

## بررسی تاثیر مخاطرات زمین شناسی بر گام پیشروی مجاز تونل

عارف جابری<sup>۱</sup>، رضا رشیدی خبیر<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانش آموخته ی کارشناسی ارشد، مهندسی معدن، گرایش مکانیک سنگ، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران  
<sup>۲</sup>عضو هیئت علمی، گروه معدن، دانشگاه لرستان، ایران

نام نویسنده مسئول:

رضا رشیدی خبیر

Rashidi.r@lu.ac.ir

### چکیده

آگاهی از خطرات زمین شناسی، نقش مهمی در انتخاب گام پیشروی مجاز تونل دارد. نخستین گام در طراحی تونل در سنگ های ضعیف و با عمق زیاد نسبت به سطح زمین، تعیین وضعیت زمین از لحاظ پتانسیل مچاله شونده ی یا جابجایی های وابسته به زمان و پدیده انفجار سنگ می باشد. تونل انتقال آب گلاب با طول حدود ۱۱ کیلومتر و قطر حفاری ۴/۲ متر بخشی از طرح آبرسانی از سد زاینده رود به شهرهای کاشان و اصفهان است. با توجه به عبور تونل از نواحی مرتفع و کوهستانی و وجود توده سنگ های آهکی و نسبتاً ناپایدار و سست، بررسی پتانسیل مچاله شونده ی و انفجار سنگ به منظور تعیین گام مجاز پیشروی تونل ضروری می باشد. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از برداشت های زمین شناسی و مطالعه گمانه های حفاری شده، مسیر تونل تقسیم بندی و سپس مچاله شونده ی و انفجار در هر محدوده بررسی گردید. براین اساس توده سنگ مسیر تونل به سه محدوده، محدوده A با پتانسیل مچاله شونده ی متوسط و انفجار سنگ ضعیف، محدوده B با پتانسیل مچاله شونده ی شدید و انفجار سنگ ضعیف تا متوسط و محدوده C با پتانسیل مچاله شونده ی ضعیف تا متوسط و انفجار ضعیف سنگ تفکیک شد. سپس در ادامه به منظور تعیین گام مجاز پیشروی تونل از نرم افزار FLAC3D و روابط ساکورایی استفاده شد و در نهایت گام مجاز برای محدوده B تونل که در شرایط نامساعدتری نسبت به سایر محدوده ها قرار داشت برابر ۳ متر مشخص شد.

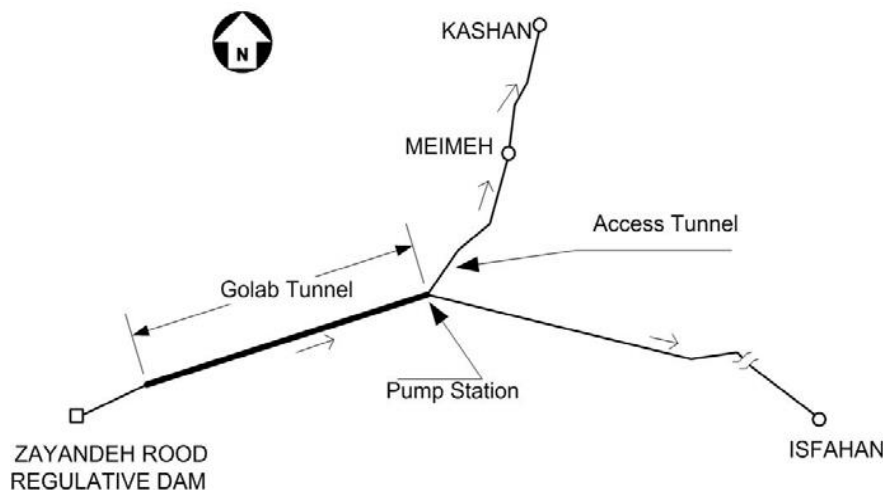
**کلمات کلیدی:** مخاطرات زمین شناسی، گام مجاز تونل، FLAC3D، مچاله شونده ی، انفجار سنگ.

## ۱- مقدمه

تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی برای مقاصد متنوعی از جمله تونل‌های حمل و نقل و دسترسی، تونل‌های آب بر، فضاهای زیر زمینی بزرگ احداث می‌شوند. یکی از مشکل‌سازترین تونل‌ها، تونل‌های آب بر می‌باشد که معمولاً دارای طول زیادی بوده و از لیتولوژی‌های مختلفی عبور می‌کند. تونل‌های عبوری از سنگ‌های ضعیف و ناهمسان‌مانند شیست، اسلیت، فیلیت و غیره با مشکلات زیادی از لحاظ پایداری مواجه می‌باشند [۱]. پدیده مچاله شونده با تغییر شکل‌های بزرگ و همگرایی‌های وابسته به زمان در طی حفاری تونل همراه است. در اثر ایجاد و ترکیب تنش‌های القایی، تنش موجود از حد مقاومت برشی گذشته و توده سنگ به داخل محدوده حفاری شده رانده می‌شود. این تغییر شکل‌ها ممکن است طی حفاری تونل یا در دوره زمانی طولانی مدت، ادامه داشته باشد. معمولاً سنگ‌هایی با مقاومت پایین در مقابل تنش‌های اعمالی بالا مچاله خواهند شد [۲]. انفجار سنگ پدیده‌ای است که به صورت شکست ناگهانی سنگ و آزادسازی انرژی کرنشی ذخیره شده در یک زمان کوتاه در معادن زیرزمینی و تونل‌های سنگی، معمولاً در نقاط پر تنش و با عمق زیاد نسبت به سطح زمین مشاهده می‌شود که بر اثر شکست انفجاری، سنگ به صورت قطعات کوچک و بزرگ به اطراف پراکنده شده که علاوه بر آسیب‌رسانی به افراد و تجهیزات، باعث ریزش و ناپایداری فضای زیرزمینی نیز می‌شود [۳]. در طراحی تونل‌ها گام پیشروی مجاز یکی از مسائل مهمی است که تاثیر زیادی بر سرعت حفاری، با توجه به توان عملیاتی حفر تونل دارد. مباحث اقتصادی، زمان تحویل و مدیریت هر چه بهتر یک پروژه ارتباط مستقیم و تنگاتنگی با میزان حداکثر گام پیشروی مجاز دارد. در این مقاله، ابتدا با استفاده از برداشت‌های زمین‌شناسی و مطالعه گمانه‌های حفاری شده، مسیر تونل تقسیم بندی شد. پس از بررسی تحلیلی و تجربی مچاله شونده و انفجار سنگ برای هر یک از بخش‌ها نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت گام مجاز حفاری تونل با توجه به مچاله شونده و انفجار سنگ برای هر بخش مشخص شد.

## ۲- مشخصات و زمین‌شناسی تونل

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 بخشی از طرح آب‌رسانی به شهرهای کاشان و اصفهان است که از سد زاینده رود آغاز و تا دشت کارون امتداد دارد. شکل ۱ نمای کلی از این طرح را نمایش می‌دهد. با توجه به عبور تونل از نواحی مرتفع و کوهستانی و همچنین وجود توده سنگ‌های آهکی و نسبتاً ناپایدار و سست در مسیر تونل، لازم است پدیده مچاله شونده و انفجار سنگ در این مناطق ضروری است [۴].



شکل ۱: نقشه کلی پروژه انتقال آب از سد زاینده رود به شهر کاشان [۴]

گستره طرح قسمتی از ایران مرکزی است که بصورت نوار طویل دگرگون شده‌ای در امتداد و به موازات روراندگی زاگرس قرار دارد. این زون جزء ناآرام زمین و به عبارتی زون ساختمانی ایران به شمار می‌رود و دگرگونی و ماگماتیسم مهمی را پشت سر گذاشته است. توده سنگ مسیر تونل شامل میکا شیست‌ها، ماسه سنگ و سیلتستون، آهک دگرگون شده با میان لایه‌های میکا شیستی، کالک شیست، فیلیت، اسلیت، کنگلومرا، شیل و مارن است. در جدول ۱ خصوصیات ژئوتکنیکی توده سنگ مسیر تونل آورده شده است. نتایج مطالعات ژئوتکنیکی و آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که اکثر مسیر تونل دارای توده سنگ ضعیفی می‌باشد، به گونه‌ای که حدود ۸۰ درصد از مسیر تونل دارای RMR مابین ۳۱ تا ۴۱ و حدود ۲۰ درصد دارای RMR ۴۰ تا ۶۱ درصد هست. 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 مولفه معکوس، واحدهای ژوراسیک را بر روی واحدهای کرتاسه و واحدهای کرتاسه را بر روی واحدهای

اتوسن 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 [۴].

جدول ۱: خصوصیات ژئوتکنیکی توده سنگ مسیر تونل [۴]

بخش تونل	کیلومتر تونل (m)	روباره (m)	شاخص کیفی سنگ (Q)	مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ (MPa)	مدول تغییر شکل پذیری (GPa)
I	۰-۱۰۵	۱۵	۰/۴۱	۳/۸	۳/۲
II	۱۰۵-۲۰۵۵	۲۰۰	۰/۴۵	۳/۸	۳/۲
III	۲۰۵۵-۲۵۲۰	۱۲۰	۰/۴	۲/۷	۳
IV	۲۵۲۰-۳۰۰۰	۱۳۰	۱/۱	۳	۳/۵
V	۳۰۰۰-۳۶۶۰	۲۲۰	۰/۴۵	۳/۸	۳/۲
VI	۳۶۶۰-۴۹۷۰	۳۳۰	۰/۲	۲/۷	۳/۲
VII	۴۹۷۰-۶۲۵۰	۴۰۰	۰/۲	۲/۷	۳/۲
VIII	۴۹۷۰-۶۴۴۰	۴۰۰	۴/۸	۳۲	۱۸
IX	۶۴۴۰-۸۵۸۵	۴۳۰	۰/۲	۲/۷	۳/۲
X	۸۵۸۵-۸۸۹۰	۴۵۰	۴/۸	۳۲	۱۸
XI	۸۸۹۰-۹۲۱۵	۵۳۰	۱/۲۵	۱۰	۶/۴
XII	۹۲۱۵-۹۷۷۰	۵۳۰	۳/۳	۲۲	۱۶/۷
XIII	۹۷۷۰-۱۰۱۶۰	۳۴۰	۱/۲	۸	۹
XIV	۱۰۱۶۰-۱۱۰۸۰	۲۵۰	۰/۴۱	۳/۵	۳/۲

### ۳- روش های ارزیابی مچاله شوندگی

برای ارزیابی شرایط مچاله شوندگی، روش های تجربی، نیمه تجربی و تحلیلی توسط محققین مختلفی ارائه گردیده است. در ادامه به معرفی این روش ها پرداخته می شود.

#### ۳-۱- روش های تجربی

##### ۳-۱-۱- روش سین و همکاران

سین و همکاران با توجه به روباره H و شاخص کیفیت تونل زنی Q مچاله شوندگی را به صورت جدول ۲ ارائه کردند [۵].

جدول ۲: پتانسیل مچاله شوندگی توسط سین و همکاران [۵]

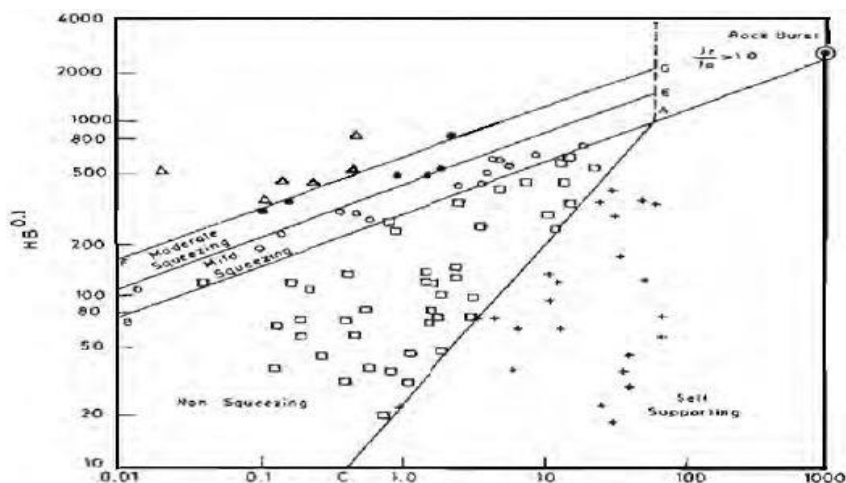
H	$> 350Q^{1/3}$	$< 350Q^{1/3}$
شرایط مچاله شوندگی	مچاله شوندگی	غیر مچاله شوندگی

### ۳-۱-۲- گوتل و همکاران

گوتل و همکاران مچاله شوندگی را به صورت رابطه ۱ بیان نمودند [۶].

$$N = SRF \cdot Q \quad (1)$$

در این رابطه Q شاخص کیفیت سنگ، SRF ضریب کاهش تنش توده سنگ می باشند. براساس شکل ۲ و در نظر گرفتن ضخامت روباره H و عرض تونل B، پتانسیل مچاله شوندگی تعیین می گردد.



شکل ۲: معیار گوتل و همکاران [۶]

### ۳-۲- روش های نیمه تجربی

#### ۳-۲-۱- روش جتوا و همکاران

جتوا و همکاران درجه مچاله شوندگی را طبق رابطه ۲ و براساس جدول ۳ ارائه دادند [۷].

$$N = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \cdot H} \quad (2)$$

$\sigma_{cm}$  مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ، H عمق تونل از سطح زمین و  $\gamma$  وزن مخصوص توده سنگ

جدول ۳: پتانسیل مچاله شوندگی بر مبنای روش جتوا [۷]

< 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 2	> 2	N
شدید	متوسط	کم	غیر مچاله شوندگی	پتانسیل مچاله شوندگی

#### ۳-۲-۲- روش هوک و مارینوس

در روش هوک و مارینوس از نسبت مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ به تنش برجا ( $\frac{\sigma_{cm}}{p_0}$ )، میزان کرنش شعاعی جداره تونل طبق رابطه ۳ بدست می آید شدت پتانسیل مچاله شوندگی نیز با استفاده از جدول ۴ تخمین زده می شود [۸].

$$\varepsilon_t = \frac{0.15}{p_0} \left( 1 - \frac{p_i}{p_0} \right) \sigma_{cm}^{-(3p_i/p_0 + 1)(3.8p_i/p_0 + 0.54)} \quad (3)$$

جدول ۴: پتانسیل مچاله شوندگی بر مبنای روش هوک و مارینوس [۸]

> 10	5 - 10	2/5 - 5	1 - 2/5	< 1	$\varepsilon_t$
شدید	خیلی زیاد	زیاد	کم	بدون مچاله شوندگی	شدت مچاله شوندگی

### ۳-۳- روش‌های تحلیلی-تئوریک

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

پتانسیل مچاله شوندگی در این دو روش با توجه به مقادیر تنش مماسی  $\sigma_\theta$  و مقاومت فشاری تک محوری سنگ  $\sigma_{cm}$  و تنش اصلی  $\sigma_1$  به صورت جدول ۵ پیش‌بینی می‌شود [۹].

جدول ۵: پتانسیل مچاله شوندگی بر مبنای روش بارلا و انجمن مکانیک سنگ [۹]

شدت مچاله شوندگی	روش ارزیابی	
	$(\sigma_{cm} / \sigma_1)_{barla}$	$(\sigma_\theta / \sigma_{cm})_{ISRM}$
بدون مچاله شوندگی	$> 1$	$1 <$
ضعیف	$0.4 - 1$	$1 - 2$
متوسط	$0.2 - 0.4$	$2 - 4$
شدید	$0.2 >$	$> 4$

#### ۴- بررسی مچاله شوندگی

با توجه به بررسی‌های انجام شده که نتایج آن در جدول ۶ مشاهده می‌شود، ۶۵ درصد از محدود تونل در دو روش سین و گوئل در رده بدون مچاله شوندگی قرار دارد. معیارهای جتوا، بارلا، ISRM مچاله شوندگی ضعیف تا متوسط را به بیشتر بخش‌های تونل اختصاص داده است. همچنین معیار هوک ۱۰۰ درصد محدوده تونل را در رده بدون مچاله شوندگی قرار داده است. مطابق با بررسی‌های انجام شده، مچاله شوندگی تونل گلاب را می‌توان به سه بخش A، B و C تقسیم کرد. برای محدوده A که در کیلومتر ۱۰۵ تا ۴۹۷۰ قرار دارد توده سنگ‌های ضعیف تا بسیار ضعیف و متوسط روباره ۲۲۰ متر و پتانسیل مچاله شوندگی متوسط پیش‌بینی شده است. مقاوم‌ترین توده سنگ‌های مسیر تونل، در محدوده B قرار دارد که در کیلومتر ۴۹۷۰ تا ۶۴۴۰ قرار داشته با پتانسیل مچاله شوندگی شدید و محدود C در کیلومتر ۶۴۴۰ تا ۱۰۱۶۰ داری روباره زیاد و کیفیت ضعیف تا نسبتاً ضعیف توده سنگ، پتانسیل مچاله شوندگی ضعیف تا متوسط محتمل است.

جدول ۶: مقایسه روش‌های ارزیابی پتانسیل مچاله شوندگی

درصدی از تونل که در هر رده از مچاله شوندگی قرار می‌گیرد					روش ارزیابی	
شدید	متوسط	ضعیف	دارای مچاله شوندگی	بدون مچاله شوندگی		
-	-	-	۳۵	۶۵	سین	تجربی
-	-	-	۳۵	۶۵	گوئل	
۲۳	۲۱	۳۵	-	۲۱	جتوا	نیمه تجربی
-	-	-	-	۱۰۰	مارینوس	
-	۲۹	۴۲	-	۲۸	بارلا	تحلیلی
۲۹	۴۳	۷	-	۲۱	ISRM	

### ۵- معیار ارزیابی پدیده انفجار

#### ۵-۱- معیار انرژی الاستیک خطی

طبق نتایج تحقیقات کوازیویزسکی و همکاران وقوع پدیده انفجار سنگ را می‌توان با توجه به میزان انرژی کرنشی در واحد سنگ طبق رابطه ۴ و جدول ۷ بیان کرد [۱۰].

$$PES = \frac{\sigma_c^2}{2E} \quad (4)$$

$\sigma_c$  مقاومت فشاری بر حسب MPa، E مدول الاستیسیته بر حسب GPa است.

جدول ۷: پتانسیل انفجار سنگ بر مبنای معیار انرژی الاستیک خطی [۱۰]

PES(kj/m3)	>۵۰	۱۰۰-۵۰	۱۵۰-۱۰۰	۲۰۰-۱۵۰	>۲۰۰
شدت انفجار سنگ	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد

#### ۵-۲- معیار تردی سنگ

تردی سنگ، طبق رابطه ۵، از نسبت مقاومت فشاری سنگ به مقاومت کششی آن محاسبه می‌گردد و در تخمین شدت انفجار سنگ قابل استفاده می‌باشد [۱۱].

$$B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (5)$$

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

جدول ۸: پتانسیل انفجار بر مبنای معیار تردی [۱۱]

B	>۴۰	۲۶/۷-۴۰	۱۴/۵-۲۶/۷	۱۴/۵
شدت انفجار	بدون انفجار	ضعیف	متوسط	شدید

#### ۵-۳- معیار تنش مماسی

این معیار با نسبت تنش مماسی  $\sigma_\theta$  و مقاومت فشاری تک محوری  $\sigma_c$  طبق رابطه ۶ و پتانسیل انفجار سنگ طبق معادلات مقدماتی آقای وانگ و همکارانش طبق جدول ۹ بیان می‌شود [۱۲].

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

جدول ۹: پتانسیل انفجار بر مبنای تنش مماسی [۱۲]

$T_s$	$\leq 3$	۰/۳-۰/۵	۰/۵-۰/۷	۰/۷-۰/۹	>۰/۹
شدت انفجار	بدون انفجار	ضعیف	متوسط	شدید	بسیار شدید

#### ۴-۵- معیار گوئل

این معیار توسط گوئل به صورت رابطه ۱ تعریف شده است. با در نظر گرفتن ضریب کاهش تنش SRF و شاخص کیفیت تونل زنی در سنگ Q عدد توده سنگ N محاسبه شده و با استفاده از عمق تونل H و B عرض تونل بر حسب متر، می توان مطابق شکل ۲ و رابطه ۱ شرایط زمین را مورد بررسی قرار داد. این معیار بیشتر برای بررسی پدیده مچاله شونده سنگ مورد بررسی قرار می گیرد اما با توجه به نمودار ارائه شده می توان وقوع انفجار سنگ را نیز پیش بینی کرد [۶].

#### ۶- بررسی انفجار سنگ

نتایج بررسی شدت انفجار سنگ، در جدول ۱۰ آورده شده است. براساس معیار تنش ها، انرژی کرنشی و تنش مماسی، ۳۳ درصد از محدود تونل در رده بدون انفجار سنگ، ۱۰ درصد در رده انفجار ضعیف، ۳۱ درصد در رده انفجار متوسط و ۲۶ درصد در رده انفجار شدید قرار دارد. معیار تردی و گوئل به ترتیب ۱۰۰ و ۸۵ درصد از محدوده تونل را در رده بدون انفجار پیش بینی کرده است. برای محدوده A تونل در رده بدون انفجار تا انفجار ضعیف قرار دارد برای محدوده B نیز انفجار در رده ضعیف تا متوسط قرار دارد که با روبراه نسبتاً زیاد و توده سنگ های مقاوم در این محدوده مطابقت داشته و توجه بیشتر به خطر انفجار سنگ را یادآور می سازد و محدوده C از کیلومتر ۶۶۴۰ تا ۱۰۱۶۰ در رده ضعیف قرار دارد.

جدول ۱۰: مقایسه روش های ارزیابی پتانسیل انفجار سنگ

درصدی از تونل که در هر رده از انفجار سنگ قرار می گیرد				معیار انفجار
شدید	متوسط	ضعیف	بدون انفجار سنگ	
-	-	۱۴	۸۶	انرژی کرنشی
-	۷۸	۱۵	۷	تنش ها
-	-	-	۱۰۰	تردی
۷۹	۱۴	-	۷	تنش مماسی
-	-	۱۵	۸۵	گوئل

#### ۷- تعیین حداکثر گام مجاز پیشروی

اکثر محققین بر این عقیده اند که طول هر گام حفاری تاثیر قابل ملاحظه ای روی پتانسیل ریزش جبهه کار و دهانه خود پایدار و در کل، پایداری تونل دارد علاوه بر موارد گفته شده، هزینه و زمان برای اجرای یک تونل، وابستگی شدیدی به انتخاب گام حفاری دارد [۱۳]. با در نظرگیری مسائل بیان شده و با توجه به مطالعه پتانسیل مچاله شونده سنگ، محدوده B در کیلومتر ۴۹۷۰ تا ۶۴۴۰ تونل گلاب در شرایط نامساعد قرار گرفته است. با در نظرگیری مسائل فوق اقدام به تعیین گام پیشروی مجاز برای محدوده B تونل گلاب به کمک نرم افزار FLAC3D شده است. در استفاده از نرم افزار عددی، ابتدا با اعمال شرایط مرزی و تنش های اولیه در محدوده مناسبی از مدل، مدل قبل از حفاری تونل حل شد. سپس با صفر نمودن جابجایی های ایجاد شده در مرزهای مدل، تونل با شکل مورد نظر ایجاد شد. پس از ایجاد تونل، مدل تا رسیدن به تعادل نهایی مجدداً حل شد [۱۴]. جهت بررسی گام مجاز پیشروی تونل در محدوده B، از روش ارائه شده توسط ساکورائی استفاده شده است. این روش بر مبنای کرنش بحرانی می باشد. ساکورائی بر اساس مدل الاستیسیته سنگ، سه محدوده کرنش را ارائه داد. بر این اساس، رابطه ۷ حد بالای کرنش، رابطه ۹ حد پایین کرنش و رابطه ۸ میانگین لگاریتمی این دو رابطه را نشان می دهد.

$$\text{Log} \varepsilon_r = -0.25 \text{Log} E - 0.8 \quad (7)$$

$$\text{Log} \varepsilon_r = -0.25 \text{Log} E - 1.22 \quad (8)$$

$$\text{Log} \varepsilon_r = -0.25 \text{Log} E - 1.59 \quad (9)$$

در روابط ارائه شده توسط ساکورایی و آدائوچی مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتی متر مربع و  $\varepsilon_{cr}$  کرنش بحرانی است [۱۵].

کرنش برشی بحرانی در حالت سه محوره  $\gamma_c$  با استفاده از کرنش بحرانی در حالت فشاری محصور نشده  $\varepsilon_{cr}$  و نسبت پواسون  $\vartheta$  از رابطه ۱۰ به دست می آید.

$$\gamma_c = (1 + \vartheta)\varepsilon_{cr} \quad (10)$$

به منظور محاسبه جابجایی بحرانی توده سنگ، می توان از رابطه ۱۱ استفاده کرد.

$$U_{cm} = \varepsilon_{cr}a \quad (11)$$

در رابطه ۱۱،  $a$  شعاع تونل و  $U_{cm}$  جابجایی بحرانی است.

براین اساس جابجایی مجاز ۱/۱۶ سانتی متر و کرنش برشی مجاز ۰/۷۴ برای محدوده B محاسبه گردیده است. در این تحلیل، داده های ورودی برای محدوده مورد نظر مطابق با جدول ۱۱ در نظر گرفته شده است.

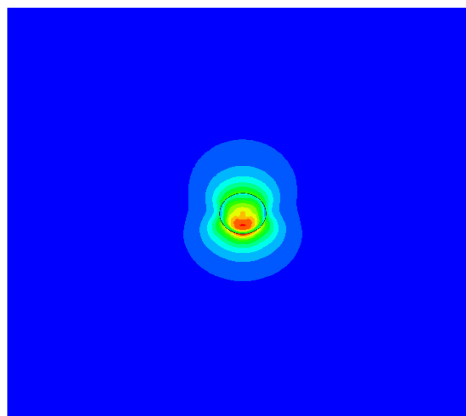
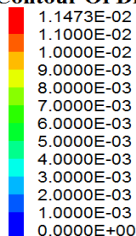
جدول ۱۰: مشخصات توده سنگ مسیر تونل در مقطع B [۴]

مقطع	$\sigma_t$ (Mpa)	$\sigma_c$ (MPa)	C (MPa)	E (GPa)	$\Phi$ (Deg)	$\nu$
B	۰/۰۷	۱/۹	۰/۵	۱/۴	۲۰	۰/۳۵

در شکل ۳ و ۴ جابجایی و کرنش برشی در حالت گام ۳ متری برای محدوده B تونل نشان داده شده است. همانطور که در اشکال مشاهده می شود، گام مجاز برای این محدوده ۳ متر می باشد. این گام، حداکثر گام مجاز پیشروی برای محدوده B با توجه به پتانسیل بالای مچاله شوندگی و انفجار سنگ می باشد. بدیهی است در مقادیر بیشتر همان گونه که در جدول ۱۱ نشان داده شده است، جابجایی بیشتر از حد مجاز می باشد.

**FLAC3D 5.00**  
©2012 Itasca Consulting Group, Inc.

Contour Of Displacement

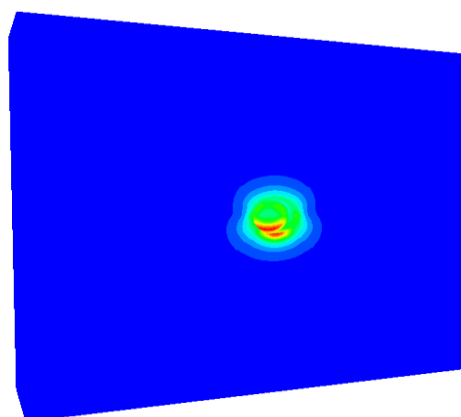
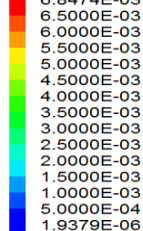


شکل ۳: میزان جابجایی گام ۳ متری در محدوده B تونل گلاب

**FLAC3D 5.00**  
©2012 Itasca Consulting Group, Inc.

Contour of Max. Shear Strain Increment

Calculated by: Volumetric Averaging



شکل ۴: میزان کرنش برشی گام ۳ متری در محدوده B تونل گلاب



جدول ۱۱: نتایج حاصل از گام‌های حفاری مختلف برای محدوده B

گام(متر)	جابجایی(سانتی متر)	کرنش برشی(درصد)
۱	۱	۰/۶۳
۲	۱/۰۸	۰/۶۵
۳	۱/۱۴	۰/۶۸
۴	۲/۱	۰/۸۵

#### ۸- 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 روبراه زیاد، پیش‌بینی کرده است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، مشخص شد که روش‌های تحلیلی، تجربی و نیمه تجربی در ارزیابی هر دو پدیده مچاله‌شوندگی و انفجارسنگ همخوانی نسبتاً مناسبی دارند. براین اساس مسیر تونل به سه محدوده A، کیلومتر ۱۰۵ تا ۴۹۷۰ با مچاله‌شوندگی متوسط و انفجار سنگ ضعیف، محدوده B، کیلومتر ۴۹۷۰ تا ۶۶۴۰ با مچاله‌شوندگی شدید و انفجار ضعیف تا متوسط، محدوده C، کیلومتر ۶۶۴۰ تا ۱۰۱۶۰ با مچاله‌شوندگی ضعیف تا متوسط و انفجار ضعیف تفکیک شد. با انجام مطالعات فوق‌زون B نامساعد تشخیص داده شد. براین اساس به کمک نرم افزار FLAC3D اقدام به تعیین حداکثر گام مجاز پیشروی برای این محدود شد و نهایتاً با توجه به شرایط بیان شده حداکثر گام مجاز پیشروی برای محدوده مورد نظر ۳ متر محاسبه شد.

- [1]. Einstein H, (1996), "Tunneling in difficult ground swelling behavior and identification of swelling rock", *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29, pp113 - 124.
- [۲]. جابری، عارف، زمانی، فواد، حاجی حسنی، محسن، ۱۳۹۶، "بررسی پدیده مچاله شونده‌گی و تاثیر سیستم نگهداری در کاهش زون پلاستیک تونل گلاب" دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران (مهندسی سازه و مدیریت ساخت) تهران، دانشگاه صنعتی شریف.
- [۳]. ناکی، ر، شهریار، ک، افسری نژاد، م، ۱۳۸۲، "خطر پدیده انفجار سنگ و چگونگی تشخیص آن با توجه به شرایط تونل چشمه تنگان" سومین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران. ۳۴۶-۳۳۸.
- [۴]. مهندسین مشاور ری آب، ۱۳۸۳، "گزارش زمین‌شناسی مهندسی تونل انتقال آب گلاب".
- [5]. 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.
- [6]. Goel RK, Jetwa JL, & Dube, AK. (1997). "Support Pressure Assessment in Arched Underground Opening through Poor Rock Masses". *Journal of Engineering Geology*, Vol. 48: 59-81.
- [7]. 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.
- [8]. 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.
- [9]. Barla, G. (2002). "Tunnelling under squeezing rock conditions". In: Kolymbas, D. (ed.), *Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling*: 169-268.
- [10]. 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*.
- [11]. Hsiung, SM. (2001). "Predicting rock burst". *Institu of technology today*, SWRI Publication.
- [12]. 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.
- [13]. C.W.W. Ng, K.M. Lee, D.K.W. Tang, 2004, "Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunneling method (NATM) twin tunnel interactions". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, pp. 523-539.
- [14]. Itasca Consulting Group, Inc., October 2012. *FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*, version 5, User's Manual.
- [15]. Sakurai, S. (1983). "Direct strain Evaluation Technique in construction of underground opening". In *proc 22 U.S. symp, Rock Mech. Boston*, pp. 278- 282.