

# طراحی نگهداری اولیه تونل انتقال آب گلاب با تأکید بر فطرات زمین‌شناسی

محمدمجواد رحیم‌دل\* و رامب باقرپور<sup>۲</sup>

(۱) کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، mj.rahimdel@yahoo.com

(۲) استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، bagherpour@cc.iut.ac.ir

(\*) عهده‌دار مکاتبات

دریافت: ۹۱/۷/۱؛ دریافت اصلاح شده: ۹۱/۱۱/۱۸؛ پذیرش: ۹۱/۱۲/۱؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۲/۴/۳۰

## مکیده

آگاهی از خطرات زمین‌شناسی، نقش مهمی در انتخاب سامانه نگهداری مناسب برای سازه‌های زیرزمینی دارد. تونل انتقال آب گلاب با طول حدود ۱۱ کیلومتر و قطر حفاری ۴/۲ متر، بخشی از طرح آبرسانی از سد زاینده‌رود به شهرهای کاشان و اصفهان است. با توجه به عبور تونل از نواحی مرتفع و کوهستانی و وجود توده‌سنگ‌های آهکی و نسبتاً ناپایدار و سست در مسیر، بررسی خطرات زمین‌شناسی از جمله مجاله‌شوندگی و انفجارسنگ به منظور انتخاب سامانه نگهداری مناسب، ضروری می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از برداشت‌های زمین‌شناسی و مطالعه گمانه‌های حفاری شده، مسیر تونل تقسیم‌بندی شد. و سپس شدت مجاله‌شوندگی و انفجارسنگ در هر بخش بررسی گردید. در نهایت، با توجه به شدت انفجارسنگ و مجاله‌شوندگی، مسیر تونل تقسیم‌بندی شده و به کمک روش عددی تفاضل محدود (نرم‌افزار FLAC)، نگهداری اولیه تونل در هر بخش بررسی گردید. با توجه به بررسی‌های انجام شده، توده‌سنگ‌های مسیر تونل به سه بخش، A (کیلومتر ۱۰۵ تا ۴۹۷۰) با مجاله‌شوندگی متوسط، B (کیلومتر ۴۹۷۰ تا ۶۴۴۰) با پتانسیل مجاله‌شوندگی شدید تا انفجارسنگ ضعیف و C (کیلومتر ۶۴۴۰ تا ۱۰۱۶۰) با پتانسیل مجاله‌شوندگی ضعیف تا متوسط تفکیک شدند. نگهداری اولیه تونل با بهره‌گیری از نرم‌افزار عددی FLAC2D، به اندازه ۵ سانتی‌متر شانکریت برای بخش‌های A و C و ۷ سانتی‌متر شانکریت برای بخش B تعیین گردید.

**واژه‌های کلیدی:** مجاله‌شوندگی، انفجارسنگ، نگهداری اولیه، نرم‌افزار FLAC، تونل انتقال آب گلاب.

## ۱- مقدمه

بخشی از طرح آبرسانی به شهرهای کاشان و اصفهان است که از سد زاینده رود آغاز و تا دشت کارون امتداد دارد. با توجه به عبور تونل از نواحی مرتفع و کوهستانی و همچنین وجود توده سنگ‌های آهکی و

تونل انتقال آب گلاب با طول حدود ۱۱ کیلومتر و قطر حفاری ۴/۲ متر در استان اصفهان و در نزدیکی شهر تیران واقع شده است. این تونل

### ۳- تعریف مچاله‌شوندگی

از نظر ترزاقی (Terzaghi 1946) سنگ‌های مچاله‌شونده به آهستگی به درون تونل حرکت می‌کنند، بدون آنکه حجم آن‌ها به طور محسوس افزایش پیدا کند. بر اساس نظر آیدان و همکاران (Aydan et al. 1993)، مچاله‌شوندگی به صورت کاهش در مقطع عرضی تونل به دلیل تغییر شکل‌های بزرگ مقیاس تعریف شده است. بارلا و دالگیک (Barla 2002, Dalgic 2002) معتقدند که مچاله‌شوندگی سنگ توسط جریان پلاستیک (خزش) توده‌سنگ‌هایی که در معرض تنش هستند اتفاق افتاده و در صورت تجاوز از حد تنش برشی، باعث شکست آن خواهد شد. شرستا و بروچ در سال ۲۰۰۸ و هادسون در سال ۲۰۱۰، (Shrestha & Broch 2008, Hudson 2010) بیان کردند که مشکلات مچاله‌شوندگی در تونل‌های عمیقی که در توده‌سنگ‌های ضعیف حفاری می‌شوند، عادی است. همچنین همگرایی‌های قابل توجهی در تونل‌های کم عمقی که در توده‌سنگ‌های ضعیف و یا در توده‌سنگ‌هایی که در شرایط بیش‌تنشی (اثرات تکنیکی یا توپوگرافی) هستند، اتفاق می‌افتد.

### ۳-۱- روش‌های ارزیابی مچاله‌شوندگی

برای ارزیابی شرایط مچاله‌شوندگی، روش‌های تجربی، نیمه تجربی و تحلیلی توسط محققین مختلفی ارائه گردیده است. در ادامه به معرفی این روش‌ها پرداخته می‌شود.

#### ۳-۱-۱- روش‌های تجربی

##### ۳-۱-۱-۱- روش سین و همکاران

سین و همکاران (Singh et al. 2007)، با توجه به روباره (H) و شاخص کیفیت تونل زنی (Q) مچاله‌شوندگی را به صورت جدول ۳ ارائه نمودند.

##### ۳-۱-۱-۲- روش گوئل و همکاران

گوئل و همکاران (Goel et al. 1997)، مچاله‌شوندگی را به صورت رابطه ۱ بیان نمودند.

$$\text{رابطه (۱)} \quad N=Q.SRF$$

در این رابطه  $Q$  شاخص کیفیت سنگ و  $SRF$  ضریب کاهش تنش توده‌سنگ می‌باشند.

بر اساس تصویر ۱ و در نظر گرفتن ضخامت روباره (H) و عرض تونل (B)، پتانسیل مچاله‌شوندگی تعیین می‌گردد.

نسبتاً ناپایدار در مسیر تونل، لازم است مخاطرات زمین‌شناسی از جمله مچاله‌شوندگی و انفجارسنگ در این مناطق مورد بررسی قرار گیرد. از جمله مشکلات تونل‌سازی در سنگ‌های ضعیف و در شرایط روباره زیاد، همگرایی وابسته به زمان و یا مچاله‌شوندگی در ضمن حفاری تونل است. با توجه به وجود توده‌سنگ‌های آهکی و نسبتاً ناپایدار و سست در مسیر تونل، بررسی شدت مچاله‌شوندگی در این مناطق ضروری است. انفجارسنگ به صورت پرتاب شدید سنگ یا مواد معدنی از دیواره‌ها و ستون‌ها در حفاری‌های زیرزمینی عمیق و پرتنش اتفاق می‌افتد. با توجه به این که ضخامت روباره تونل گلاب در بعضی نقاط به بیش از ۵۰۰ متر می‌رسد، بنابراین احتمال وقوع انفجارسنگ در این نقاط وجود خواهد داشت. در این مقاله، ابتدا با استفاده از برداشت‌های زمین‌شناسی و مطالعه گمانه‌های حفاری شده، مسیر تونل تقسیم‌بندی شد. پس از بررسی تحلیلی و تجربی مچاله‌شوندگی و انفجارسنگ برای هر یک از بخش‌ها، نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت، نگهداری اولیه تونل با تاکید بر تقسیم‌بندی آن بر مبنای شدت انفجارسنگ و مچاله‌شوندگی بررسی گردید.

### ۲- زمین‌شناسی مسیر تونل

محدوده مورد مطالعه، بخشی از ایران مرکزی است که به صورت نوار دگرگون شده‌ای در امتداد و به موازات روراندگی زاگرس قرار دارد. توده‌سنگ‌های مسیر تونل شامل میکاشیست، ماسه‌سنگ، سیلتستون، فیلیت، اسلیت، شیل، سنگ‌آهک و کنگلومرا می‌باشند. مجموعه گسل دالان، از اصلی‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی منطقه است. این گسل، دارای چندین گسل طویل با راستای NW-SE و شیب زیاد به سمت جنوب غرب می‌باشد که با عملکرد امتداد لغز و با مؤلفه معکوس، واحدهای ژوراسیک را بر روی واحدهای کرتاسه و واحدهای کرتاسه را بر روی واحدهای ائوسن رانده است. تعداد ۴۵ گسل در مسیر تونل تشخیص داده شده که از این تعداد، ۱۲ عدد به صورت شاخه از گسل اصلی، ۳۰ عدد گسل اصلی و ۳ عدد گسل احتمالی است.

در بررسی توده‌سنگ‌های مسیر تونل، تعداد ۹ گمانه روی محور تونل حفر گردیده است. خصوصیات ژئوتکنیکی توده‌سنگ‌های مسیر تونل در جدول ۱ و شاخص کیفیت تونل زنی همراه با درجه پایداری توده‌سنگ‌های مسیر تونل در جدول ۲ آورده شده است (قیاسوند ۱۳۸۵). در طبقه‌بندی کیو (Q)، سنگ‌ها از نظر کیفیت به انواع خوب یا بد تقسیم نمی‌شوند، بلکه عددی که ممکن است از ۱۰۰۰ تا ۰/۰۰۱ تغییر کند معرف مشخصات سنگ است. به طور کلی اعداد بزرگتر سنگ با کیفیت بهتر را معرفی می‌کنند (فرهودی و همکاران ۱۳۸۶).

جدول ۱- خصوصیات ژئوتکنیکی توده‌سنگ‌های مسیر تونل

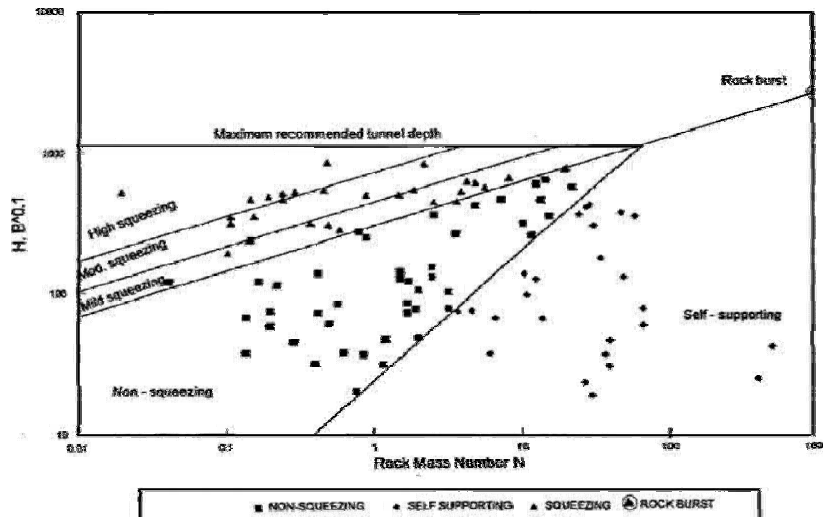
مقطع	کیلومتر تونل (m)	سنگ‌شناسی	روپاره (m)	مقاومت فشاری تک‌محوری (Mpa)	مدول تغییر شکل پذیری (GPa)
I	۰-۱۰۵	میکاشیست با میان‌لایه ماسه‌سنگ	۱۵	۳/۸	۲/۵
II	۱۰۵-۲۰۵	میکاشیست، اسلیت و ماسه‌سنگ دگرگون شده	۲۰۰	۳/۸	۲/۵۸
III	۲۰۵-۲۵۲	میکاشیست با میان‌لایه ماسه‌سنگ	۱۲۰	۲/۷	۲/۲۱
IV	۲۵۲-۳۰۰	اسلیت و ماسه‌سنگ دگرگون شده	۱۳۰	۳	۳/۲۱
V	۳۰۰-۳۶۶	میکاشیست با میان‌لایه‌ای از اسلیت، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک دگرگون شده	۲۲۰	۳/۸	۲/۵۸
VI	۳۶۶-۴۹۷	میکاشیست و فیلیت	۳۳۰	۲/۷	۱/۷۵
VII	۴۹۷-۶۲۵	فیلیت و اسلیت	۴۰۰	۲/۷	۱/۷۵
VIII	۶۲۵-۶۴۴	مونزونیت-دیوریت	۴۰۰	۳۲	۱۱/۵۴
IX	۶۴۴-۸۵۸	شیل ژوراسیک	۴۳۰	۲/۷	۱/۷۵
X	۸۵۸-۸۸۹	مونزونیت-دیوریت	۴۵۰	۳۲	۱۱/۵۴
XI	۸۸۹-۹۲۱	سنگ‌آهک کرتاسه	۵۳۰	۱۰	۵
XII	۹۲۱-۹۷۷	کنگومرا	۵۳۰	۲۲	۸/۹۹
XIII	۹۷۷-۱۰۱۶	کنگومرا	۳۴۰	۸	۴/۵۸
XIV	۱۰۱۶-۱۱۰۸	شیل و مارن	۲۵۰	۳/۵	۲/۴۳

جدول ۲- شاخص کیفیت تونل‌زنی برای توده‌سنگ‌های مسیر تونل

مقطع	شاخص کیفیت تونل‌زنی (Q)	طبقه پایداری
I	۰/۴۱	خیلی ضعیف
II	۰/۴۵	خیلی ضعیف
III	۰/۴	خیلی ضعیف
IV	۱/۱	ضعیف
V	۰/۴۵	خیلی ضعیف
VI	۰/۲	خیلی ضعیف
VII	۰/۲	خیلی ضعیف
VIII	۴/۸	نسبتاً خوب
IX	۰/۲	خیلی ضعیف
X	۴/۸	نسبتاً خوب
XI	۱/۲۵	ضعیف
XII	۳/۳	ضعیف
XIII	۱/۲	ضعیف
XIV	۰/۴۱	خیلی ضعیف

جدول ۳- پتانسیل مجاله‌شوندگی بر مبنای معیار سین (Singh et al. 2007)

$<350Q^{1/3}$	$>350Q^{1/3}$	H
بودن	شرایط	مجاله‌شوندگی
مجاله‌شوندگی	مجاله‌شوندگی	



تصویر ۱- معیار گوئل و همکاران (Goel et al. 1997)

$$\eta_f = 5\sigma_{ci}^{-0.32}, \eta_s = 3\sigma_{ci}^{-0.25}, \eta_p = 2\sigma_{ci}^{-0.17}, \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\varepsilon_{\theta}^e = \frac{\sigma_{cm}}{E_m}, \varepsilon_{\theta}^a = \frac{\sigma_{\theta}}{E_m}$$

در این رابطه، مقادیر  $\varepsilon_{\theta}^a$  و  $\varepsilon_{\theta}^e$  به ترتیب حد کرنش الاستیک برای توده سنگ و کرنش مماسی اطراف تونل در میدان تنش هیدرواستاتیک هستند.

### ۳-۱-۲-۳- روش هوک و مارینوس

در این روش، از نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ به تنش برجا ( $\sigma_{cm}/P_0$ ) و میزان کرنش شعاعی جداره تونل ( $\varepsilon_t$ ) طبق رابطه ۴ استفاده می‌شود. شدت مچاله‌شوندگی نیز با استفاده از جدول ۶ مورد بررسی قرار می‌گیرد (Hoek & Marinos 2000).

$$\varepsilon_t = \frac{0.15}{P_0} \left(1 - \frac{P_1}{P_0}\right) \sigma_{cm}^{-\frac{-3P_1/P_0 + 1}{3.8P_1/P_0 + 0.54}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه،  $P_1$ : فشار وارد بر سیستم نگهداری (MPa)،  $P_0$ : تنش برجا (Mpa)،  $\sigma_{cm}$ : تنش برجا (MPa) است.

### ۳-۱-۲- روش‌های نیمه‌تجربی

#### ۳-۱-۲-۱- روش جتوا و همکاران

جتوا و همکاران (Jethwa et al. 1984)، با استفاده از مقاومت توده-سنگ، مچاله‌شوندگی را به صورت رابطه ۲ و جدول ۴ ارائه کرده‌اند.

$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{P_0} = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه،  $\sigma_{cm}$ : مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ،  $P_0$ : تنش برجا،  $\gamma$ : وزن مخصوص توده‌سنگ و  $H$ : میزان روباره تونل است.

#### ۳-۱-۲-۲- روش آیدان

در این روش، با توجه به مقاومت فشاری سنگ بکر ( $\sigma_{ci}$ )، حداکثر تنش مماسی دیواره تونل ( $\sigma_{\theta}$ )، مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ ( $\sigma_{cm}$ ) و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ ( $E_m$ ) با استفاده از رابطه ۳ و جدول ۵، پتانسیل مچاله‌شوندگی ارزیابی می‌شود (Singh et al. 2007).

جدول ۴- پتانسیل مچاله‌شوندگی بر مبنای روش جتوا (Jethwa et al. 1984)

$N_c$	$> 2$	$0.8 - 2$	$0.4 - 0.8$	$0.4$	$< 0.4$
پتانسیل مچاله‌شوندگی	بدون مچاله‌شوندگی	خفیف	متوسط	شدید	

جدول ۵- پتانسیل مچاله‌شوندگی بر مبنای روش آیدان (Aydan et al. 1993)

$\varepsilon_{\theta}^a / \varepsilon_{\theta}^e > \eta_f$	$\eta_s < \varepsilon_{\theta}^a / \varepsilon_{\theta}^e < \eta_f$	$\eta_p < \varepsilon_{\theta}^a / \varepsilon_{\theta}^e < \eta_s$	$1 < \varepsilon_{\theta}^a / \varepsilon_{\theta}^e < \eta_p$	$\varepsilon_{\theta}^a / \varepsilon_{\theta}^e < 1$	$\varepsilon_{\theta}^a / \varepsilon_{\theta}^e$
شدت مچاله‌شوندگی	بدون مچاله‌شوندگی	ضعیف	متوسط	زیاد	خیلی زیاد

جدول ۶- پیش‌بینی مجاله‌شوندگی با استفاده از روش هوک و مارینوس (Hoek & Marinos 2000)

>۱۰	۱۰-۵	۵-۲/۵	۲/۵-۱	<۱	$\epsilon_t$
شدید	خیلی زیاد	زیاد	کم	بدون مجاله‌شوندگی	شدت مجاله‌شوندگی

درصدی از محدوده‌های مطالعه شده که در هر رده از مجاله‌شوندگی قرار دارند، محاسبه شده و در جدول ۸ ارائه شده است. با توجه به جدول ۸، معیارهای گوئل و هوک به ترتیب ۸۵ و ۱۰۰ درصد از محدوده‌های تونل را در رده بدون مجاله‌شوندگی قرار داده است. معیارهای سین، جتوا، بارلا و آی‌اس‌آرام (International Society for Rock Mechanics, ISRM)، مجاله‌شوندگی ضعیف تا متوسط را به بیشتر بخش‌های تونل اختصاص داده است. با این وجود، تنها معیار آیدان بیشترین درصد از بخش‌های تونل را در رده مجاله‌شوندگی شدید قرار داده است.

### ۳-۱-۳- روش‌های تملیلی-تئوریتی

#### ۳-۱-۳-۱- روش بارلا (Barla) و انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ

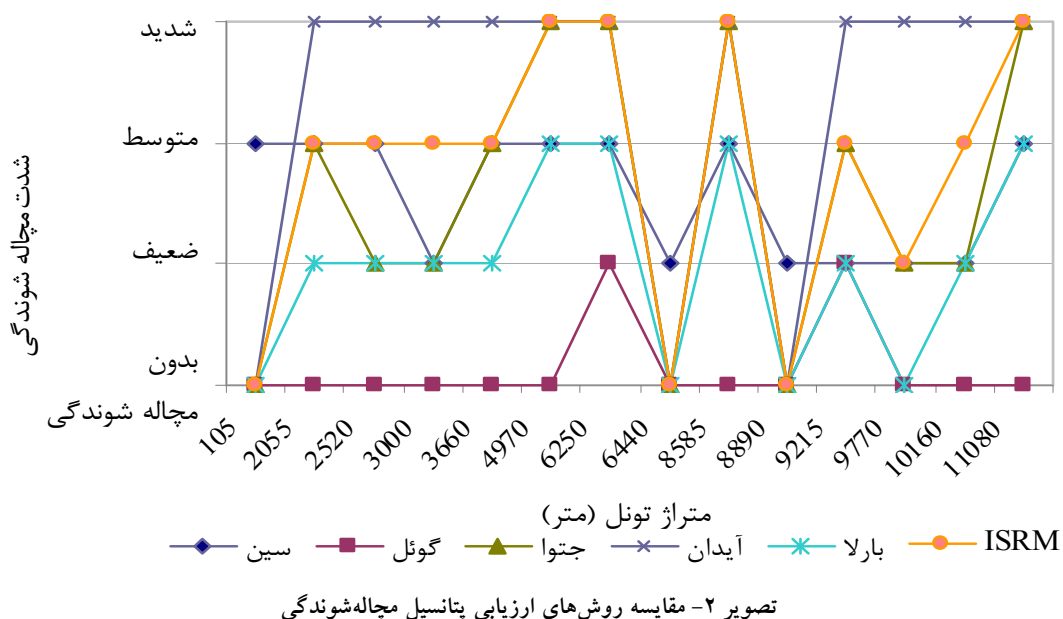
پتانسیل مجاله‌شوندگی در این دو روش با توجه به مقادیر تنش مماسی ( $\sigma_\theta$ )، مقاومت فشاری تک محوری سنگ ( $\sigma_{cm}$ ) و تنش اصلی حداکثر ( $\sigma_1$ )، به صورت جدول ۷ پیش‌بینی می‌شود (Barla 2002).

#### ۳-۲- بررسی شدت مجاله‌شوندگی در تونل انتقال آب گلاب

نتایج حاصل از بررسی مجاله‌شوندگی برای بخش‌هایی از تونل که وقوع این پدیده در آن‌ها محتمل است، با استفاده از معیارهای مختلف بررسی و نتایج در تصویر ۲ آورده شده است. برای ارزیابی نتایج،

جدول ۷- پتانسیل مجاله‌شوندگی بر مبنای روش بارلا و ISRM

شدت مجاله‌شوندگی	روش ارزیابی	
	Barla ( $\sigma_{cm}/\sigma_1$ )	ISRM ( $\sigma_\theta/\sigma_{cm}$ )
بدون مجاله‌شوندگی	>۱	<۱
ضعیف	۰/۴-۱	۲-۱
متوسط	۰/۲-۰/۴	۴-۲
شدید	۰/۲>	>۴



جدول ۸- مقایسه روش‌های ارزیابی پتانسیل مجاله‌شوندگی

روش ارزیابی	درصدی از تونل که در هر رده از مجاله‌شوندگی قرار می‌گیرد		
	بدون لهیدگی	ضعیف	متوسط
سین	۰	۴۳	۵۷
گوئل	۸۵	۱۵	۰
جتوا	۲۱	۲۸	۳۰
آیدان	۲۱	۰	۸۸
هوک و مارینوس	۱۰۰	۰	۰
بارلا	۲۸	۴۳	۲۹
ISRM	۲۱	۷	۴۳

#### ۴- معرفی پدیده انفجارسنگ

زیرزمینی می‌شود. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در طبقه‌بندی و تخمین شدت وقوع انفجارسنگ انجام شده است. منابع علمی معتبر و در دسترس و مطالعات انجام شده در تحلیل، طبقه‌بندی، پیش‌بینی و کاهش مخاطرات انفجارسنگ به طور خلاصه در جدول ۹ آورده شده است. بر این اساس، بیشتر مطالعات انجام شده در راستای طبقه‌بندی و پیش‌بینی این پدیده بوده است.

پدیده انفجار سنگ در حین استخراج مواد معدنی به روش زیرزمینی، حفر تونل در مناطق عمیق و عموماً در سنگ‌های مقاوم و در نقاط پرتنش رخ می‌دهد. این پدیده با آزاد شدن ناگهانی انرژی کرنشی ذخیره شده در سنگ در یک زمان کوتاه همراه است و علاوه بر آسیب‌رسانی به افراد و تجهیزات، باعث ریزش و ناپایداری فضای

جدول ۹- تحقیقات انجام شده در زمینه تحلیل، طبقه‌بندی و پیش‌بینی انفجارسنگ

محقق (محققان)	سال	زمینه تحقیقات
Cook et al.	1996	ارائه اولین مدل تحلیلی در پیش‌بینی انفجارسنگ
Shivakumar et al.	1996	تحلیل مولفه‌های مؤثر در وقوع انفجارسنگ در معدن طلای Kolar
Linkov	1996	مطالعه انفجارسنگ در توده‌سنگ‌های ناپایدار
Sharan	2004	استفاده از روش اجزای محدود در پیش‌بینی انفجارسنگ
Zhao	2005	طبقه‌بندی انفجارسنگ بر اساس روش SVM
Gong & Li	2007	استفاده از روش تحلیل مجزا در پیش‌بینی انفجار سنگ
Jiang et al.	2010	ارائه روش نرخ رهایش موضعی انرژی در شبیه‌سازی احتمال وقوع انفجارسنگ
Zhu et al.	2010	ارائه یک مدل عددی به منظور شبیه‌سازی انفجارسنگ ناشی از بارگذاری‌های دینامیکی
Wang et al.	2010	ارائه روش ضریب تأثیر در پیش‌بینی پتانسیل انفجارسنگ
Yang et al.	2010	طبقه‌بندی انفجارسنگ بر اساس نظریه فازی
Zhou et al.	2010	طبقه‌بندی انفجارسنگ بر اساس روش تجزیه و تحلیل فیشر (FDA)
Hu et al.	2011	مقطع نگاری سرعت در ارزیابی پتانسیل وقوع انفجارسنگ در معدنکاری‌های عمیق
Xuehua et al.	2012	تحلیل خطر انفجارسنگ در حفاری تمام مقطع لایه‌های زغالی عمیق
Jun et al.	2012	تأثیر شکستگی‌های هیدرولیکی در کاهش خطرات ناشی از انفجارسنگ در معادن عمیق زغالسنگ
Baisheng & Xiangchun	2012	تحلیل سازوکار انفجار زغال ناشی از آتشباری در معادن عمیق زغالسنگ

#### ۴-۱- معیارهای ارزیابی انفجارسنگ

##### ۴-۱-۱- معیار انرژی الاستیک قطعی

در این رابطه، PES: انرژی کرنشی ( $\text{kJ/m}^3$ )،  $\sigma_c$ : مقاومت فشاری تک محوری (MPa) و E: مدول الاستیسیته (GPa) است.

طبق نتایج تحقیقات کوازنیوزسکی و همکاران (Kwasniewski et al., 1994)، وقوع پدیده انفجارسنگ را می‌توان با توجه به میزان انرژی کرنشی در واحد سنگ طبق رابطه ۵ و جدول ۱۰ بیان کرد.

$$\text{PES} = \frac{\delta^2}{2E} \quad (5) \quad \text{رابطه ۵}$$

**۲-۱-۴- معیار تنش مماسی**

$$B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (7)$$

در این رابطه،  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک محوری (Mpa) و  $\sigma_t$  مقاومت کششی سنگ (Mpa) است.

این معیار از نسبت تنش مماسی به مقاومت فشاری تک محوری طبق رابطه ۶ محاسبه می‌شود. شدت انفجارسنگ نیز بر اساس جدول ۲، پیش‌بینی می‌شود (Wang & Park 2001).

$$T_s = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_c} \quad (6)$$

**۲-۱-۴- معیار تنش‌ها**  
این معیار از نسبت مقاومت فشاری تک محوری به تنش اصلی حداکثر طبق رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_1} \quad (8)$$

در این رابطه،  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک محوری (Mpa) و  $\sigma_1$  تنش اصلی حداکثر (Mpa) است.

تردی سنگ طبق رابطه ۷، از نسبت مقاومت فشاری سنگ به مقاومت کششی آن محاسبه می‌گردد و در تخمین شدت انفجارسنگ (جدول ۱۲) قابل استفاده می‌باشد (Hsiung 2001).

**۲-۱-۳- معیار تردی**

شدت انفجارسنگ نیز مطابق جدول ۱۳، قابل پیش‌بینی است.

جدول ۱۰- پتانسیل انفجارسنگ بر مبنای معیار انرژی الاستیک خطی

PES (Kj/m <sup>3</sup> )	<50	100-50	150-100	200-150	>200
شدت انفجارسنگ	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد

جدول ۱۱- پتانسیل انفجارسنگ بر مبنای معیار تنش مماسی

T <sub>s</sub>	<0/3	0/5-0/3	0/7-0/5	0/9-0/7	>0/9
شدت انفجارسنگ	بدون انفجار	ضعیف	متوسط	شدید	بسیار شدید

جدول ۱۲- پتانسیل انفجارسنگ بر مبنای معیار تردی

B	>40	40-26/7	14/5-26/7	<14/5
شدت انفجارسنگ	بدون انفجار	ضعیف	متوسط	شدید

جدول ۱۳- پتانسیل انفجارسنگ بر مبنای معیار تنش‌ها

	>10	10-5	2/5-5	<2/5
شدت انفجارسنگ	بدون انفجار	ضعیف	متوسط	شدید

جدول ۱۴ آورده شده است. بر اساس جدول ۱۴، معیار انرژی الاستیک خطی بیشتر بخش‌های تونل را در محدوده بدون انفجار قرار داده است. علاوه بر این، معیار تنش‌ها، تمام بخش‌های تونل را در محدوده بدون انفجارسنگ قرار داده است. این در حالی است که، معیار تنش‌ها و معیار تنش مماسی در حدود ۸۰ درصد از محدوده تونل را به ترتیب در محدوده انفجار متوسط تا شدید قرار داده است.

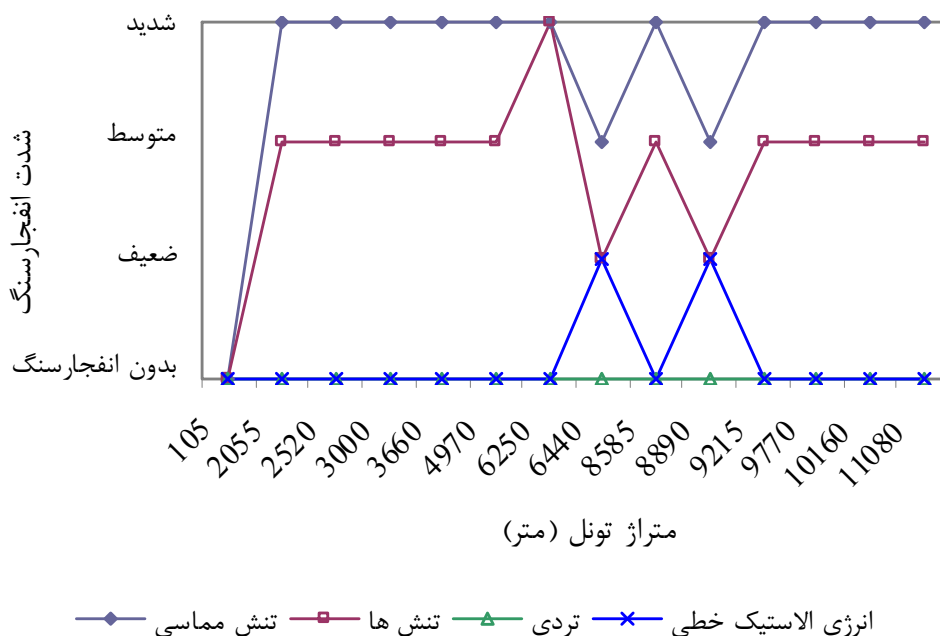
**۲-۴- بررسی پتانسیل انفجارسنگ در تونل انتقال آب گلاب**

نتایج حاصل از بررسی پتانسیل انفجارسنگ (بر اساس معیارهای مختلف) برای محدوده‌هایی از تونل که وقوع این پدیده در آنها محتمل است، در تصویر ۳ ارائه شده است. برای ارزیابی نتایج معیارهای مختلف، درصدی از محدوده‌های مطالعه شده که در هر رده از انفجارسنگ قرار دارند، محاسبه شده و در

### ۵- بررسی پتانسیل فطرات احتمالی

نتایج بررسی شدت مچاله‌شوندگی و انفجارسنگ، در تصویر ۴ آورده شده است. محدوده مورد مطالعه نیز طبق جدول ۱۵، به سه بخش تقسیم گردید. بر این اساس، برای محدوده A با توده‌سنگ‌های ضعیف تا بسیار ضعیف و متوسط روباره ۲۲۰ متر، پتانسیل مچاله‌شوندگی متوسط پیش‌بینی شده است. مقاوم‌ترین توده‌سنگ‌های مسیر تونل، در محدوده B قرار داشته و با توجه به نتایج، شدت انفجارسنگ و مچاله‌شوندگی در این محدوده، در رده انفجارسنگ ضعیف و یا بدون مچاله‌شوندگی تا مچاله‌شوندگی ضعیف پیش‌بینی شده است. این نتایج، با روباره نسبتاً زیاد و توده‌سنگ‌های مقاوم در این محدوده مطابقت داشته و توجه بیشتر به خطر انفجارسنگ را یادآور می‌سازد. در محدوده C نیز، با وجود روباره زیاد و کیفیت ضعیف تا نسبتاً

ضعیف توده‌سنگ، پتانسیل ضعیف تا متوسط مچاله‌شوندگی محتمل است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، به طور متوسط ۱۹، ۲۱ و ۲۱ درصد از کل بخش‌ها به ترتیب در رده بدون مچاله‌شوندگی، مچاله‌شوندگی ضعیف، متوسط و شدید قرار دارند. بنابراین پتانسیل بدون مچاله‌شوندگی تا مچاله‌شوندگی ضعیف برای این تونل پیش‌بینی شده است. در بررسی پتانسیل انفجارسنگ، با صرف نظر از معیار تردی که به طور خوش‌بینانه برای تمامی بخش‌ها پتانسیل بدون انفجارسنگ را پیش‌بینی کرده است، با مقایسه معیارهای تنش مماسی و معیار تنش-ها، به طور متوسط ۵۰، ۷، ۲۳ و ۲۰ درصد از کل بخش‌ها به ترتیب در رده‌های بدون انفجارسنگ، انفجارسنگ ضعیف، متوسط و شدید قرار گرفته است. بنابراین، شدت انفجارسنگ در رده بدون انفجار تا انفجار ضعیف پیش‌بینی شده است.

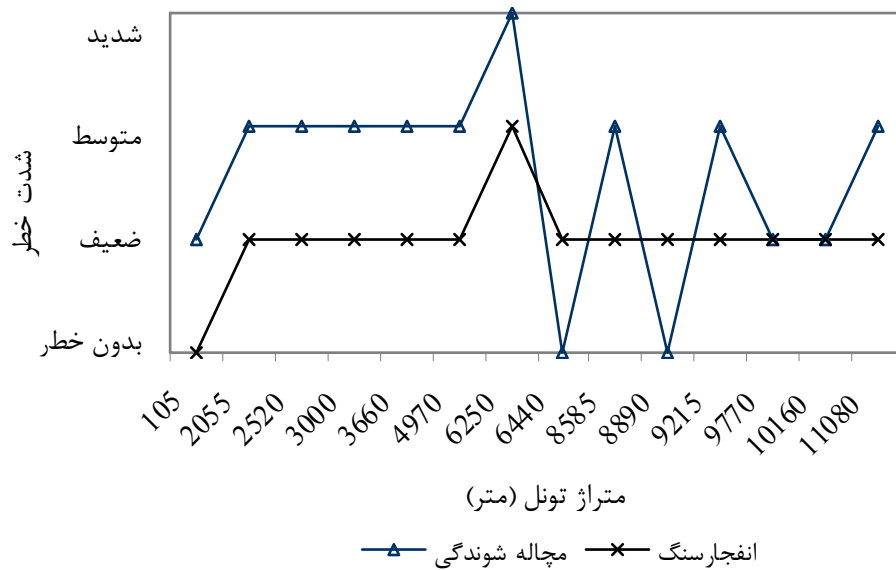


تصویر ۳- مقایسه روش‌های ارزیابی پتانسیل انفجارسنگ

جدول ۱۴- مقایسه روش‌های ارزیابی پتانسیل انفجارسنگ

معیار	درصدی از تونل که در هر رده از انفجارسنگ قرار می‌گیرد			
	بدون انفجارسنگ	ضعیف	متوسط	شدید
انرژی الاستیک	۸۶	۱۴	۰	۰
خطی	۰	۰	۰	۰
تنش‌ها	۷	۱۵	۷۸	۰
تنش مماسی	۷	۰	۱۴	۷۹
تردی	۱۰۰	۰	۰	۰





تصویر ۴- مقایسه بررسی شدت مچاله‌شوندگی و انفجار سنگ در تونل انتقال آب گلاب

جدول ۱۵- پهنه‌بندی مسیر تونل انتقال آب گلاب با تاکید بر مچاله‌شوندگی و انفجار سنگ

خطر زمین‌شناسی	طبقه‌بندی مهندسی Q		متوسط روباره (متر)	کیلومتر	مقطع
	طبقه پایداری	مقدار متوسط			
مچاله‌شوندگی متوسط	بسیار ضعیف	۰/۵۶	۱۳۷	۱۰۵-۴۹۷۰	A
مچاله‌شوندگی شدید تا انفجار سنگ ضعیف	نسبتاً خوب	۴/۵	۴۰۰	۴۹۷۰-۶۴۴۰	B
مچاله‌شوندگی ضعیف تا متوسط	ضعیف	۱/۸۶	۴۱۹	۶۴۴۰-۱۰۱۶۰	C

شکل مورد نظر ایجاد شد. پس از ایجاد تونل، مدل تا رسیدن به تعادل نهایی مجدداً حل شد. در نهایت، برای بررسی وضعیت پایداری تونل، میزان جابجایی دیواره، کف و سقف تونل پیش از نصب نگهداری مناسب و نیز پس از نصب آن مورد مقایسه قرار گرفت.

در این تحلیل‌ها، داده‌های ورودی برای هر یک از بخش‌های زمین‌شناسی، مطابق با جدول ۱۶ در نظر گرفته شده است.

جهت بررسی پایداری هر یک از بخش‌های تونل، از روش ارائه شده توسط ساکورائی استفاده شده است. این روش بر مبنای کرنش بحرانی می‌باشد. ساکورائی (Sakurai et al. 2008)، بر اساس مدول الاستیسیته سنگ، سه محدوده کرنش را ارائه داد. بر این اساس، رابطه ۹ حد بالای کرنش، رابطه ۱۱ حد پایین کرنش و رابطه ۱۰ میانگین لگاریتمی این دو رابطه را نشان می‌دهد.

$$\text{رابطه (۹)} \quad \text{Log} \epsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 0.85$$

$$\text{رابطه (۱۰)} \quad \text{Log} \epsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 1.22$$

$$\text{رابطه (۱۱)} \quad \text{Log} \epsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 1.59$$

#### ۴- بررسی نگهداری اولیه تونل با تاکید بر شدت مچاله‌شوندگی و انفجار سنگ

تجربه نشان داده است که روش‌های تجربی و مشاهده‌ای نمی‌توانند به تنهایی رفتار سازه‌های زیرزمینی را به شکل مناسب و قابل اطمینانی تحلیل کنند.

به منظور تحلیل عددی پایداری تونل انتقال آب گلاب، از نرم‌افزار دو بعدی FLAC (بر اساس روش تفاضل محدود) استفاده شد. برای تحلیل زون خرد شده تونل، ابعاد مدل ۵۰ متر در ۵۰ متر در نظر گرفته شده و مدل‌سازی با استفاده از پارامترهای خروجی نرم‌افزار Rocklab انجام شد. با فرض پیوسته بودن مدل و اینکه معیار شکست موهر-کلمب در مورد مواد شبه پیوسته، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد، این معیار برای تحلیل انتخاب گردید (Itasca Consulting Group Inc. 2002).

در استفاده از نرم‌افزار عددی، ابتدا با اعمال شرایط مرزی و تنش‌های اولیه در حدوده مناسبی از مدل، مدل قبل از حفاری تونل حل شد. سپس با صفر نمودن جابجایی‌ها ایجاد شده در مرزهای مدل، تونل با

سامانه نگهداری اولیه تونل در پهنه‌های مورد بررسی، شاتکریت است. در بررسی مناسب بودن ضخامت شاتکریت در هر یک از پهنه‌های مورد مطالعه، جابجایی قائم تونل پس از نصب نگهداری اولیه در نظر گرفته شده است.

مشخصات شاتکریت استفاده شده و بررسی مناسب بودن آن در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی، در جدول ۱۸ آورده شده است. بر این اساس، برای بخش‌های A و C، ۵ سانتی‌متر شاتکریت و برای بخش B، ۷ سانتی‌متر شاتکریت در نظر گرفته شد.

در این روابط، E: مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ ( $\text{Kg/cm}^2$ ) و  $\epsilon_c$ : کرنش بحرانی است.

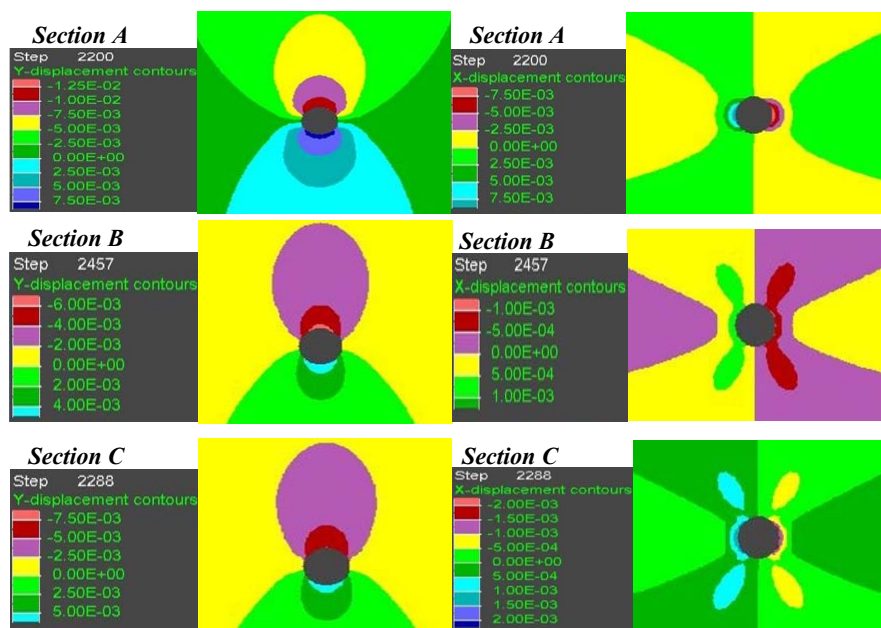
جابجایی مجاز نیز از رابطه ۱۲ محاسبه می‌گردد.

$$\epsilon_c = \frac{U_c}{a} \quad (12)$$

در این رابطه،  $U_c$  مقدار جابجایی مجاز در سقف و  $a$  شعاع تونل است. خروجی‌های جابجایی قائم و افقی نرم‌افزار عددی برای هر یک از پهنه‌های مورد مطالعه، در تصویر ۵ آورده شده است. نتایج مدل‌سازی هر پهنه در جدول ۱۷ ارائه شده است.

جدول ۱۶- پارامترهای توده‌سنگ استفاده شده در نرم‌افزار FLAC

واحد زمین‌شناسی	روباره (m)	C (MPa)	چگالی ( $\text{t/m}^3$ )	$\Phi$ (deg)	E (Gpa)	$\sigma_c$ (MPa)
A	۱۳۷	۰/۲۱۸	۲/۶۴	۲۹/۶۳	۲/۴۷	۴/۵۹
B	۴۰۰	۱/۲۱۸	۲/۷۴	۳۹/۹۵	۶/۶۵	۱۷/۳۵
C	۴۱۹	۰/۸۴۶	۲/۲۶	۳۷/۸۳	۵/۷۲	۱۳/۰۳



تصویر ۵- خروجی جابجایی‌های افقی و قائم تونل در محدوده‌های مورد مطالعه

جدول ۱۷- بررسی نتایج مدل‌سازی عددی در تونل انتقال آب گلاب

واحد سنگ‌شناسی	جابجایی مجاز (mm)	حداکثر جابجایی قائم (mm)			حداکثر جابجایی افقی (mm)		
		سقف	دیوار	کف	سقف	دیوار	کف
A	۱/۰۰۸	۱/۱۸۵	۱/۷۰۷	۸/۳۹۸	۴/۸۸۱	۹/۲۶۲	۲/۱۵۲
B	۰/۷۷۷	۶/۶۵۱	۱/۵۰۵	۵/۳۷۹	۱/۵۵۵	۱/۶۲۸	۱/۴۹۲
C	۰/۸۱۹	۷/۶۸۰	۵/۲۱۷	۶/۰۴۲	۰/۴۵۴	۱/۵۴۱	۰/۴۷۱

جدول ۱۸- پارامترهای مکانیکی شاتکریت استفاده شده

بررسی نگهداری	حداکثر جابجایی قائم پس از نگهداری (mm)			ضخامت (cm)	ثابت (Kg/cm <sup>2</sup> )	ممان اینرسی (m <sup>4</sup> )	E (Pa/m)	مقطع
	کف	دیوار	سقف					
مناسب	-	-	-	۵	۳۵۰	۱/۰۴۲×۱۰ <sup>-۵</sup>	۱۵×۱۰ <sup>۹</sup>	A
مناسب	۳/۴۴×۱۰ <sup>-۴</sup>	۵/۴۳×۱۰ <sup>-۴</sup>	۸/۴۲×۱۰ <sup>-۴</sup>	۷	۳۵۰	۲/۸۵۸×۱۰ <sup>-۵</sup>	۱۵×۱۰ <sup>۹</sup>	B
مناسب	۳/۲۱×۱۰ <sup>-۵</sup>	۷/۲۴×۱۰ <sup>-۵</sup>	۹/۴۷×۱۰ <sup>-۵</sup>	۵	۳۵۰	۱/۰۴۲×۱۰ <sup>-۵</sup>	۱۵×۱۰ <sup>۹</sup>	C

## ۷- نتیجه‌گیری

از مزایای روش‌های تجربی در بررسی خطرات مچاله‌شوندگی و انفجارسنگ در جریان طراحی و اجرای سازه‌های زیرزمینی، می‌توان به ارزان بودن و سریع بودن آنها اشاره نمود. نتایج این پژوهش، وقوع پدیده انفجارسنگ را در محدوده‌های زمین‌شناسی مقاوم و عمیق و مچاله‌شوندگی را در محدوده‌های سست و با روباره زیاد، پیش‌بینی کرده است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، مشخص شد که روش‌های تحلیلی، تجربی و نیمه‌تجربی در ارزیابی هر دو پدیده مچاله‌شوندگی و انفجارسنگ هم‌خوانی نسبتاً مناسبی دارند. بر این اساس، مسیر تونل به سه محدوده A (کیلومتر ۱۰۵ تا ۴۹۷۰) با مچاله‌شوندگی متوسط، B (کیلومتر ۴۹۷۰ تا ۶۴۴۰) با مچاله‌شوندگی شدید تا انفجارسنگ ضعیف و C (کیلومتر ۶۴۴۰ تا ۱۰۱۶۰) با مچاله‌شوندگی ضعیف تا متوسط تفکیک شد. نتایج بررسی‌های عددی، مقدار حداکثر جابجایی قائم در سقف و جابجایی افقی در دیوار تونل را پیش‌بینی کرده است. با این وجود، مقدار ۵ سانتی‌متر شاتکریت برای نگهداری اولیه بخش‌های A و C و ۷ سانتی‌متر شاتکریت برای بخش B، پیشنهاد شد. با توجه به اینکه پیش‌بینی دقیق مچاله‌شوندگی و انفجارسنگ در جریان حفاری فضا‌های زیرزمینی نسبتاً عمیق امکان‌پذیر نیست، برای جلوگیری از هرگونه حادثه غیر منتظره، اتخاذ تمهیداتی از جمله استفاده از روش‌های آزادسازی تنش، انتخاب مناسب سامانه نگهداری و زمان نصب آن در نواحی مستعد خطر ضروری می‌باشد.

## مراجع

- prediction", *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 26 (4): 137-163.
- Baisheng, N. & Xiangchun, L., 2012, "Mechanism research on coal and gas outburst during vibration blasting", *Safety Science*, Vol. 50: 741-744.
- Barla, G., 2002, "Tunneling under Squeezing Rock Conditions", 98 pp.
- Barla, G. 2002 "Tunnelling under squeezing rock conditions", In: Kolymbas, D. (ed.), *Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling*: 169-268.
- Casten, U. & Fajkiewicz, Z., 1993, "Induced gravity anomalies and rockburst risk in coal mines – a case history", *Geophysical Prospecting*, Vol. 41(1): 1-13.
- Cook, N.G.W., Hoek, E., Pretorius, J.P.G., Ortlepp, W.D. & Salamon, M.D.G., 1966, "Rock mechanics applied to the study of rock bursts", *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 66: 435-528.
- Dalgic, S., 2002, "Tunneling in squeezing rock, the Bolu tunnel, Anatolian Motorway, Turkey", *Engineering Geology*, Vol. 67 (12): 73-96.
- Goel, R. K., Jetwa, J. L. & Dube, A. K., 1997, "Support Pressure Assessment in Arched Underground Opening through Poor Rock Masses", *Journal of Engineering Geology*, Vol. 48: 59-81.
- Gong, F.Q. & Li, X.B., 2007, "A distance discriminant analysis method for prediction of possibility and classification of rockburst and its application", *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, Vol. 26 (5): 1012-1018 (in Chinese).
- Hoek, E. & Marinos, P., 2000, "Predicting tunnel squeezing problems in weak Heterogeneous rock masses", *Tunnels and Tunneling International*: 45-51: part one, 33-36: part two.
- Hu, H., Linming, D., Xuwei, L., Qiuqiu, Q., Tongjun, C. & Siyuan, G., 2011, "Active velocity tomography for assessing rock burst hazards in a kilometer deep mine", *Mining Science and Technology (China)*, Vol. 21: 673-676.
- Hudson, J.A., 2010, "Stresses in rock masses: a review of key points", In: *Vrkljan, I. (Ed.), Rock Engineering in Difficult Rock Conditions Soft Rocks and Karst*, Taylor & Francis Group, London: 61 pp.
- Hsiung, S.M., 2001, "Predicting rock burst", *Institu of technology today, SWRI Publication*.
- Itasca consulting Group Inc., 2002, "FLAC User's Manual", (Ver. 4), ITASCA Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota.
- فرهودی، ق.، راهنما راد، ج.، رحیمی، ع.، سامانی، ب.، کریمی، ا.، ۱۳۸۶، "زمین‌شناسی مهندسی و رده‌بندی مهندسی توده‌سنگ در ساختگاه سد خاکی قره‌پیری در شمال شرق شیراز"، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال ۳ (۱): ۴۳-۳۳.
- قیاسوند، ص.، ۱۳۸۵، "ارزیابی پتانسیل لهیدگی در توده‌سنگ‌های مسیر تونل انتقال آب گلاب"، مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس تونل ایران: ۷۹-۷۷.
- Aydan, Ö., Akagi, T. & Kawamoto, T., 1993, "The squeezing potential of rock around tunnels: theory and

- caving coal face passed fault with deep mining", *Safety Science*, Vol. 50: 645-648.
- Yang, J.L., Li, X.B., Zhou, Z.L. & Lin, Y., 2010**, "A Fuzzy assessment method of rock-burst prediction based on rough set theory", *Metal Mine*, Vol. 6: 26-29 (in Chinese).
- Zhao, H.B., 2005**, "Classification of rock burst using support vector machine", *Rock and Soil Mechanics*, Vol. 26 (4): 642-644 (in Chinese).
- Zhou, J., Shi, X.Z., Dong, L., Hu, H.Y. & Wang, H.Y., 2010**, "Fisher discriminant analysis model and its application for prediction of classification of rock burst in deepburied long tunnel", *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 16 (2): 144-149.
- Zhu, W.C., Li, Z.H., Zhu, L. & Tang, C.A., 2010**, "Numerical simulation on rock burst of underground pening triggered by dynamic disturbance", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol.25: 587-599.
- Jethwa, J.L., Singh, B. & Singh, B., 1984**, "Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions – a new approach", In: *Brown, E.T. & Hudson, J. A. (eds.), Design and Performance of Underground Excavations, ISRM Symposium, Cambridge: 231-238.*
- Jun, F., Linming, D., Hua, H., Taotao, D., Shibin, Z., Bing, G. & Xinglin, S., 2012**, "Directional hydraulic fracturing to control hard-roof rock burst in coal mines", *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 22: 177-181.
- Jiang, Q., Feng, X.T., Xiang, T.B. & Su, G.S., 2010**, "Rock burst characteristics and numerical simulation based on a new energy index: a case study of a tunnel at 2500 m depth", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 69: 381-388.
- Kwasniewski, M., Szutkowski, I. & Wang, J. A., 1994**, "Study of ability of coal from seam 510 for storing elastic energy in the aspect of assessment of hazard in Porabka-Klimontow Colliery", *Sci. Rept. Silesian Technical University*.
- Linkov, A. M., 1996**, "Rockburst and the instability of rock masses", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 33: 727-732.
- Rocscience Inc., 2002**, "Rocklab user's guide", 25 pp.
- Sakurai, S., Akutagawa S., Takeuchi K., Shinji M. & Shimizu N., 2008**, "Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method", *Tunneling and Underground Space Technology: 185-196.*
- Sharan, S.K., 2004**, "A finite element perturbation method for the prediction of Rock burst", *Computers and Structures*, Vol. 85: 1304-1309.
- Shrestha, G.L. & Broch, E., 2008**, "Influences of the valley morphology and rock mass strength on tunnel convergence: with a case study of Khimti 1 headrace tunnel in Nepal", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23: 638-650.
- Shivakumar, K., Rao, M.V.M.S., Srinivasan, C. & Kusunose, K., 1996**, "Multifractal analysis of the spatial distribution of area rock bursts at Kolar Gold Mines", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 33 (2): 167-172.
- Singh, M, Singh, B. & Choudhari, J., 2007**, "Critical strain and squeezing of rock mass in tunnels" *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 22: 343-350.
- Terzaghi, K., 1946**, "Rock tunneling with steel supports", *The Commercial Shearing and Stamping Co, Youngstown, Ohio, Chapter Rock defects and loads in tunnel supports: 17-99.*
- Wang, J.A. & Park, .H.D., 2001**, "Comprehensive Prediction of Rockburst Based on Analysis of Strain Energy in Rocks", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol.16: 49-57.
- Wang, Y.C., Shang, Y.Q., Sun, H.Y. & Yan, X.S., 2010**, "Study of prediction of rockburst intensity based on efficacy coefficient method", *Rock and Soil Mechanics*, 31 (2): 529-534 (in Chinese).
- Xuehua, C., Weiqing, L. & Xianyang, Y., 2012**, "Analysis on rock burst danger when fully mechanized