



بررسی جایگزینی سیستم نگهداری شاتکریت در گالری‌های معدن زغال‌سنگ هجدک

علی سعیدی

دانشگاه کرمان، عضو هیأت علمی گروه معدن، کرمان

مسعود رشیدی

دانشگاه تربیت مدرس، دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، تهران

علی فتحی

دانشگاه تربیت مدرس، دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، تهران

چکیده: به منظور افزایش بهره‌وری عملیات معدنی و گسترش معدنکاری در کشور، اصلاح و بهینه‌سازی سیستم نگهداری حفریات معدنی به عنوان یکی از پارامترهای مهم فنی و اقتصادی، ضروری به نظر می‌رسد. از آنجایی‌که بررسی و تحقیق در زمینه پایداری حفریات کوچک مقطع که تونل‌های معدنی بویژه معادن زغال‌سنگ از آن جمله‌اند، با استفاده از روش‌های نوین در کشور کمتر انجام شده است، لذا گالری‌های معدن زغال‌سنگ هجدک برای این منظور انتخاب و بررسی استفاده از سیستم نگهداری شاتکریت در آنها انجام شده است.

در این مقاله ابتدا تحلیل آماری نتایج برداشت‌های صحرایی ناپیوستگی‌ها که توسط نرم افزار DIPS انجام گرفته بیان شده است. سپس طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها (RMR و Q) و پارامترهای ژئومکانیکی معادل توده‌سنگ آورده شده است. در ادامه، طراحی سیستم نگهداری که توسط روش‌های تجربی و تحلیل عددی (نرم‌افزار FLAC) انجام شده، آمده و در نهایت تجزیه و تحلیل اقتصادی به منظور مقایسه طرح پیشنهادی و طرح اجرا شده گردیده است که نشان دهنده صرفه‌جویی هزینه‌ای بالغ بر ۱/۱۵ میلیارد ریال برای هر کیلومتر از تونل می‌باشد.

۱ مقدمه

استفاده از منابع زیرزمینی داخلی و توسعه معدن زغال‌سنگ به موازات استخراج نفت، برای کشور ایران به عنوان کشوری در حال رشد اولویت ویژه دارد. حوضه زغالی کرمان در ردیف بزرگترین حوضه‌های زغالی ایران است و معادن متعددی در قسمتهای مختلف آن احداث شده است. معدن زغال‌سنگ هجدک از جمله معادن بزرگ این حوضه است که قسمتی از زغال مورد نیاز کارخانه ذوب آهن اصفهان را تأمین می‌کند. این معدن دارای سه تونل است. در افق اول تونل شماره ۴، در افق دوم تونل شماره ۱ و در افق سوم تونل شماره ۲ قرار گرفته است. در این مقاله تونل شماره ۲ که در ماسه‌سنگ حفر شده مورد بررسی قرار گرفته است.

تأمین ایمنی این معدن از جمله عواملی است که باید توسط طراحان سازه‌های زیرزمینی مدنظر قرار گیرد. خوشبختانه پیشرفت‌های علمی که در ۲۵ سال گذشته در این زمینه صورت گرفته، بسیار با اهمیت بوده و در نتیجه در سایه همین پیشرفت‌ها امروزه مهندسی سنگ با انواع زیادی از سیستم‌های نگهداری در دامنه وسیع روبرو هستند به طوری که بنا به شرایط حاکم بر سنگ، می‌توانند انتخاب‌های گوناگونی از قاب فولادی، پوشش بتنی، شاتکریت و پیچ‌سنگ داشته باشند. هنوز هم قاب‌های فولادی و

پوشش بتنی نقش مهمی را در پایدارسازی فضاهای موجود در زمینهای بسیار سست ایفا می‌کنند. در زمینهایی که کیفیت بهتری دارند، استفاده توأم پیچ‌سنگ و شاتکریت بسیار متداول شده است.

از آنجا که تونل مذکور در سنگ نسبتاً مقاومی حفر شده است و نیز با توجه به هزینه‌های بالای قاب فولادی، به نظر می‌رسد که سیستم نگهداری شاتکریت می‌تواند جایگزین بسیار خوبی برای تأمین پایداری تونل باشد.

۲ طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ

به منظور تعیین خواص مهم ناپیوستگی‌ها و برداشت آنها از روش خط برداشت استفاده شده است. اطلاعات حاصل از برداشتهای انجام شده پس از دسته بندی، بصورت فایل‌های ورودی نرم افزار DIPS مورد پردازش قرار گرفته شده است. نتایج بیانگر وجود ۴ دسته درزه به همراه درزه‌های اتفاقی به عنوان سیستم‌های اصلی ناپیوستگی در توده سنگ مورد نظر می باشد. نتایج حاصل از برداشتهای همراه اطلاعات حاصل شده از آزمایشهای آزمایشگاهی در تحلیل نهایی توده سنگ و طبقه بندی آن به کار گرفته شده است. بدین منظور از دو طبقه‌بندی رایج و مهم، رده‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ، RMR_{89} ، و اندیس کیفی توده‌سنگ، Q، استفاده شده است.

در جدول ۱ پارامترهای مورد نیاز برای طبقه‌بندی RMR و همچنین مقدار و امتیاز مربوط به هر پارامتر آمده است. مقدار RMR نهایی توده سنگ از مجموع امتیازهای اختصاص یافته به هر پارامتر حاصل می‌شود که این مقدار در ناحیه مورد نظر ۴۲ بدست آمده است. بنابراین توده سنگ در کلاس III و رده سنگهای متوسط قرار می‌گیرد.

جدول ۱- مقادیر و امتیازهای مربوط به پارامترهای طبقه‌بندی RMR

پارامتر	مقاومت تک‌محوری (MPa)	RQD%	فاصله ناپیوستگی‌ها (m)	طول ناپیوستگی‌ها (m)	بازشدگی (mm)	زبری	پرشدگی	هوازدهی	زبری زمین‌آبر	نسبت به امتداد تونل	امتیاز ناپیوستگی‌ها
مقدار	۳۵	۵۷	۱-۰/۵	۲-۳	۳-۵	نرم	کلسیت	نسبتاً هوازده	چکیدن	مناسب	
امتیاز	۴	۱۳	۱۵	۴	۱	۱	۲	۳	۴	-۵	

در تعیین مقدار Q، شش پارامتر تأثیر می‌گذارند. با توجه به جدول ۲ می‌توان این مقدار را بصورت زیر محاسبه کرد:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} = 0.09 \quad (1)$$

جدول ۲- مقادیر مربوط به پارامترهای طبقه‌بندی Q

پارامتر	RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF
مقدار	۵۷	۱۵	۱	۴	۰/۶۶	۷

بنابراین مقدار شاخص Q برای این توده سنگ برابر ۰/۰۹ می‌باشد و در این طبقه‌بندی جزء سنگهای به شدت ضعیف قرار دارد.

۳ تعیین پارامترهای ژئومکانیکی منطقه

برای تعیین ثابتهای معیار شکست هوک و براون (m و s) و ثابتهای معیار شکست موهر-کلمب (c و ϕ) از شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI) استفاده شده است. این شاخص را می‌توان بر اساس رده بندی مهندسی سنگها یعنی RMR و Q بدست آورد.

اگر شاخص RMR توده سنگ بر اساس معیارهای سال ۱۹۸۹ میلادی تعیین شده باشد، برای تخمین GSI، امتیاز ۱۵ برای آب زیرزمینی در نظر گرفته شده و تعدیل مربوط به جهت ناپیوستگی‌ها صفر قرار داده می‌شود. بر این اساس مقدار RMR برای تخمین GSI برابر ۵۸ می‌شود و می‌توان شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI) را از رابطه ۲ بدست آورد (Hoek, Kaiser و Bawden, ۱۹۹۵):

$$RMR_{89} > 23 \Rightarrow GSI = RMR_{89} - 5 \quad (2)$$

اگر $RMR_{89} < 23$ باشد. شاخص GSI را نمی‌توان بر اساس RMR تعیین کرد. و در چنین مواردی باید شاخص Q را بکار برد. از آنجا که در تونل مورد نظر مقدار RMR بر اساس معیارهای سال ۱۹۸۹ تعیین شده است بنابراین برای تعیین GSI خواهیم داشت:

$$GSI = 58 - 5 = 53 \quad (3)$$

معیار شکست هوک و براون به صورت رابطه ۴ ارائه می‌شود (Carranza و Carkum, ۲۰۰۲) و (Hoek), برای محاسبه پارامترهای این معیار از روابط ۵ تا ۷ استفاده شده است ($m_i=10$ و $D=0$):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4)$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) = 1.866 \quad (5)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) = 0.0054 \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) = 0.505 \quad (7)$$

با داشتن σ'_1 و σ'_3 می‌توان σ'_n و τ را با استفاده از روابط ۸ و ۹ محاسبه کرد:

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \times \frac{d\sigma'_1 / d\sigma'_3 - 1}{d\sigma'_1 / d\sigma'_3 + 1} \quad (8)$$

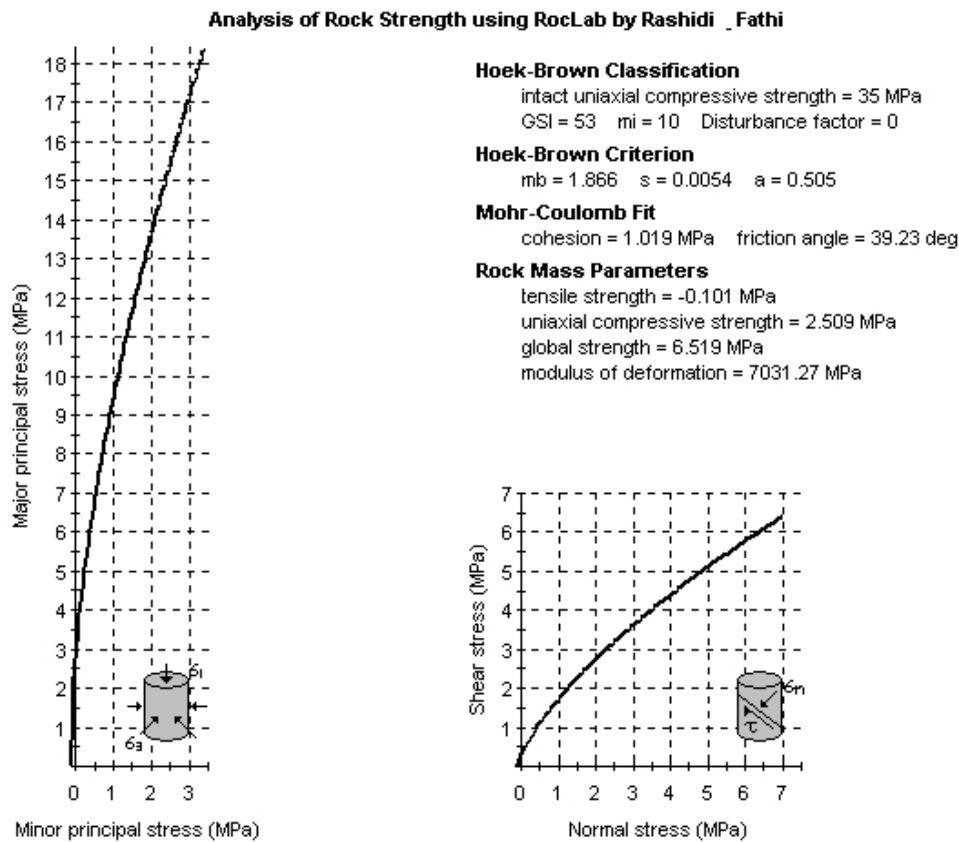
$$\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \times \frac{\sqrt{d\sigma'_1 / d\sigma'_3}}{d\sigma'_1 / d\sigma'_3 + 1} \quad (9)$$

که در آن $d\sigma'_1 / d\sigma'_3$ بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$d\sigma'_1 / d\sigma'_3 = 1 + am_b \left(m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s \right)^{a-1} \quad (10)$$

بنابراین یک زوج (σ_n و τ) حاصل می گردد. آنگاه از طریق محاسبات رگرسیون خطی، C و ϕ توده سنگ محاسبه می گردد.

به منظور محاسبه پارامترهایی که در این قسمت ذکر شد از نرم افزار Roclab استفاده شد. خروجی این برنامه در شکل ۱ به همراه منحنی σ_1 در مقابل σ_3 و نیز τ در مقابل σ_n آورده شده است.



شکل ۱- پارامترهای توده سنگ به همراه ثابت های هوک-براون و موهرکولمب حاصل از نرم افزار RocLab

۴ طراحی سیستم نگهداری بر اساس روشهای تجربی

با توجه به طبقه بندی مهندسی توده سنگ که در قسمت ۲ ارائه شد، سیستم نگهداری مورد نیاز تخمین زده شده است.

پیشنهادات سیستم طبقه بندی RMR بر مبنای کلاس توده سنگ، که برگرفته از مجموع امتیازات اختصاص یافته به پارامترهای این طبقه بندی می باشد، در جدول ۳ آمده است (Hoek, 2002).

جدول ۳- تخمین سیستم نگهداری مورد نیاز بر اساس طبقه‌بندی RMR

رده توده سنگ	پیچ‌سنگ به قطر ۲۰mm و کاملاً تزریق شده	شاتکریت	قاب فلزی
III - سنگ نسبتاً خوب RMR=۴۱-۶۰	پیچ‌سنگ‌هایی به طول ۴ متر و به فاصله ۲- ۱/۵ متر در تاج و دیواره‌ها، با سیم توری در تاج	به ضخامت ۱۰۰-۵۰mm در تاج و ۳۰mm در دیواره‌ها	احتیاجی نیست

برای تخمین سیستم نگهداری بر اساس طبقه‌بندی Q (جدول ۴) به پارامتر دیگری بنام بعد معادل نیاز است که مقدار آن را می‌توان با تقسیم دهانه یا قطر و یا ارتفاع دیواره فضای زیرزمینی، به کمیتی که «نسبت نگهداری فضای حفاری» یا ESR نامیده می‌شود به دست آورد. بنابراین:

$$D_e = \frac{4}{1.6} = 2.5 \quad (11)$$

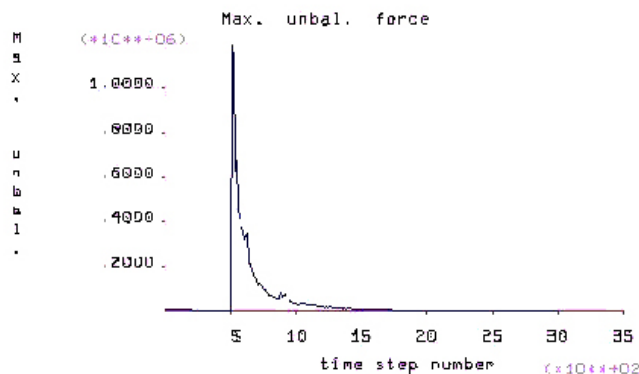
جدول ۴- تخمین سیستم نگهداری مورد نیاز بر اساس طبقه‌بندی Q

الگوی پیچ‌سنگ‌ها	تخمین سیستم نگهدارنده	حداکثر دهانه (بدون سیستم نگهداری)	Q	بعد معادل (D _e)	نسبت نگهداری فضای حفاری (ESR)	دهانه، قطر یا ارتفاع فضای حفاری (m)
۱/۳*۱/۳ طول ۱/۵	۹۰mm شاتکریت مسلح فیبری و نصب پیچ‌سنگ	۱/۲۲	۰/۰۹	۲/۵	۱/۶	۴

۵ تحلیل پایداری بر اساس روشهای عددی

در این بخش تونل مورد نظر بوسیله نرم افزار ۲،۲۷ FLAC مدل‌سازی شده است. پس از انتخاب محدوده مناسب اطراف تونل، انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن و اعمال شرایط مرزی و تنشهای اولیه، مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری حل شده، سپس جایجایی‌ها صفر شده و تونل با شکل مورد نظر ایجاد شده است. پس از ایجاد تونل، مدل تا رسیدن به تعادل نهایی حل شده است. پارامترهای کنترلی برای این منظور، حداکثر بار نامتعادل و سرعتها در نقاط گره‌ای می‌باشند که در هر مرحله‌ای با توجه به دستورات از قبل تعریف شده قابل رؤیت خواهند بود. در شکل ۲ مقدار حداکثر بار نامتعادل در نقاط گره‌ای آورده شده است.

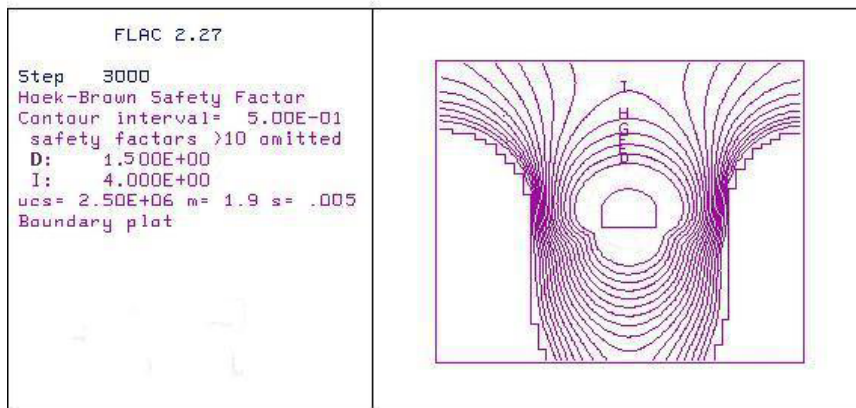
Job Title : design of shotcrete lining of horse shape
From File : 11.sav



شکل ۲- حداکثر بار نامتعادل در نقاط گره‌ای که نشان دهنده رسیدن تونل به تعادل نهایی است.

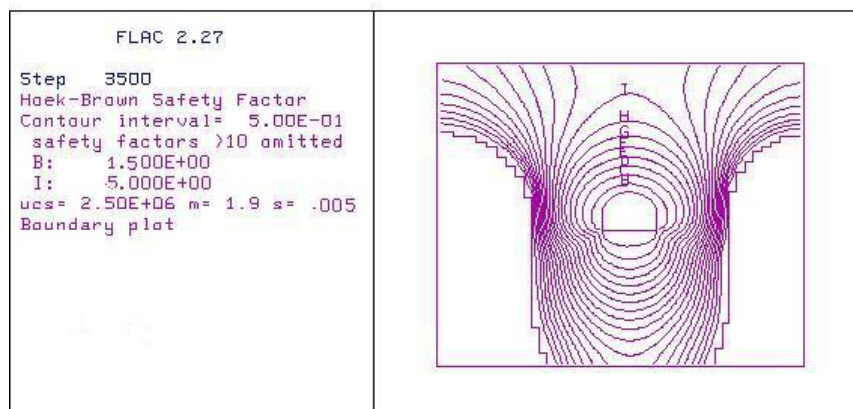
جهت ارزیابی وضعیت پایداری، خطوط تراز ضریب ایمنی در شکل ۳ آورده شده است. این شکل نشان می دهد که دیواره ها و سقف دارای ضریب ایمنی کمتر از ۱ می باشند. با انتخاب مقاومت فشاری تک محوری شاتکریت برابر ۲۵ MPa و استفاده از روابط مقاومت مصالح، ضریب ایمنی شاتکریت در فشار و کشش برای المانهای مختلف بررسی شد. برای شاتکریت سقف و دیوار، ضریب ایمنی در فشار به مراتب کمتر از ضریب ایمنی در کشش شد و حداقل مقدار آن در محل های اتصال سقف به دیوار به دست آمد. بنابراین ضخامت شاتکریت سقف و دیوار می بایست به اندازه ای باشد که تنش فشاری (ناشی از نیروی محوری و ممان خمشی) در بحرانی ترین گره از مقاومت فشاری شاتکریت کمتر شود. در حالت شاتکریت به ضخامت ۱۵ سانتیمتر ضریب ایمنی در سقف و دیوار به مقدار قابل قبول ۱/۵ رسید اما در محل های اتصال سقف به دیوار، ضریب ایمنی کمتر از ۱ شد. این امر به دلیل گوشه های تیز این محلها و ممان خمشی زیاد حاصل در آنها است. با افزایش ضخامت شاتکریت به ۲۰ سانتیمتر این مشکل حل شد، شکل ۴ خطوط تراز ضریب ایمنی را در حالت شاتکریت به ضخامت ۲۰ سانتیمتر نشان می دهد.

Job Title : design of shotcrete lining of horse shape
From File : 11.sav



شکل ۳- خطوط تراز ضریب ایمنی قبل از اعمال سیستم نگهدارنده

Job Title : design of shotcrete lining of horse shape
From File : 22.sav



شکل ۴- خطوط تراز ضریب ایمنی بعد از اعمال سیستم نگهدارنده

۶ مقایسه اقتصادی سیستم نگهداری فعلی و سیستم پیشنهادی
 بر اساس فهرست بهای ژئوتکنیک (۱۳۸۰)، بررسی اقتصادی بین استفاده از قاب فولادی و استفاده از شاتکریت صورت گرفت. نتایج این محاسبات در جداول ۵ و ۶ آمده است.

جدول ۵- هزینه سیستم نگهداری فعلی معدن هجدک

شرح	واحد	بهای واحد (ریال)	هزینه برای ۱ کیلومتر طول گالری (ریال)
قاب گذاری به فاصله ۸۰ سانتی متر (تهیه، حمل و نصب نگهدارنده های فلزی به همراه کلیه لوازم مصرفی اعم از مهاری ها و ...)	تن	۶۵۰۰۰۰۰	$۱/۸۳۷۵۵ \times ۱۰^۹$
لارده گذاری	متر مربع	۲۴۱۰۰	$۲/۴۷۷۴۸ \times ۱۰^۸$
مجموع			$۲/۰۸۵۲۹۸ \times ۱۰^۹$

جدول ۶- هزینه سیستم نگهداری پیشنهادی معدن هجدک

شرح	واحد	بهای واحد (ریال)	هزینه برای ۱ کیلومتر طول گالری (ریال)
شاتکریت به ضخامت ۲۰ سانتی متر (حفاظت سطوح حفاری شده با روش بتن پاشی به ضخامت ۵ سانتی متر)	متر مربع	۲۲۴۰۰	$۶۹۰/۸۱۶ \times ۱۰^۶$
مش بندی (حفاظت سطوح حفاری شده با شبکه آرماتور جوش خورده در فضای بسته)	تن	۵۵۰۰۰۰۰	$۲۴۰/۸۶۰۴ \times ۱۰^۶$
مجموع			$۹۷۷/۶۲۸ \times ۱۰^۶$

با توجه به این دو جدول، ملاحظه می شود که در صورت استفاده از سیستم نگهداری پیشنهادی، صرفه جویی هزینه برای هر کیلومتر از تونل حدود ۱/۱۵ میلیارد ریال خواهد بود.

۷ نتیجه گیری

قابلیت استفاده از سیستم شاتکریت بجای استفاده از قابهای فولادی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از روشهای تجربی و عددی استفاده شد. روشهای تجربی، استفاده از سیستم ترکیبی شاتکریت و پیچ سنگ را پیشنهاد می کنند. نتایج حاصل از نرم افزار FLAC بیانگر فشاری بودن تنشهای اطراف تونل می باشد. با مدلسازی ۱۵۰ میلی متر شاتکریت، ضریب ایمنی در سقف و دیواره به مقدار ۱/۵ می رسد اما در محل های اتصال سقف به دیوار به دلیل تیزی این محلها و ممان خمشی زیاد حاصل در آنها این مقدار کمتر از ۱ خواهد شد. با افزایش ضخامت شاتکریت به ۲۰۰ میلی متر تأثیر این مسأله از بین رفته و پایداری تونل مذکور تأمین می شود. بنابراین سیستم نگهدارنده مناسب برای این تونل می تواند ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی متر شاتکریت و استفاده از پیچ سنگ در قسمتهایی که احتمال تشکیل گوه وجود دارد باشد. محاسبات نیز غیر اقتصادی بودن سیستم فعلی معدن که از قابهای فولادی تشکیل شده است را

تأیید کرده و نشان می‌دهد که در صورت استفاده از سیستم نگهداری پیشنهاد شده، برای هر کیلومتر از تونل حدود ۱/۱۵ میلیارد ریال صرفه‌جویی را در پی خواهد داشت.

۸ تشکر و قدردانی

در پایان از آقایان مهندس مسعود ربیعی وزیری، مهندس مهدی محمدی و مهندس سالار بختیاری بخاطر همکاری صمیمانه ایشان کمال تشکر را داریم.

۹ مراجع

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، (۱۳۸۰). “فهرست بهای ژئوتکنیک”

Hoek, E., (۲۰۰۲). “Practical Rock Engineering”, an ongoing set of notes, (chap:۳) . Available at the Rocscience Web Site :www.rocscience.com

Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., and Corkum, B. (۲۰۰۲), “Hoek-Brown failure criterion – ۲۰۰۲ edition”. *Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto in July ۲۰۰۲*.

Hoek, E., Kaiser P.K. and Bawden W.F., (۱۹۹۵). “*Support of underground excavations in hard rock*”. Rotterdam, Balkema.

Hudson, John, A., (۱۹۹۳). “Comprehensive Rock Engineering” (vol:۴), Pergaman Press.

Itasca Consulting Group Inc., (۱۹۹۱).”User’s Manual of FLAC, Ver.۳.۰”.

Rocscience Inc., (۲۰۰۲). “User Manual of RocLab, Ver.۱.۰.۰۱”.