

# بررسی پتانسیل وقوع همگرایی و انفجار سنگ و مقایسه آن با روش عددی المان محدود

عارف جابری<sup>۱\*</sup>، فواد زمانی<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ دانشگاه شهید باهنر کرمان. arefjaberi@ymail.com

۲- کارشناسی ارشد مهندسی معدن گرایش تونل و فضای زیرزمینی دانشگاه ارومیه

## چکیده

ارزیابی خطرات زمین شناسی در مورد حفريات زیرزمینی و از آن جمله تونل ها در شرایط مچاله شونده و انفجار سنگ، از جمله پارامترهای موثر در طراحی این سازه ها است. احداث سامانه تونل انتقال آب از سد آزاد به دشت دهگلان - قروه به منظور آبرسانی به دشت های دهگلان - قروه می باشد. با توجه به جنس ضعیف تا خیلی ضعیف توده سنگ مسیر تونل و ضخامت روباره و به دلیل قرار گیری مسیر تونل در زون فعال از لحاظ تکتونیکی امکان وقوع پدیده مچاله شونگی و انفجار سنگ وجود داشت. در این پژوهش ابتدا با استفاده از برداشت های زمین شناسی و مغزه های حاصل از حفاری گمانه ها، تونل به ۵ زون تقسیم بندی شد. در ادامه به بررسی مچاله شونگی و انفجار سنگ برای هر ۵ زون پرداخته شد که براساس این بررسی ها و با توجه به روش تجربی و نیمه تجربی تونل به ترتیب در محدوده بدون مچاله شونگی و مچاله شونگی شدید قرار گرفت، همچنین مسیر تونل از لحاظ انفجار سنگ پتانسیلی کمی داشت. در نهایت به منظور تحلیل جابجایی رخ داده در تونل اقدام به مقایسه بین روش هوک و مارینوس و روش کرنش بحرانی با روش عددی المان محدود با نرم افزار **phase 2** شد. براساس تحلیل های صورت گرفته مشخص شد که روش کرنش بحرانی بیشترین تطابق را با روش عددی داشت. با توجه به تطابق مناسب نتایج عددی با نتایج روش کرنش بحرانی می توان زون **S3** و **S5** را به عنوان ناپایدارترین زون ها معرفی کرد.

واژگان کلیدی: انفجار سنگ، مچاله شونگی، نرم افزار **phase2**، همگرایی، المان محدود.

## مقدمه

این تغییر شکل ها ممکن است طی حفاری تونل یا در دوره زمانی طولانی مدت، ادامه داشته باشد. معمولاً سنگ هایی با مقاومت پایین در مقابل تنش های اعمالی بالا مچاله خواهند شد. همچنین باید توجه کرد که همیشه تغییر شکل های بزرگ، نتیجه مچاله شونگی نمی باشد (جابری، ۱۳۹۶).

طبق تعریف انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM) مچاله شونگی عبارت است از برش وابسته به زمان سنگ که منجر به حرکت سنگ های درونگیر به سمت تونل می شود. این حرکت باعث همگرا شدن تونل ها شده و علاوه بر اعمال فشار زیاد بر نگهدارنده های تونل، امکان تخریب و گسیختگی آنها را در پی دارد (Einstein, 1996). از

حفر تونل در توده های سنگی باعث تغییرات تنش در سنگ های پیرامون تونل می شود و تمرکز شدید تنش در پیرامون تونل ها می تواند موجب وقوع پدیده هایی نظیر مچاله شونگی و انفجار سنگ گردد. از این رو، بررسی شرایط ژئومکانیکی و وضعیت پایداری توده سنگ های موجود در مسیر تونل مهمترین مساله ای است که دست اندرکاران اجرایی تونل با آن مواجه خواهند شد. پدیده مچاله شونگی با تغییر شکل های بزرگ و همگرایی های وابسته به زمان در طی حفاری تونل همراه است. در اثر ایجاد و ترکیب تنش های القایی، تنش موجود از حد مقاومت برشی گذشته و توده سنگ به داخل محدوده حفاری شده رانده می شود.

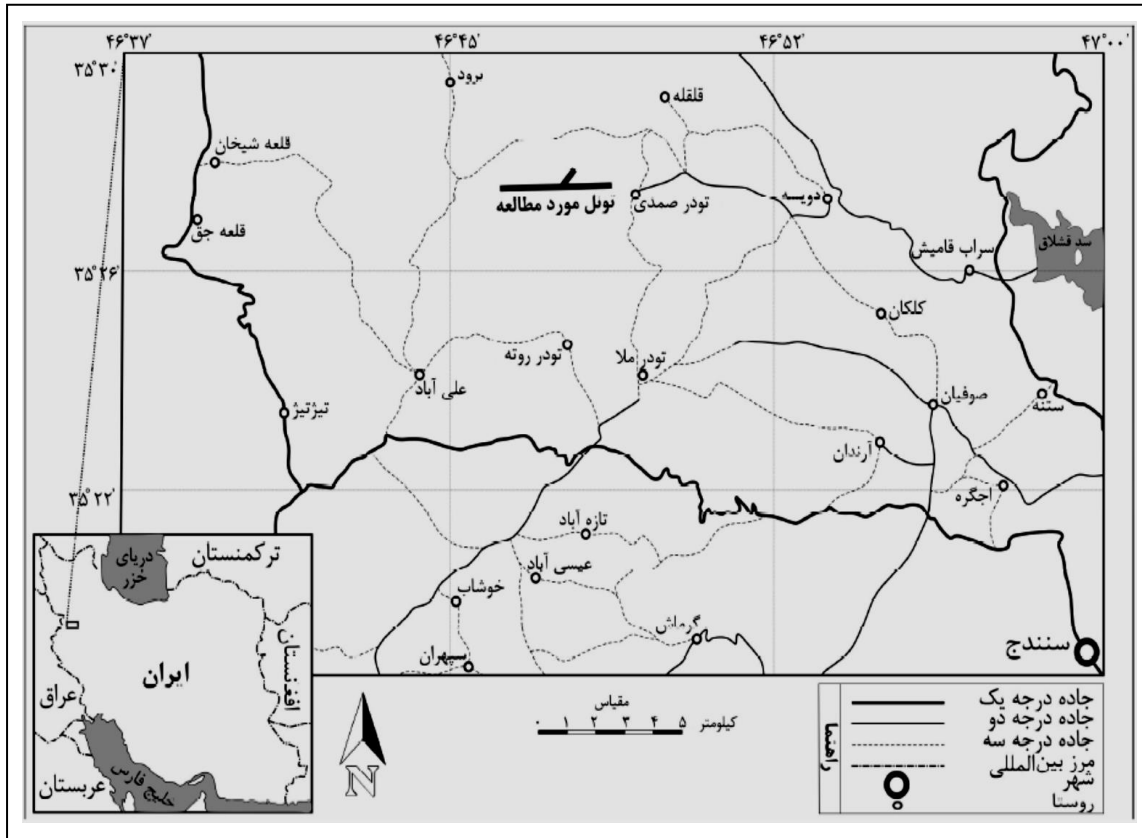
در یک ناحیه، آشکاری و ساختارهای زیرزمینی که هر یک به نحوی سبب ایجاد تمرکز تنش و یا تنوع تنش در نزدیکی حفره خواهند شد، مکانی مناسب برای ایجاد انفجار است که در صورت درست بودن طراحی احتمال انفجار کاهش می یابد. گسل ها، دایک ها و فاصله داری درزه ها علاوه بر ایجاد ضعف در سازه های زیرزمینی سبب افزایش رویداد انفجار در مجاورت خود می شوند. شکنندگی و سایر ویژگی های مرتبط با انفجار سنگ می تواند توسط پترولوژی سنگ و اندازه کریستال ها بیان شود به طوری که سنگهای آذرین و دگرگونی نسبت به سنگهای رسوبی، استعداد بیشتری برای انفجار دارند و همچنین با کاهش میزان درشتی دانه ها و حرکت از اندازه دانه درشت تا میکروکریستال سنگ استعداد بیشتری برای انفجار پیدا میکند (Sinha, 1989). در پژوهش حاضر به بررسی مخاطرات زمین شناسی از جمله مچاله شونده و انفجار سنگ پرداخته و در نهایت به کمک روش عددی المان محدود نرم افزار Phase 2 به مقایسه نتایج پرداخته و بهترین روش انتخاب شده است.

#### موقعیت جغرافیایی تونل انتقال آب آزاد

احداث سامانه انتقال آب از سد آزاد به دشت دهگلان - قروه به منظور آبرسانی به دشت های دهگلان - قروه می باشد. این سامانه از سد آزاد در غرب کشور شهرستان سنندج آغاز شده و پس از طی مسافتی در حدود ۸۰ کیلومتر به دشت های قروه و دهگلان منتهی می شود. کل مسیر شامل خطوط لوله، ایستگاه پمپاژ و تونل می باشد. مسیر قطعه اول تونل با روند تقریباً شرقی غربی در ناحیه غربی ایران قرار دارد. شکل ۱ مختصات ورودی تونل  $X=66.0261/9$  و  $Y=39.26333/8$  و مختصات خروجی تونل  $X=66.4435/8$  و  $Y=39.26988/8$  بوده. تونل مذکور با طول ۴۲۲۴/۸۸ متر در زون ساختاری سنندج - سیرجان در ۳۵ کیلومتری شهرستان سنندج در استان کردستان واقع گردیده است شکل ۲.

نظر ترزاقی سنگ های مچاله شونده به آهستگی به درون تونل حرکت می کنند، بدون آنکه حجم آن ها به طور محسوس افزایش پیدا کند (Terzaghi, 1946). بارلا معتقد است که مچاله شونده سنگ توسط جریان پلاستیک (خزش) توده سنگ هایی که در معرض تنش هستند اتفاق افتاده و در صورت تجاوز از حد تنش برشی، باعث شکست آن خواهد شد (Barla, 2002). هادسون بیان کرد که مشکلات مچاله شونده در تونل های عمیقی که در توده سنگ های ضعیف حفاری می شوند، عادی است. همچنین همگرایی های قابل توجهی در تونل های کم عمقی که در توده سنگهای ضعیف و یا در توده سنگ هایی که در شرایط بیش تنشی ( اثرات تکتونیکی یا توپوگرافی ) هستند، اتفاق می افتد (Hudson, 2010).

انفجار سنگ پدیده ای است که به صورت شکست ناگهانی سنگ و آزادسازی انرژی کرنشی ذخیره شده در یک زمان کوتاه در معادن زیرزمینی و تونل های سنگی، معمولاً در نقاط پر تنش و با عمق زیاد نسبت به سطح زمین مشاهده می شود که بر اثر شکست انفجاری، سنگ به صورت قطعات کوچک و بزرگ به اطراف پراکنده شده که علاوه بر آسیب رسانی به افراد و تجهیزات، باعث ریزش و ناپایداری فضای زیرزمینی نیز می شود (جابری، ۱۳۹۷). تاکنون تحقیقات گسترده ای از سال ۱۹۹۶ تا سال ۲۰۱۲ برای تحلیل و طبقه بندی و پیش بینی شدت وقوع انفجار سنگ انجام شده است. عوامل متعددی در پدیده انفجار سنگ موثر هستند که از جمله این عوامل می توان به انرژی کرنشی، نحوه طراحی حفاری های زیرزمینی، وضعیت زمین شناسی و خصوصیات فیزیکی اشاره کرد سنگ قبل از شکستن می تواند مقدار زیادی از انرژی کرنشی را ذخیره کند، هر چه میزان این انرژی بیشتر باشد احتمال انفجار سنگ بیشتر خواهد بود. بنابراین مقدار انرژی کرنشی ذخیره شده در سنگ که مبین شدت وقوع انفجار است (Kwasniewski et al., 1994). طراحی نامناسب و نادرست، به افزایش احتمال انفجار در حفاری های زیرزمینی کمک خواهد کرد. حفر همزمان چند تونل



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی تونل انتقال آب دشت دهگلان- قروه (Abanpajuh COSULTING ENGINEERS, 2011)

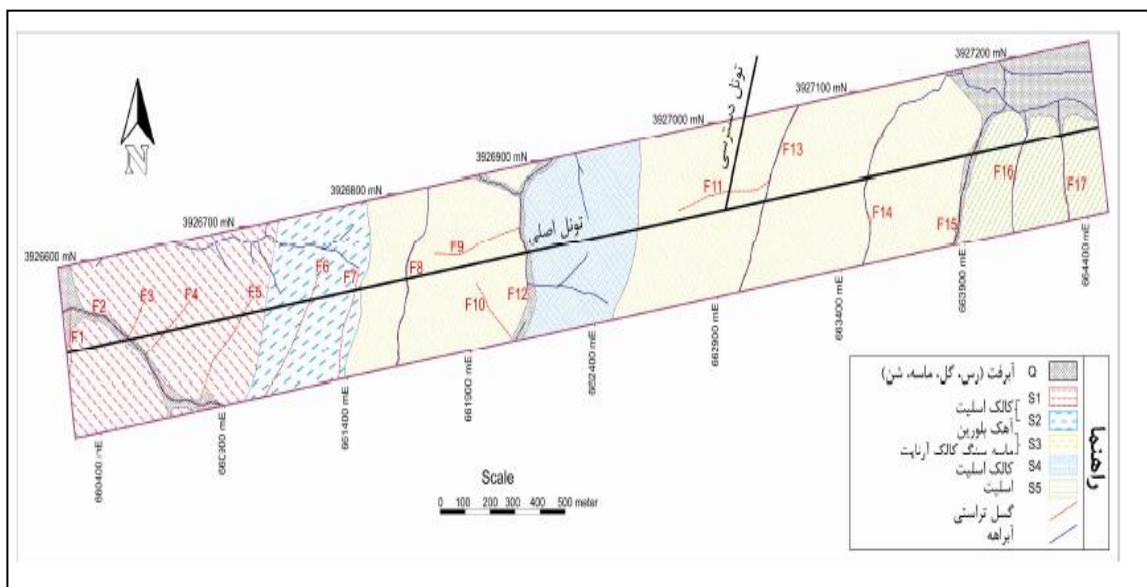


شکل ۲- نمایی از تصویر ماهواره ای مسیر تونل (Abanpajuh COSULTING ENGINEERS, 2011)

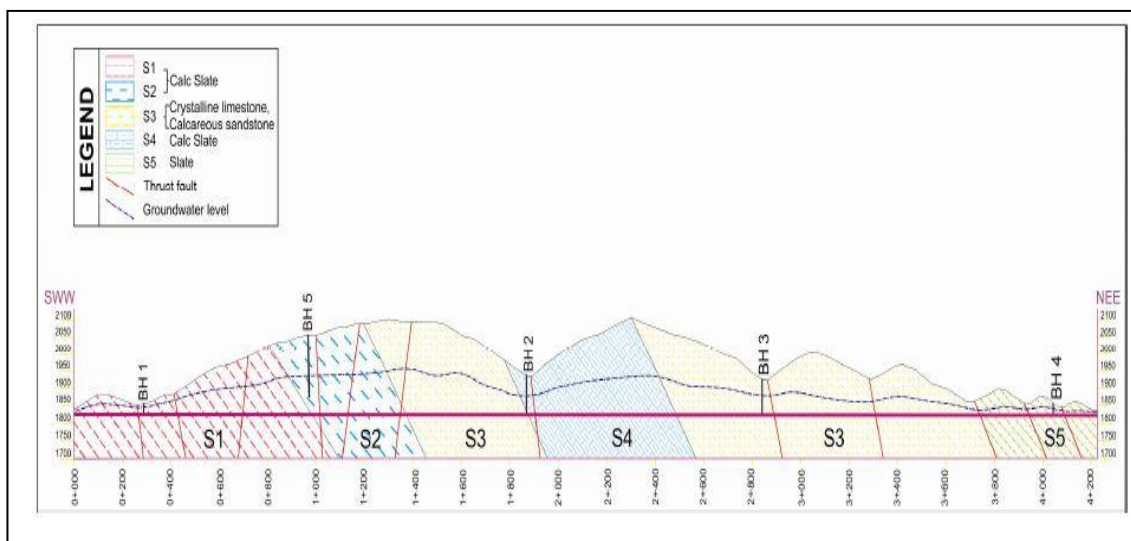
### زمین شناسی مسیر تونل

منطقه مورد مطالعه به لحاظ تقسیمات در زون سنندج - سیرجان قرار می گیرد. زون سنندج-سیرجان یا اسفندقه-مریوان جزیبی از ایران مرکزی به شمار می رود و به صورت نوار باریک و کشیده ای به موازات راندگی زاگرس از ارومیه و سنندج در شمال غربی ایران تا سیرجان و اسفندقه در جنوب شرقی امتداد می یابد. سنگ های محدوده تونل از جنس شیل های آهکی و رسی و مادستون های آهکی به رنگ خاکستری و سکانس متوالی و کالک و آرنایت نازک لایه می باشد شکل ۳. براساس مطالعات زمین شناسی مهندسی محدوده در برگرنده

تونل به ۵ قسمت تقسیم بندی شده است. در بررسی توده سنگ مسیر تونل از مغزه های حاصل از حفاری گمانه های BH1, BH2, BH3, BH4 و BH5 با عمق های ۳۰، ۱۳۵، ۱۲۵، ۳۵، ۱۵۰ متر استفاده شده است شکل ۴ مقطع زمین شناسی و زون های ساختاری تونل انتقال آب آزاد را نشان می دهد. خصوصیات ژئوتکنیکی توده سنگ های مسیر تونل در جدول ۱ آورده شده است. شاخص کیفیت تونل زنی Q با درجه پایداری توده سنگ مسیر تونل و شاخص امتیاز دهی توده سنگ RMR مسیر تونل نیز در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۳- نقشه زمین شناسی مسیر تونل انتقال آب دشت دهگلان - قروه (Abanpajuh COSULTING ENGINEERS, 2011)



شکل ۴- مقطع زمین شناسی و زون های ساختاری تونل انتقال آب آزاد (Abanpajuh COSULTING ENGINEERS, 2011)

جدول ۱- خصوصیات ژئوتکنیکی توده سنگ مسیر تونل (Abanpajuh COSULTING ENGINEERS, 2011)

زون	کیلومتر تونل (m)	لیتولوژی	روباره (m)	مدول تغییر شکل پذیری (MPa)	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)
S1	۰-۱۰۲۲	کالک شیست	۲۴۰/۵	۲۳۸۷/۸۱	۰/۸۵۸
S2	۱۰۲۲-۱۳۹۶	کالک شیست با میان لایه های آهکی	۲۹۵/۵	۳۶۸۰/۷۹	۱/۳۶۱
S3	۱۳۹۶-۱۸۹۸	کالک شیست	۳۰۵/۵	۲۳۸۷/۸۱	۰/۸۵۸
S4	۱۸۹۸-۲۵۰۸	کالک شیست با میان لایه های آهکی	۳۱۵	۴۶۰۰/۹۹	۱/۷۰۱
S3	۲۵۰۸-۳۷۶۵	کالک شیست	۲۲۵/۵	۲۳۸۷/۸۱	۰/۸۵۸
S5	۳۷۶۵-۴۲۲۵	کالک شیست با خرد شدگی و شکستگی بالا	۱۰۵/۵	۵۸۳/۵۹	۰/۱۷۹

جدول ۲- مقادیر سیستم طبقه بندی توده سنگ مسیر تونل (Abanpajuh COSULTING ENGINEERS, 2011)

زون	شاخص کیفیت تونل زنی	شاخص امتیاز دهی توده سنگ	رده سنگ
S1	۱/۲۹	۴۸-۶۱	ضعیف
S2	۲/۰۷	۵۵-۶۴	ضعیف
S3	۱/۰۲	۴۸-۶۱	ضعیف
S4	۲/۳۷	۴۵-۵۴	ضعیف
S5	۰/۱	۴۰-۳۲	خیلی ضعیف

### ارزیابی پتانسیل مچاله شونده

به منظور تعیین شرایط لهیدگی و پتانسیل بروز این پدیده روش های تجربی، نیمه تجربی و تحلیلی مختلفی توسط محققین ارائه شده است. روش های تجربی بر سیستم های طبقه بندی سنگ استوارند ولی در روش های نیمه تجربی شاخص هایی جهت ارزیابی پتانسیل لهیدگی ارائه می شود. در ادامه به معرفی این روش ها پرداخته می شود. جهت ارزیابی استعداد مچاله شونده در سنگ ها، روش های متداول شامل روش های تجربی، نیمه تجربی، تئوری- تحلیلی و روش کرنش بحرانی وجود دارد. روش های تجربی بر اساس دو پارامتر طبقه بندی توده سنگ Q و عمق تونل H استوار است. در روش های نیمه تجربی استعداد مچاله شونده با استفاده از تغییر شکل های قابل انتظار در اطراف تونل، در یک میدان تنش هیدرواستاتیک پیش بینی می شود.

روشهای تئوری-تحلیلی در بردارنده کلیه روش های مبتنی بر راه حل های بسته و روش های عددی می باشند. روش کرنش بحرانی با در نظر گرفتن حد آستانه ی کرنش اتفاق افتاده که در محیط تونل می تواند ناپایداری تونل و حتی بروز مشکلاتی برای سیستم نگهداری را در پی داشته باشد به ارزیابی همگرایی اتفاق افتاده در تونل می پردازد. اگر این همگرایی اتفاق افتاده بیشتر از حد آستانه مذکور باشد می توان گفت که پدیده مچاله شونده محتمل است.

### روش تجربی

سین و همکاران با توجه به روبره H و شاخص کیفیت تونل زنی Q مچاله شونده را به صورت جدول ۳ ارائه کردند (Singh et al, 2007).

### روش گوئل و همکاران

شعاعی جداره  $\varepsilon_t$  تونل طبق رابطه ۳ بدست می آید. شدت پتانسیل مچاله شونده نیز با استفاده از جدول ۵ و یا نمودار شکل ۶ تخمین زده می شود (Hoek, 2000).

$$\varepsilon_t = 0.2 \left( \frac{\sigma_{cm}}{P_0} \right)^{-2} \quad (3)$$

### روش آیدان

در این روش، با توجه به مقاومت فشاری سنگ بکر  $\sigma_{ci}$  حداکثر تنش مماسی دیواره تونل  $\sigma_\theta$ ، مقاومت فشاری تک محوری سنگ  $\sigma_{cm}$  و مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ  $E_m$  با استفاده از رابطه ۴ و جدول ۶ پتانسیل مچاله شونده ارزیابی می شود (Aydan et al, 1993)

$$n_f = 5\sigma_{ci}^{-0.32} \quad n_s = 3\sigma_{ci}^{-0.25} \quad n_p = 3\sigma_{ci}^{-0.17} \quad (4)$$

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

### روش های تحلیلی-تئوریک

#### روش انجمن بین المللی مکانیک سنگ ISRM

پتانسیل مچاله شونده در این دو روش با توجه به مقادیر تنش مماسی  $\sigma_\theta$  و مقاومت فشاری تک محوری سنگ  $\sigma_{cm}$  به صورت جدول ۷ پیش بینی می شود.

گوئل و همکاران مچاله شونده را به صورت رابطه ۱ بیان نمودند (Goel et al, 1997).

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

در این رابطه Q شاخص کیفیت سنگ، SRF ضریب کاهش تنش توده سنگ می باشند. براساس شکل ۵ و در نظر گرفتن ضخامت روباره H و عرض تونل B، پتانسیل مچاله شونده تعیین می گردد.

### روش های نیمه تجربی

#### روش جتوا و همکاران

جتوا و همکاران درجه مچاله شونده را طبق رابطه ۲ و براساس جدول ۴ ارائه دادند (Jethwa et al, 1984)

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

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

#### روش هوک و مارینوس

در روش هوک و مارینوس از نسبت مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ به تنش برجا  $\left( \frac{\sigma_{cm}}{P_0} \right)$ ، میزان کرنش

جدول ۳- پتانسیل مچاله شونده بر مبنای معیار سین (Singh et al, 2007).

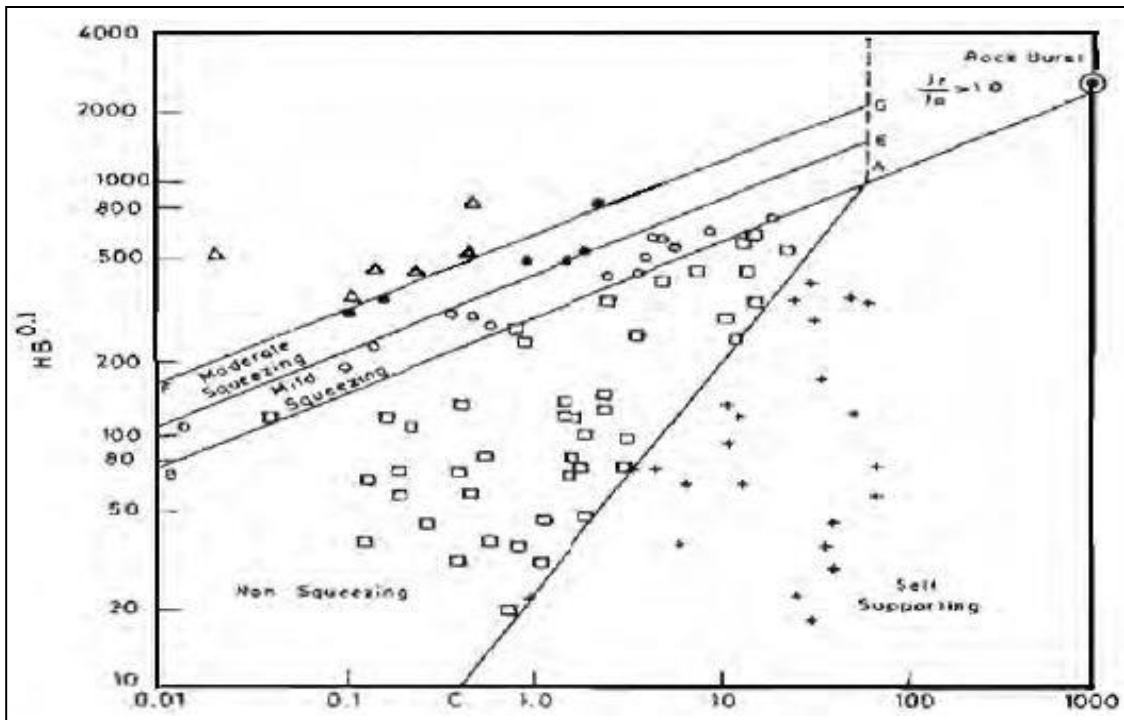
H	$> 350Q^{1/3}$	$< 350Q^{1/3}$
شرایط مچاله شونده	مچاله شونده	غیر مچاله شونده

جدول ۴- پتانسیل مچاله شونده بر مبنای روش جتوا (Jethwa et al, 1984)

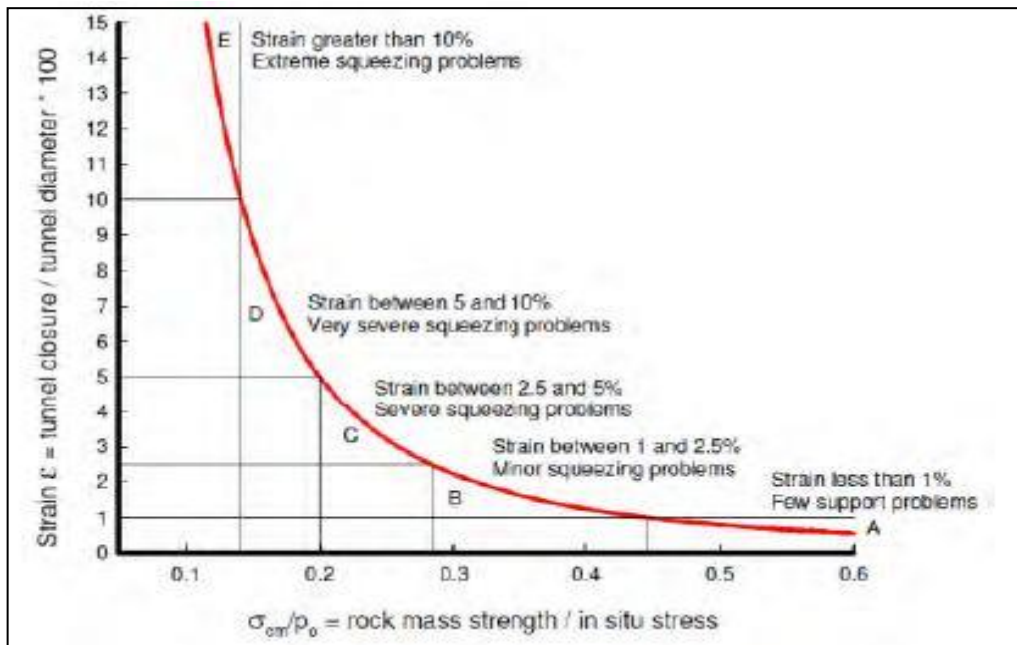
N	$> 2$	۰/۸-۲	۰/۴-۰/۸	$< 0/4$
پتانسیل مچاله شونده	غیر مچاله شونده	کم	متوسط	شدید

جدول ۵- پتانسیل مچاله شونده بر مبنای روش هوک و مارینوس (Hoek E, & Marinos, 2000)

$\varepsilon_t$	$< 1$	۱-۲/۵	۲/۵-۵	۵-۱۰	$> 10$
شدت مچاله شونده	بدون مچاله شونده	کم	زیاد	خیلی زیاد	شدید



شکل ۵- معیار گوئل و همکاران 1997، Goel et al



شکل ۶- نمودار هوک و مارینوس برای تعیین شدت مچاله شونده Hoek E, & Marinos, 2000

جدول ۶- پتانسیل مچاله شونده بر مبنای روش آیدان 1993، Aydan et al

$\frac{\epsilon_{\theta}^a}{\epsilon_{\theta}^e} > n_f$	$n_p < \frac{\epsilon_{\theta}^a}{\epsilon_{\theta}^e} < n_f$	$n_p < \frac{\epsilon_{\theta}^a}{\epsilon_{\theta}^e} < n_s$	$1 < \frac{\epsilon_{\theta}^a}{\epsilon_{\theta}^e} < n_p$	$\frac{\epsilon_{\theta}^a}{\epsilon_{\theta}^e} < 1$	$\frac{\epsilon_{\theta}^a}{\epsilon_{\theta}^e}$
خیلی شدید	شدید	متوسط	ضعیف	بدون مچاله شونده	شدت مچاله شونده

جدول ۷- پتانسیل مچاله شونده بر مبنای روش ISRM

> 4	2-4	1-2	< 1	$(\sigma_{\theta} / \sigma_{cm})$
شدید	متوسط	ضعیف	بدون مچاله شونده	شدت مچاله شونده

## روش کرنش بحرانی

## روش سین و همکاران

سینگ و همکاران بر اساس پارامترهای سنگ بکر رابطه ۵ را به صورت تقریبی جهت تعیین کرنش بحرانی ارائه دادند (Singh et al, 1997)

$$\varepsilon_{Cr} = 31.1 \frac{\sigma_{ci}^{1.6}}{E_i \gamma^{0.6} Q^{0.2}} \quad (5)$$

## روش بارتن

رابطه ۶ توسط بارتن مشابه رابطه سین با در نظر گرفتن پارامترهای سنگ بکر و کیفیت توده سنگ کرنش بحرانی جداره تونل را تخمین میزند (Barton 2002).

$$\varepsilon_{Cr} = 5.84 \frac{\sigma_{ci}^{0.88}}{E_i^{0.63} Q^{0.12}} \quad (6)$$

در روابط ۵ و ۶،  $\varepsilon_{Cr}$  کرنش بحرانی،  $\sigma_{ci}$  مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر (Mpa)،  $E_i$  مدول تغییر شکل پذیری سنگ بکر (Mpa)، جرم مخصوص توده سنگ  $gr/cm^3$  می باشد.

## بررسی شدت مچاله شونددگی

نتایج حاصل از بررسی مچاله شونددگی در تونل مورد مطالعه با استفاده از معیارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۸ و ۹ و میزان کرنش های بدست آمده از روش هوک و مارینوس، سین و بارتن برای محدوده مورد مطالعه در جدول ۱۰ آورده شده است. برای ارزیابی نتایج، درصدی از محدوده های مطالعه شده که در هر رده از مچاله شونددگی قرار دارند، محاسبه شده و در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به شکل ۷، معیارهای تجربی ۱۰۰ درصد محدوده تونل را در رده بدون مچاله شونددگی قرار داده است. معیار نیمه تجربی جتوا، هوک و مارینوس و آیدان به ترتیب ۱۰۰، ۶۶ و ۵۰ درصد از محدوده تونل را در رده مچاله شونددگی شدید برآورد کرده است. روش هوک و مارینوس ۳۴ درصد از محدود تونل مورد نظر را در رده مچاله شونددگی زیاد تا خیلی زیاد برآورد کرده است.

جدول ۸ - نتایج بررسی شدت مچاله شونددگی براساس روش های تجربی

زون	سین و همکاران	گوئل و همکاران
S1	بدون مچاله شونددگی	بدون مچاله شونددگی
S2	بدون مچاله شونددگی	بدون مچاله شونددگی
S3	بدون مچاله شونددگی	بدون مچاله شونددگی
S4	بدون مچاله شونددگی	بدون مچاله شونددگی
S3	بدون مچاله شونددگی	بدون مچاله شونددگی
S5	بدون مچاله شونددگی	بدون مچاله شونددگی

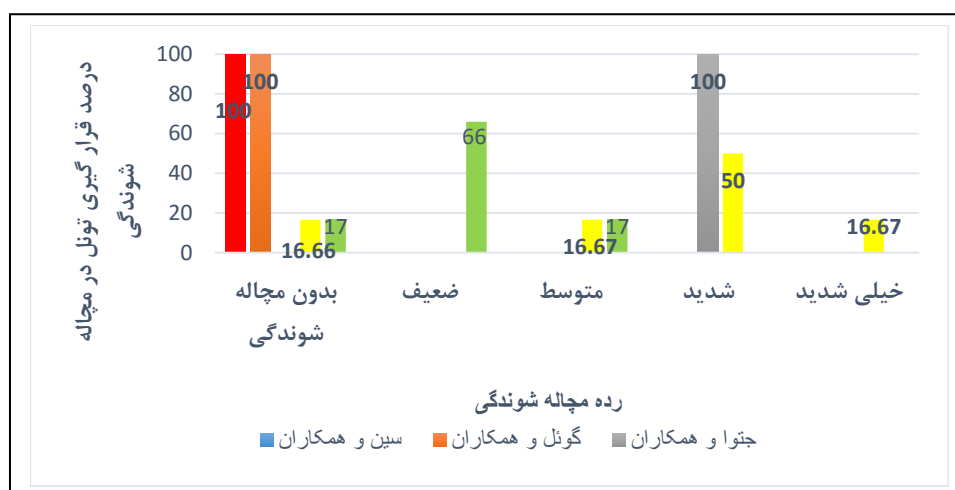
جدول ۹ - نتایج بررسی شدت مچاله شونددگی براساس روش های نیمه تجربی

زون	جتوا و همکاران	هوک و مارینوس	آیدان	ISRM
S1	شدید	شدید	شدید	ضعیف
S2	شدید	خیلی زیاد	متوسط	ضعیف
S3	شدید	شدید	شدید	ضعیف
S4	شدید	زیاد	بدون مچاله شونددگی	بدون مچاله شونددگی
S3	شدید	شدید	شدید	ضعیف
S5	شدید	شدید	خیلی شدید	متوسط



جدول ۱۰- میزان کرنش بدست آمده به روش های مختلف

زون	روش هوک و مارینوس	روش کرنش بحرانی بارتن	سین
S1	۰/۱۳	۰/۳۵	۰/۳۱
S2	۰/۱۷	۰/۲۷	۰/۲۴
S3	۰/۱	۰/۳۶	۰/۳۳
S4	۰/۲	۰/۲۳	۰/۲۱
S3	۰/۱۴	۰/۲۵	۰/۲۲
S5	۰/۰۶	۰/۳۱۴	۰/۳۱۲



شکل ۷- درصد قرار گیری تونل در هر رده از مچاله شوندگی

ارزیابی پتانسیل انفجار (et al., 1994). از روش های دیگر می توان به معیار تنش مماسی اشاره کرد این معیار از نسبت تنش مماسی به مقاومت فشاری تک محوری حاصل می شود (Wang and park, 2001). معیار تردی دیگر روشی است که برای ارزیابی پتانسیل انفجار به کار می رود این معیار از نسبت مقاومت فشاری تک محوره به مقاومت کششی بدست می آید (Hsiung, 2001). در جدول ۱۱ و ۱۲ به اختصار به طبقه بندی روش های ذکر شده پرداخته شده است.

ارزیابی پتانسیل انفجار پدیده انفجار سنگ در حین استخراج مواد معدنی در مناطق عمیق و عموماً در سنگ های مقاوم و در نقاط پرتنش رخ می دهد. این پدیده با آزاد شدن ناگهانی انرژی کرنشی ذخیره شده در سنگ در یک زمان کوتاه همراه است و علاوه بر آسیب رسانی به افراد و تجهیزات، باعث ریزش و ناپایداری فضای زیرزمینی می شود. این پدیده بیش تر توسط کوازنیوسکی و همکاران با عنوان معیار انرژی الاستیک خطی بررسی شده است (kwasniewski

جدول ۱۱- معیارهای مختلف بررسی انفجار سنگ

توضیحات	رابطه	معیار ارزیابی
$\sigma_c$ مقاومت فشاری E مدول الاستیسیته	$PES = \frac{\sigma_c^2}{2E}$	معیار انرژی الاستیک خطی
نسبت تنش مماسی به مقاومت فشاری تک محوره	$T_s = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_c}$	معیار تنش مماسی
نسبت مقاومت فشاری تک محوره به تنش کششی	$B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}$	معیار تردی

جدول ۱۲- طبقه بندی پدیده انفجار سنگ

PES	<۵۰	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۱۵۰	۱۵۰-۲۰۰	>۲۰۰
شدت انفجار	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
$T_s$	$\leq 3$	۰/۳-۰/۵	۰/۵-۰/۷	۰/۷-۰/۹	>۰/۹
شدت انفجار	بدون انفجار	ضعیف	متوسط	شدید	بسیار شدید
$B$	>۴۰	۲۶/۷-۴۰	۱۴/۵-۲۶/۷	۱۴/۵	
شدت انفجار	بدون انفجار	ضعیف	متوسط	شدید	

## بررسی پتانسیل انفجار سنگ در تونل

نتایج بررسی پتانسیل وقوع انفجار برای ۵ زون تونل انتقال آب سد آزاد در جدول ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود ۱۰۰ درصد محدوده تونل در روش انرژی الاستیک و تنش مماسی به ترتیب در رده انفجار خیلی کم و بدون انفجار می باشد و در روش تردی ۶۶ درصد محدوده تونل در رده انفجار ضعیف و ۳۴ درصد در رده انفجار متوسط می باشد.

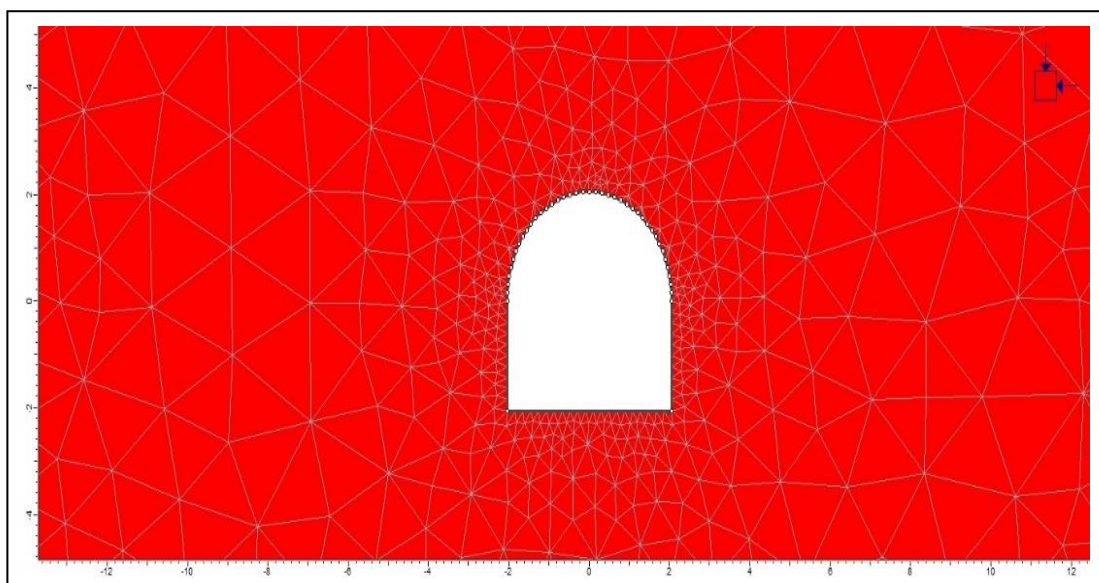
## مدل سازی عددی

امروزه روش های عددی جزء فراگیرترین و پرکاربردترین روش ها در ژئوتکنیک می باشند که با استفاده از این روش ها می توان جزئیات تنش و تغییر شکل را در نقاط مختلف یک مدل تعیین کرد. جزئیات تنش و تغییر شکل به عوامل متعدد از جمله هندسه تونل، ابعاد، شرایط توده اعم از خاک و سنگ، عمق تونل و... وابسته است، که این موضوع را بسیار پیچیده و مستلزم بررسی های مختلف اعم از مطالعات میدانی، اندازه گیری تنش ها در زمین، استفاده از روش های تجربی و غیره می سازد. در روش های عددی از پارامترهای نام برده شده در بالا استفاده می شود.

از جمله روش های عددی که در این مبحث بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند، تفاضل محدود با نرم افزار FLAC و روش عددی المان محدود با نرم افزار phase 2 می باشد. Phase 2 برنامه المان محدودی است که برای کاربردهای ژئوتکنیک گسترش یافته است. در این تحقیق برای پیشبینی جابجایی محیط تونل به روش عددی از نرم افزار phase 2 استفاده شده است. برای انتخاب مدل رفتاری زمین برای تحلیل زون های مختلف تونل از مدل هوک- براون استفاده شده است. مدل کردن شرایط گسیختگی برای محیط های سنگی از توانایی این مدل رفتاری می باشد. مد گسیختگی در این معیار غیرخطی بوده و بر پایه رابطه بین تنش های اصلی حداقل و حداکثر در محیط سنگی تعریف می شود. در شکل ۸، مدل ساخته شده در نرم افزار نشان داده شده است. تونل مورد نظر به شکل نعل اسبی با ارتفاع و عرض کف ۲/۰۵ و ۴/۱۰ متر و شعاع قوس ۲/۰۵ می باشد متغیرهای به کار رفته در مدلسازی عددی برای هر زون در جدول ۱۴ ذکر شده است (Abanpajuh COSULTING ENGINEERS, 2011).

جدول ۱۳- نتایج بررسی شدت انفجار سنگ

زون	انرژی الاستیک	تردی	تنش مماسی
S1	خیلی کم	ضعیف	بدون انفجار
S2	خیلی کم	ضعیف	بدون انفجار
S3	خیلی کم	متوسط	بدون انفجار
S4	خیلی کم	ضعیف	بدون انفجار
S3	خیلی کم	متوسط	بدون انفجار
S5	خیلی کم	ضعیف	بدون انفجار



شکل ۸- مدل ساخته شده در نرم افزار phase2

جدول ۱۴- متغیرهای به کار رفته در مدلسازی (Abanpajuh COSULTING ENGINEERS, 2011)

m	S	وزن مخصوص	زون
۱/۲۹۴	۰/۵۰۶	۲۷۰۰	S1
۱/۶۴۲	۰/۰۰۲۵	۲۷۰۰	S2
۱/۲۰۲	۰/۰۰۱۳	۲۷۰۰	S3
۱/۶۴۲	۰/۵۰۴	۲۷۰۰	S4
۰/۰۰۱۳	۱/۲۰۲	۲۷۰۰	S3
۰/۶۱۸	۰/۰۰۰۲	۲۷۰۰	S5

#### مقایسه روش عددی با روش هوک

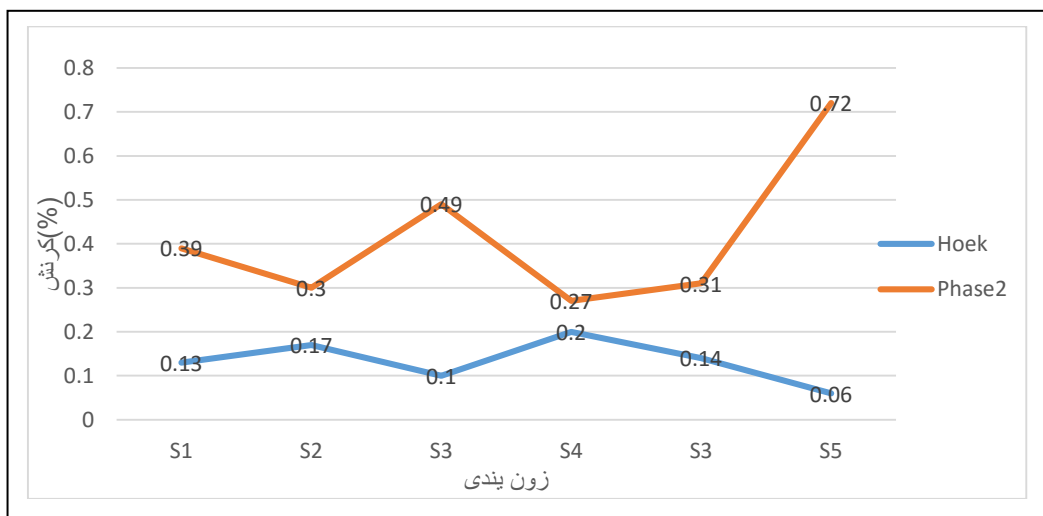
شکل ۹ بررسی روند تغییرات کرنش در روش عددی و روش هوک را نشان می دهد، همان طور که مشاهده می شود، جابجایی در روش نیمه تجربی به مراتب کمتر از روش عددی می باشد. شکل ۱۰ نیز مقایسه تغییرات کرنش در روش عددی و کرنش بحرانی را نشان می دهد. براساس شکل ۱۰ روش عددی و روش کرنش بحرانی همخوانی مناسب تری نسبت به روش نیمه تجربی دارد علاوه بر این می توان از روش مذکور به عنوان بهینه ترین روش برای کمک به طراحان استفاده کرد و دید بهتری نسبت به جابجایی های محیط تونل در اختیار آنها قرار ده

#### کرنش های بدست آمده از هر روش

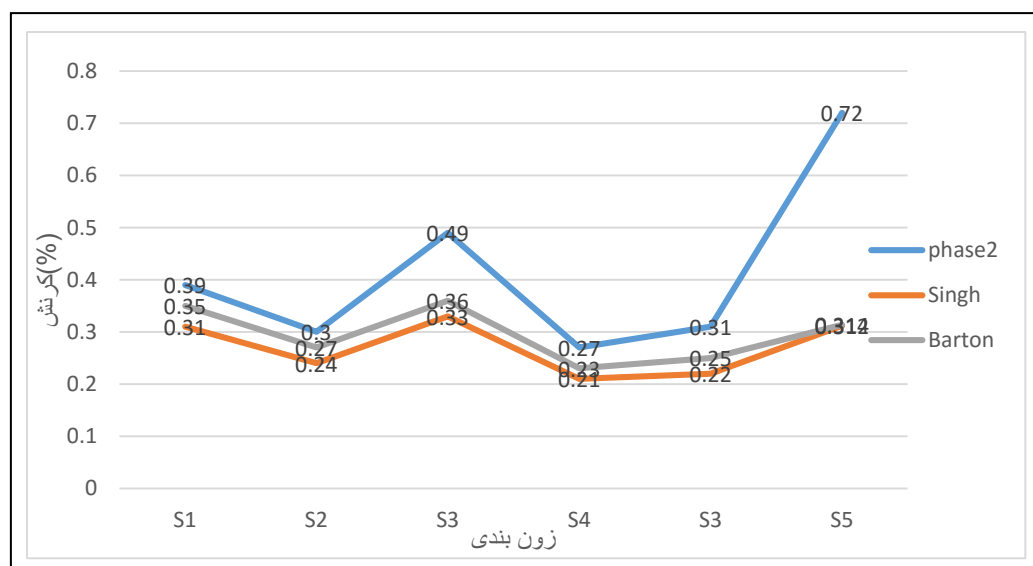
محدودیت هایی در روش هوک و مارینوس و روش کرنش بحرانی سین و بارتن وجود دارد، بدین منظور با استفاده از مقایسه بین روش های ذکر شده با روش عددی می توان، مناسب ترین روش یا روش ها را جهت اندازه گیری کرنش به وجود آمده معرفی نمود و سپس به بهترین پیش بینی از شرایطی نظیر مچاله شوندگی دست پیدا کرد. در جدول ۱۵ میزان کرنش های بدست آمده از روش هوک و مارینوس، سین و بارتن و روش عددی برای محدوده مورد مطالعه تونل انتقال اب سد آزاد آورده شده است.

جدول ۱۵- کرنش های محاسبه شده در هر روش

روش کرنش بحرانی		روش هوک و مارینوس	روش عددی	زون
روش سین	روش بارتن			
۰/۳۱	۰/۳۵	۰/۱۳	۰/۳۹	S1
۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۱۷	۰/۳	S2
۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۱	۰/۴۹	S3
۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۲	۰/۲۷	S4
۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۱۴	۰/۳۱	S3
۰/۳۱۲	۰/۳۱۴	۰/۰۶	۰/۷۲	S5



شکل ۹- مقایسه روش عددی و روش هوک و مارینوس



شکل ۱۰- مقایسه روش عددی و روش های کرنش بحرانی

## نتیجه گیری

پژوهش های کاربردی در مهندسی عمران (مهندسی سازه و مدیریت ساخت) تهران، دانشگاه صنعتی شریف. ۲۳ص.  
-جابری، ع.، رشیدی خبیر، رضا، (۱۳۹۷)، " بررسی تاثیر مخاطرات زمین شناسی بر گام پیشروی مجاز تونل"، نشریه علمی پژوهش های کاربردی در علوم زمین. ۲۹ص.

**-Einstein. H., (1996)**, Tunneling in difficult ground swelling behavior and identification of swelling rock, *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29, p:113 - 124.

**-Terzaghi. K., (1946)**, Rock tunneling with steel supports, *The Commercial Shearing and Stamping Co, Youngstown, Ohio, Chapter Rock defects and loads in tunnel supports*, p:17-99.

**Barla. G., (2002)**, Tunnelling under squeezing rock conditions, In: Kolymbas, D. (Ed.), *Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling*, p: 169-268.

**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: p: 61.

**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*.

**Sinha.R.S. editor, (1989)**, *Underground structure design ad instrumentation*, Elsevier Science Publishig Company Inc, P: 263-275.

**-Abanpajh COSULTING ENGINEERS ; (2011)**, The final report of water transference tunnel from Azad Dam to Plain Dehgolan-Ghorveh

**-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, p: 343-350.

**-Goel. RK., Jetwa. JL., Dube. AK., (1997)**, Support Pressure Assessment in Arched Underground Opening through Poor Rock Masses, *Journal of Engineering Geology*, Vol. 48, p: 59-81.

**-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, p: 231-238.

**-Aydan, Ö., Akagi. T., Kawamoto. T., (1993)**, The squeezing potential of rock around tunnels:

در پژوهش حاضر ابتدا به بررسی مخاطرات زمین شناسی از جمله پتانسیل مچاله شوندگی و پتانسیل انفجار سنگ پرداخته شد. با توجه به جنس ضعیف تا خیلی ضعیف توده سنگ مسیر تونل و ضخامت روباره امکان وقوع شدید پدیده مچاله شوندگی به روش نیمه تجربی پیش بینی می شود. اما در روش تجربی این امکان وجود ندارد با توجه به این که در روش نیمه تجربی علاوه بر ضخامت روباره، مقاومت توده های سنگی و کرنش جداره تونل در نظر گرفته می شود، روش نیمه تجربی از دقت بالاتری برخوردار بوده، بنابراین پتانسیل وقوع مچاله شوندگی برای مسیر تونل انتقال آب آزاد به دشت دهگلان- قروه وجود دارد. در ادامه و با توجه به اینکه مسیر تونل در زون فعالی از لحاظ تکنیکی قرار دارد به بررسی پدیده انفجار پرداخته و براساس معیار انرژی کرنشی انفجار کم و با توجه به معیار تنش مماسی تونل در رده بدون انفجار و براساس معیار تردی تونل در رده انفجار ضعیف تا متوسط قرار دارد، بنابراین احتمال وقوع انفجار سنگ در زون های بررسی شده پایین می باشد. علیرغم پایین بودن خطر انفجار تمهیدات لازم و به موقع بهتر است انجام شود چراکه پیش بینی دقیق زمان انفجار حتی با قابلیت وقوع پایین امکان پذیر نمی باشد. در نهایت به منظور انتخاب مناسب ترین روش برای پیش بینی مچاله شوندگی از نرم افزار phase 2 کمک گرفته و اقدام به مقایسه روش عددی با روش نیمه تجربی و روش های کرنش بحرانی کرده که براساس این مقایسه مناسب ترین و بهینه ترین روش برای محاسبه جابجایی های محیط تونل روش کرنش بحرانی می باشد. با توجه به تطابق مناسب نتایج عددی با نتایج روش کرنش بحرانی می توان زون S3 و S5 را با بیشترین جابجایی نسبت به سایر زون ها به عنوان ناپایدارترین زون ها معرفی کرد.

## منابع

-جابری، ع.، زمانی، ف.، حاجی حسینی م.، (۱۳۹۶)، " بررسی پدیده مچاله شوندگی و تاثیر سیستم نگهداری در کاهش زون پلاستیک تونل گلاب"، دومین کنفرانس ملی

theory and prediction, Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 26 (4),p: 137-163.

**-Hoek. E., Marinos. P., (2000)**, Predicting tunnel squeezing problems in weak Heterogeneous rock masses, Tunnels and Tunneling International, p: 45-51: part one,p: 33-36: part two.

**-Singh. B., Viladkar. MN., Samadhiya. NK., Mehrota. VK., (1997)**, Rock mass strength parameters mobilized in tunnels, Tunn Undergr Space Technol 12(1), p:147-154

**-Barton. N., (2002)**, Some new Q-value correlations to assist in sitecharacterization and tunnel design. Int J Rock Mech Min Sci 39(2),p:185-216

**-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, p:49-57.

**-Hsiung. SM., (2001)**,Predicting rock burst, Institu of technology today, SWRI Publication.

## Investigating the potential of convergence and rock explosion and comparing via the Finite Element numerical Method

Aref Jaber<sup>1\*</sup>, Foad Zamani<sup>2</sup>

1- M.Sc. in Rock mechanics; Faculty of Engineering; Department of Mining; Shahid Bahonar University of Kerman

2-M.Sc. in Tunneling & Underground Space; Faculty of Engineering; Department of Mining; urmia University

### Abstract

One of the efficacious parameters in sketching elements is evaluating the geology dangers of underground excavations including squeezing and rock explosions in tunnels. The water transmission system was constructed from Azad Dam to Dehghan-ghorveh plain in order to supply water to Dehghan - ghorveh plains. The squeezing and rock explosion phenomena were predicted considering the weakness of rock mass of the tunnel track, the overburden thickness and its settlement in the active zone. In the present research, the tunnel was initially divided into 5 zones by using the results of geological and borehole drillings. The squeezing and rock explosion in these 5 zones will be discussed later. The tunnel was situated in non squeezing and extreme squeezing zone. Regarding the previous investigations and also the empirical and semi empirical methods. The tunnel had low potentiality in the view of rock explosion. Finally, the Hook and Marinos and critical strain methods were compared via the Finite Element numerical Method using phase2 software. In order to investigate the occurred replacement in the tunnel. Based on the previous analysis, it was realized that the critical strain method had the most similarities with the numerical method. As for as the results of numerical and critical strain methods are matched, S3 and S5 zone can be the most unstable zones.

**Keywords:** rock explosions, squeezing, phase2 software, convergence, Finite Element.