌تری نسبت به دو رده‌بندی دیگر پیشنهاد می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از طبقه‌بندی RMR، Q، RMI و Unwedge و نرم‌افزار دوبعدی Phase² بر روی توده‌سنگ‌های دربرگیرنده تونل در مقاطع اول و دوم، به علت زیاد بودن قطر تونل (۱۵/۵ متر) و نیز طولانی بودن مدت زمان بهره‌برداری از آن، پیشنهاد می‌گردد که در مراحل اولیه حفاری، تمهیدات لازم جهت سیستم نگهدارنده تونل بر اساس اجرا و نصب پیچ‌سنگ‌هایی به طول ۳ متر و با فاصله ۲/۵ متری و شاتکریت مسلح به ضخامت ۵ سانتی‌متر، اجرا گردد. همچنین با استفاده از

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده از سیستم‌های طبقه‌بندی RMR، Q، GSI و RMI، مقطع اول تونل پیرشریف نسبت به مقطع دوم آن شرایط ناپایدارتری دارد. همچنین بر اساس بررسی‌ها و محاسبات انجام شده بر مبنای معیار هوک- براون، توده‌سنگ‌های دربرگیرنده مقطع دوم تونل، دارای بالاترین مقادیر پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ بوده درحالی‌که توده‌سنگ‌های دربرگیرنده مقطع اول دارای کمترین پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ می‌باشند. مقایسه بین روش‌های تجربی نشان می‌دهد که سیستم نگهدارنده پیشنهادی RMR نسبت به Q و RMI سبک‌تر است در حالی که رده‌بندی Q محتاطانه‌تر عمل کرده و

- [4] Bieniawski, Z. T (1989) Engineering Rock Mass classification. Wiley, New York: 251 pp.
- [5] Cai, M. K (2004) Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41, 3-19.
- [6] Grimstad, E. a (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.
- [7] Hoek, E. M (1998) Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bull. Engg. Geol. Env.* 57, 151-160.
- [8] Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B (2002) Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-TAC*: p. 267-273.
- [9] Hsiao, F., Wang, C., & Chern, J (2009) Numerical simulation of rock deformation for support design. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.24, 14-21.
- [10] ISRM (1981) Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *Rock Characterization, Testing and Monitoring*, London. Pergamon, Oxford, 221 pp.
- [11] Milne, D., Hadjigeorgiou, J., & Pakalnis, R (1998) Rock mass characterization for underground hard rock mines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13 (4), 383-391.
- [12] Palmström, A (2000) Recent developments in rock support estimates by the RMI. Norway, *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, vol. 6:1-19.
- [13] Palmstrom, A (2009) Combining the RMR, Q, and RMI classification systems. www.rockmass.net, 25p.
- [14] Sakurai, S (1997) Lessons learned from field measurements in tunneling. *Tunneling and underground space technology*, 12 (4), 453-460.
- [15] Sakurai, S., Akutagawa, S., Takeuchi, K., & Shinji, M (2008) Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method. *Tunneling and Underground Space Technology*, 185-196.
- [16] Varadarajan, A., Sharma, K., Desai, C., & Hashemi, M (2001) Analysis of a powerhouse cavern in the Himalaya. *Int. J. Geomech.* 1: 109-127.

نرم‌افزار Phase² ضریب ایمنی سیستم نگهداری نیز محاسبه شد که بر این اساس ضریب ایمنی در بالاترین نقطه از سیستم نگهداری در سقف تونل برابر ۳/۵ و ضریب ایمنی در نقاطی از دیواره‌های تونل برابر ۴/۸ بدست آمد که نشانگر پایداری مناسب سیستم نگهداری می‌باشد. ضمن اجرای پروژه و پس از پیشروی حفاری تونل، در صورتی که سیستم نگهداری انتخابی مناسب بود و هیچ‌گونه مشکلی از نظر نگهداری پیش نیامد، به تدریج می‌توان سیستم نگهداری را تعدیل نمود و از پیچ سنگ‌های موردی استفاده کرد.

در این مطالعه، تحلیل پایداری تونل آزاد راهی پیرشریف با روش‌های مختلف تجربی و عددی انجام شد. چگونگی استفاده از این روش‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا، به ترتیب از روش‌های تجربی به سوی روش عددی بر میزان دقت و اعتمادپذیری طراحی انجام شده، افزوده می‌شود. به عبارت دیگر این دو روش جدا از یکدیگر نبوده، بلکه با قرارگیری در راستای یکدیگر می‌توانند موجب تکامل روند طراحی سازه‌های زیرزمینی گردند و می‌تواند نتایج قابل اطمینان‌تری نسبت به حالتی که تنها از یک روش استفاده شود، ارائه نماید. هم‌چنین استفاده از روش‌های متعدد و جدید تجربی می‌تواند در صحت سنجی نتایج روش‌های عددی که معمولاً خطای این روش‌ها مشهود نیست، به ما کمک نماید.

۸- تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از همکاری صمیمانه شرکت مهندسی مشاور طاه‌ها در برداشت‌های صحرائی و ارائه اطلاعات مورد نیاز تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

- [۱] آقائاتی، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران. چاپ دوم، تهران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی.
- [۲] سینگ، ب؛ و گوئل، ر (۱۳۸۲) طبقه‌بندی توده‌سنگ‌ها. ترجمه سیاوش تقی‌پور و مهدی رخشنده، تهران، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.
- [۳] مهندسی مشاور طاه‌ها (۱۳۹۲) گزارش زمین‌شناسی مهندسی تونل‌های مسیر آزاد راه اراک-خرم آباد.

Evaluation of the geomechanical properties of rock masses freeway tunnel Pырshryf located in Arak-Khorramabad and suggested support system based on empirical and numerical methods

A. Mahmudian^{1*}, M. R. Asef², A. Ganbari³ and H. Gorbani⁴

1, 2- College of Science, University of Kharazmi, Tehran
3- College of Engineering, University of Kharazmi, Tehran
4- Dept., of Geology, Faculty of Sciences, Esfahan University

* alimahmudian815@yahoo.com

Recieved: 2016/1/18 Accepted: 2016/8/2

Abstract

In this study, to determine the parameters of the rock mass quality Geomechanical and estimates and preliminary measures for tunnel maintenance system Pырshryf, different methods have been used experimentally and numerically. In the case of four classification system RMR (rock mass Geomechanical classification), Q (quality index tunneling), GSI (Geological Strength Index) and RMI (rock mass index) was used. The numerical method of limit equilibrium method (software Unwedge) and finite element method (the software Phase2) were used. In order to estimate the parameters of the rock mass resistance criteria Hoek - Brown was used.

The empirical analysis results showed that the first section of the tunnel to the second level, where conditions are unstable. The analysis also showed that the Unwedge instability, landslides and rock from the walls and roof of the tunnel is wedge manure. Phase2 analysis also revealed that the drilling of a step due to movements over the standards is not possible. The drill holes in two phases of the vault and Patagh was predicted. The following temporary storage system using experimental and numerical methods were proposed. Finally, it should be noted that the use of experimental and numerical methods in tunnel design is of great importance, because, in order numerical methods on the accuracy and reliability of the experimental procedures were carried out, are added. It should be noted that these methods are not mutually exclusive, but being in line with each other can lead to the development of the underground structures are designed and reliable results than when only a method is used, the provide. The use of multiple methods and new experimental results can be validated numerical methods that are usually not visible with their tolerance, will help.

Keywords: Geomechanics, rock mass, tunnel Pырshryf, system support, FEM