



### مقایسه و بررسی پتانسیل لهیدگی در مسیر تونل انتقال آب گلاب با استفاده از روابط تجربی و تحلیل عددی

محمد ناظمی<sup>۱</sup> - ابراهیم فتحی سلمی<sup>۲</sup> - عباس بیات سرمدی<sup>۲</sup>

#### چکیده

مجاله شونددگی یکی از پدیده‌های مهم و مورد توجه بخصوص در حفاری تونل‌های عمیق و یا تحت فشار می‌باشد. این پدیده می‌تواند هزینه‌های چیران ناپذیری را به یک پروژه تحمیل کند. از این رو ضروری است تا قبل از حفر تونل احتمال وقوع این پدیده بررسی و در صورت لزوم آمادگی لازم ایجاد شود. رفتار لهیدگی مرتبط با خواص تغییرشکل پذیری و مقاومتی توده‌سنگ ضعیف است. می‌توان گفت لهیدگی سنگ مرتبط با تغییرشکل‌های بزرگ مقیاس وابسته به زمان می‌باشد که بر خواص خزشی ایجاد شده بوسیله تنش‌های برشی مرتبط می‌شود.

در مقاله حاضر احتمال وقوع پدیده مجاله‌شونددگی در تونل انتقال آب گلاب با استفاده از روابط تجربی، تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC3D انجام گرفته است. مدل رفتاری موهر-کلمب برای توده سنگ در بر گیرنده تونل لحاظ گردیده تا اجازه گسیختگی پلاستیک به توده سنگ داده شود. بررسی انجام شده نشان می‌دهد که روش عددی تفاضل محدود و نیز روابط تجربی موجود در مقایسه با روش‌های تحلیلی، پیش‌بینی مناسب‌تری از شرایط واقعی را ارائه می‌دهند.

**واژه‌های کلیدی:** مجاله‌شونددگی، تحلیل عددی، روش‌های تجربی، تونل‌سازی

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

<sup>۲</sup> کارشناس گروه سازه‌های زیرزمینی، موسسه مهندسی مشاور ایمن‌سازان



### مقدمه

از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی شناسایی مکان‌های مستعد لهیدگی و مجاله‌شوندگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. اهمیت این موضوع در کارهای تونل‌سازی به حدی است که در صورت پیش‌بینی دقیق می‌تواند باعث جلوگیری از توقف دستگاه و اتلاف زمان و همچنین کاهش هزینه اجرا پروژه حفاری خواهد شد.

رفتار لهیدگی مرتبط با خواص تغییرشکل‌پذیری و مقاومتی توده‌سنگ ضعیف است. طبق تعریف ارائه شده توسط انجمن بین‌المللی مکانیک‌سنگ (ISRM) لهیدگی سنگ تغییرشکل‌های بزرگ مقیاس وابسته به زمان می‌باشد که به خواص خزشی ایجاد شده توسط تنش‌های برشی، مرتبط می‌شود. وجود عواملی همانند تنش‌های بالا و خواص مقاومتی ضعیف توده‌سنگ موجب افزایش تنش‌های برشی در محدوده توده‌سنگ اطراف تونل می‌شود. این تنش‌های برشی در ایجاد رفتار خزشی توده‌سنگ نقش اساسی دارند.

روش حفاری تونل مورد مطالعه به صورت مکانیزه و با استفاده از یک دستگاه ماشین حفاری تمام مقطع با شیلد تلسکوپی (Telescopic shield) مدل TB 458 E/TS و پوشش دیواره بتنی پیش‌ساخته از نوع هگزگونال می‌باشد که از دهانه ورودی به سمت محل تقاطع با تونل دسترسی حفاری خواهد شد.

رخنمون‌های سنگی مسیر تونل شامل انواع سنگ‌های آذرین، دگرگونی، شیل‌ها، آهک‌ها، آهک رسی، گنگومرا و به صورت محدود ماسه‌سنگ و ماسه‌سنگ آهکی می‌باشد که در آنها ساختارهای مختلف زمین‌شناسی شامل لایه‌بندی، چین و شکستگی (گسل و درزه) مشاهده می‌شود.

### ۱- احتمال وقوع پدیده لهیدگی

وجود عواملی همانند تنش‌های بالا و خواص مقاومتی ضعیف توده‌سنگ موجب افزایش تنش‌های برشی در محدوده توده‌سنگ اطراف تونل می‌شود. این تنش‌های برشی در ایجاد رفتار خزشی توده‌سنگ نقش اساسی دارند.

به طور کلی در مبحث لهیدگی باید فاکتورهای نوع سنگ، مقاومت و خردشدگی توده‌سنگ، امتداد یافتگی سازه سنگ، حالت تنش (روباره)، فشار آب، فرآیند ساخت و سیستم‌های نگهدارنده را مورد توجه قرار داد.

میکاشیست، شیست‌های آهکی (نوعی از سنگ‌های موجود در زون‌های تکتونیزه و گسلی)، شیل-رس، آهک‌های رس‌دار و ... از جمله سنگ‌هایی هستند که در صورت مهیا بودن شرایط تنش می‌توانند این رفتار را از خود بروز دهند. در رفتار لهیدگی مقدار همگرایی زیاد است.



جهت ناپیوستگی‌ها (لایه‌بندی، شیبستزیتته) به عنوان یک عامل مهم در شروع و توسعه جابجایی‌های زیاد در اطراف تونل عمل می‌کند. در حالت عمومی در صورتی که امتداد ناپیوستگی‌ها موازی با محور تونل باشد، بر شدت تغییر شکل‌ها افزوده می‌شود. به منظور برآورد اولیه رفتار لهیدگی می‌توان از روش‌های تجربی و نیمه تجربی استفاده نمود. روش‌های مختلفی جهت برآورد پتانسیل لهیدگی توسط محققین مختلف ارائه شده است. روش‌های تجربی از قبیل روش سینگ و همکاران (۱۹۹۲) و روش گونل و همکاران (۱۹۹۵) جهت برآورد اولیه لهیدگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. جهت برآورد دقیق تر رفتار لهیدگی معمولاً از روش‌های نیمه تجربی از قبیل روش‌های جتوا (۱۹۸۴)، آیدان (۱۹۹۳) و هوک و مارینوس (۲۰۰۰) استفاده می‌گردد.

### ۲- پیش‌بینی پتانسیل لهیدگی به کمک روش‌های تجربی

این روش بر پایه روش‌های طبقه‌بندی ارائه شده است. با وجود اینکه مساله مجاله‌شوندگی در تونل‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است لیکن عدم قطعیت‌هایی که در این موضوع وجود دارد، استفاده از روش‌های تجربی را ناگزیر می‌سازد. به همین منظور در ادامه روش تجربی سینگ و همکاران ارائه گردیده است.

### ۲-۱- معیار سینگ و همکاران (۱۹۹۲)

سینگ و همکارانش (۱۹۹۲) براساس داده‌های حاصل از ۳۹ مورد تاریخی و با استفاده از سیستم طبقه‌بندی Q و ضخامت روباره (H) یک بررسی تجربی انجام دادند. این نتایج بر روی نمودار شکل (۱) نشان داده شده است. یک خط جداکننده مرزی (AB) که وضعیت لهیدگی را از موارد غیرلهیده جدا می‌کند در این شکل نشان داده شده است. معادله خط AB طبق به قرار زیر است:

$$H = 350Q^{\frac{1}{3}}$$

و موارد لهیده را در صورتی داریم که:

$$H >> 350Q^{\frac{1}{3}}$$

موارد غیر لهیده را در صورتی داریم که:

$$H << 350Q^{\frac{1}{3}}$$

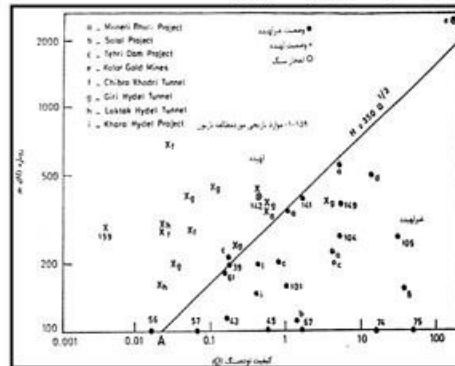


# اولین همایش ملی معدن و علوم وابسته

## اسفند ۱۳۸۸



براساس این معیار مسیر تونل، از لحاظ لهیدگی مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۱) نتایج لهیدگی براساس معیار سینگ و همکاران را نشان می‌دهد.



شکل (۱)- نمودار پیشنهادی سینگ و همکاران (۱۹۹۲)

جدول (۱)- درجه لهیدگی واحدهای مسیر تونل انحراف براساس رابطه سینگ (۱۹۹۲)

نام واحد	کیلومتر از انتهای تونل	Q	ضخامت روباره (m)	ضخامت روباره مجاز (m)
Met-Sch	۴۱-۰	۰/۹۵-۰/۴	۲۷	۳۰/۷
Ig - Di	۱۴۰-۱۴	۷/۵-۴	۵۵	۶۲/۷
Met-Sch	۲۰۰-۱۴۰	۰/۹۵-۰/۴	۱۰۰	۳۰/۷
Met-G	۴۹۵-۲۰۰	۴-۲	۶۷	۵۰/۵
CZ	۵۰۵-۴۹۵	۰/۲-۰/۰۵	۳۹	۱۷/۵
Met-Sch	۶۲۰-۵۰۵	۰/۹۵-۰/۴	۳۵	۳۰/۷
CZ	۶۲۶-۶۲۰	۰/۲-۰/۰۵	۳۳	۱۷/۵
Ig - Di	۶۶۸-۶۲۶	۷/۵-۴	۳۲	۶۲/۷
CZ	۶۷۳-۶۶۸	۰/۲-۰/۰۵	۳۰	۱۷/۵
Ig - Di	۶۸۲-۶۷۳	۷/۵-۴	۳۰	۶۲/۷
Met-Sa	۷۵۵-۶۸۲	۱/۴-۰/۸	۲۶	۳۶/۱
Met-Sch	۸۱۹-۷۵۵	۰/۹۵-۰/۴	۲۴	۳۰/۷
Met-Mar	۸۷۵-۸۱۹	۱/۵-۰/۹	۲۹	۳۷/۲
CZ	۸۸۰-۸۷۵	۰/۲-۰/۰۵	۳۰	۱۷/۵



# اولین همایش ملی معدن و علوم وابسته

## اسفند ۱۳۸۸



۳۷۲	۵۴	۱/۵-۰/۹	۱۲۰۲-۸۸۰	Met-Mar
۳۰۷	۷۲	۰/۹۵-۰/۴	۱۲۶۸-۱۲۰۲	Met-Sch
۱۷۵	۸۳	۰/۲-۰/۰۵	۱۲۸۸-۱۲۶۸	CZ
۳۶۱	۱۳۵	۱/۴-۰/۸	۱۴۱۸-۱۲۸۸	Met-Sa
۳۰۷	۱۹۰	۰/۹۵-۰/۴	۱۷۲۰-۱۴۱۸	Met-Sch
۱۷۵	۱۳۰	۰/۲-۰/۰۵	۱۷۳۰-۱۷۲۰	CZ
۶۲۷	۱۱۵	۷/۵-۴	۱۸۱۰-۱۷۳۰	Ig - Di
۳۰۷	۱۹۰	۰/۹۵-۰/۴	۲۰۶۰-۱۸۱۰	Met-Sch
۱۷۵	۲۱۰	۰/۲-۰/۰۵	۲۰۶۵-۲۰۶۰	CZ
۶۳۶	۲۱۰	۸-۴	۲۱۳۰-۲۰۶۵	Met-Am
۱۷۵	۲۱۰	۰/۲-۰/۰۵	۲۱۵۰-۲۱۳۰	FZ
۳۰۷	۲۱۰	۰/۹۵-۰/۴	۲۲۹۰-۲۱۵۰	Met-Sch
۱۷۵	۱۹۵	۰/۲-۰/۰۵	۲۳۰۰-۲۲۹۰	CZ
۳۰۷	۱۹۵	۰/۹۵-۰/۴	۲۵۲۵-۲۳۰۰	Met-Sch
۶۲۷	۱۰۵	۷/۵-۴	۲۷۱۰-۲۵۲۵	Ig - Di
۱۷۵	۹۵	۰/۲-۰/۰۵	۲۷۱۶-۲۷۱۰	CZ
۳۷۱	۹۵	۱/۵-۰/۹	۲۹۰۰-۲۷۱۶	Met-Mar
۱۷۵	۹۵	۰/۲-۰/۰۵	۲۹۱۰-۲۹۰۰	CZ
۳۰۷	۱۲۰	۰/۹۵-۰/۴	۳۴۰۰-۲۹۱۰	Met-Sch

با توجه به نتایج به دست آمده از رابطه سینگ (۱۹۹۲) می توان بیان کرد که در کیلومترهای ۲۰۶۵-۲۰۶۰، ۲۱۳۰-۲۱۵۰ و ۲۲۹۰-۲۳۰۰ در واحدهای CZ و FZ درجه لهیدگی از نوع زیاد بوده و می توان احتمال داد که در کیلومترهای ۱۷۳۰-۱۷۲۰ درجه لهیدگی بسیار ضعیف باشد و در دیگر قسمت های مسیر تونل با روش سینگ (۱۹۹۲) پدیده لهیدگی مشاهده نخواهد شد.

### ۳- پیش بینی پتانسیل لهیدگی به کمک روش های نیمه تجربی

نمونه دیگری از روش های محاسبه لهیدگی از نوع روش های نیمه تجربی می باشد که بر پایه مقاومت تک محوری سنگ یا توده سنگ برجا ناشی از سرباره می باشد استفاده شده است.

### ۳-۱- روش جتوا و همکاران (۱۹۸۴)

درجه مجاله شوندگی در سال ۱۹۸۴ توسط جتوا و همکاران به صورت زیر ارائه شده است:





$$N_c = \frac{\sigma_{CM}}{P_0} = \frac{\sigma_{CM}}{\gamma \cdot H}$$

در این فرمول داریم که:

$\sigma_{CM}$  = مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ

$H$  = عمق تونل از سطح زمین

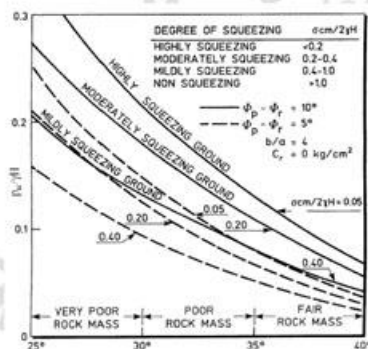
$P_0$  = تنش برجا

$\gamma$  = وزن مخصوص توده سنگ.

میزان درجه لهیدگی در تونل از نظر جتوا در جدول (۳) ارائه شده است. شکل (۴) نمودار جتوا برای پیش‌بینی شرایط مچاله‌شونده نشان داده شده است.

جدول (۳) - طبقه‌بندی لهیدگی مطابق نظر جتوا و همکاران (۱۹۸۴)

نوع رفتار	$\frac{\sigma_{CM}}{P_0}$
مچاله شونده زیاد	$< 0.4$
مچاله شونده متوسط	$0.4 - 0.8$
مچاله شونده ملایم	$0.8 - 2$
غیر مچاله شونده	$> 2$



شکل (۴) - نمودار جتوا برای پیش‌بینی شرایط مچاله‌شونده

براساس این معیار مسیر تونل، از نظر لهیدگی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج در جدول (۴) ارائه گردیده است.



# اولین همایش ملی معدن و علوم وابسته

## اسفند ۱۳۸۸



جدول (۴) - درجه لهدگی واحدهای مسیر تونل انحراف براساس رابطه جتوا و همکاران (۱۹۸۴)

نام واحد	کیلومتر از انتهای تونل	$N_c = \frac{\sigma_{CM}}{P_0}$	توصیف
Met-Sch	۴۱-۰	۲۰/۴۲	غیر مجاله شونده
Ig - Di	۱۴۰-۴۱	۷۲/۱۰	غیر مجاله شونده
Met-Sch	۲۰۰-۱۴۰	۵/۵۱	غیر مجاله شونده
Met-G	۴۹۵-۲۰۰	۳۱/۹۱	غیر مجاله شونده
CZ	۵۰۵-۴۹۵	۶/۷۲	غیر مجاله شونده
Met-Sch	۶۲۰-۵۰۵	۱۶/۳۶	غیر مجاله شونده
CZ	۶۲۶-۶۲۰	۷/۹۵	غیر مجاله شونده
Ig - Di	۶۶۸-۶۲۶	۱۳۳/۹۲	غیر مجاله شونده
CZ	۶۷۳-۶۶۸	۸/۸۴	غیر مجاله شونده
Ig - Di	۶۸۲-۶۷۳	۱۳۳/۱۸	غیر مجاله شونده
Met-Sa	۷۵۵-۶۸۲	۳۸/۰۴	غیر مجاله شونده
Met-Sch	۸۱۹-۷۵۵	۲۳/۹۸	غیر مجاله شونده
Met-Mar	۸۷۵-۸۱۹	۳۸/۱۷	غیر مجاله شونده
CZ	۸۸۰-۸۷۵	۸/۷۴	غیر مجاله شونده
Met-Mar	۱۲۰۲-۸۸۰	۲۰/۵۰	غیر مجاله شونده
Met-Sch	۱۲۶۸-۱۲۰۲	۷/۶۶	غیر مجاله شونده
CZ	۱۲۸۸-۱۲۶۸	۳/۱۶	غیر مجاله شونده
Met-Sa	۱۴۱۸-۱۲۸۸	۷/۳۳	غیر مجاله شونده
Met-Sch	۱۴۱۸-۱۳۷۲	۲/۸۹	غیر مجاله شونده
CZ	۱۷۲۰-۱۳۷۲	۲/۰۲	غیر مجاله شونده
Ig - Di	۱۷۳۰-۱۸۱۰	۳۴/۲۸	غیر مجاله شونده
Met-Sch	۲۰۶۰-۱۸۱۰	۲/۹۰	غیر مجاله شونده
CZ	۲۰۶۵-۲۰۶۰	۱/۳۵	مجاله شونگی ملایم
Met-Am	۲۱۳۰-۲۰۶۵	۱۳/۷۰	غیر مجاله شونده
FZ	۲۱۵۰-۲۱۳۰	۱/۳۵	مجاله شونگی ملایم
Met-Sch	۲۴۹۰-۲۱۵۰	۲/۶۲	غیر مجاله شونده
CZ	۲۳۰۰-۲۴۹۰	۱/۳۵	مجاله شونگی ملایم
Met-Sch	۲۵۲۵-۲۳۰۰	۲/۸۳	غیر مجاله شونده
Ig - Di	۳۷۱۰-۲۵۲۵	۳۷/۷۷	غیر مجاله شونده
CZ	۳۷۱۶-۳۷۱۰	۲/۷۶	غیر مجاله شونده
Met-Mar	۳۹۰۰-۳۷۱۶	۱۱/۶۵	غیر مجاله شونده
CZ	۳۹۱۰-۳۹۰۰	۲/۷۶	غیر مجاله شونده
Met-Sch	۳۴۰۰-۳۹۱۰	۴/۶۰	غیر مجاله شونده

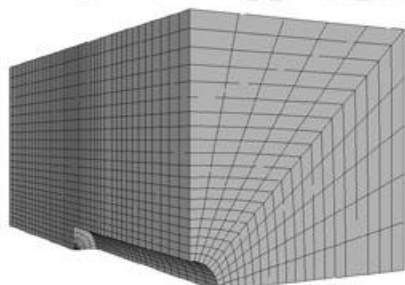
استان یزد، شهرستان طبس، میدان دانشگاه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد طبس، دبیرخانه همایش  
 تلفن: ۳۲-۴۲۳۶۱۲۹ (۰۳۵۳) دورنگار: ۴۲۳۶۱۳۳ (۰۳۵۳)  
 وب سایت همایش: [www.hamayesh-tabas.ir](http://www.hamayesh-tabas.ir)



با توجه به نتایج به دست آمده از رابطه جتوا (۱۹۸۴) می‌توان بیان کرد که در کیلومترهای ۲۰۶۵-۲۰۶۰، ۲۱۳۰-۲۱۵۰ و ۲۲۹۰-۲۳۰۰ در واحدهای CZ و FZ درجه لهیدگی از نوع مجالوشوندگی ملایم بوده است و در دیگر قسمت‌های مسیر تونل با روش جتوا (۱۹۸۴) پدیده لهیدگی مشاهده نخواهد شد.

#### ۴- تحلیل عددی همگرایی تونل

برای بررسی دقیق‌تر این پدیده از تحلیل عددی بوسیله نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  استفاده گردیده است. به دلیل مدل‌سازی محیط پیوسته و برقراری شرایط تقارن در مدل و همچنین به دلیل وجود سرباره زیاد، تنها یک‌چهارم تونل مدل‌سازی شده است. لازم به ذکر است در این مدل‌سازی به دلیل در دست نبودن خواص تابع زمان سنگ، از مدل رفتاری موهر-کلمب که پارامترهای آن با تقریب از روابط هوک-براون و نرم‌افزار ROCLAB تخمین زده می‌شود، استفاده گردیده است. مدل رفتاری موهر-کلمب قادر به در نظر گرفتن رفتار تابع زمان سنگ نیست. اما می‌توان با مشاهده وضعیت همگرایی تونل، وضعیت مجالوشوندگی را تخمین زد. نمایی از هندسه تونل و مدل‌سازی انجام گرفته در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵) - نمایی از مدل  $FLAC^{3D}$  ترسیم شده برای مقطع تحلیل شده

وضعیت جابجایی قائم و افقی برای مترهاژ ۲۰۰، ۱۶۰۰، ۲۲۰۰ و ۳۲۰۰ بررسی شده است. ماکزیمم جابجایی افقی برای مترهاژهای فوق بترتیب ۱، ۲۰۹۸۱، ۱۶۵ و ۱۳۷۶ بوده و نیز ماکزیمم جابجایی قائم برای مقاطع فوق ۱۰۰۵، ۳۰۱۹۴، ۱۰۷۸۱ و ۱۰۴۲۳ بوده است.

نمودار همگرایی طولی تونل با استفاده از تحلیل عددی برای نقاط سقف و دیواره تونل در چهار مقطع بحرانی ترسیم گردیده است. با در نظر گرفتن نمودارهای مذکور مشخص شده است که در مترهاژ ۲۰۰ همگرایی نقاط دیواره و سقف ۱/۱ سانتیمتر و در مترهاژ ۱۶۰۰ همگرایی نقاط دیواره ۳/۲ سانتیمتر و برای نقاط سقف ۳/۴ سانتیمتر بدست آمده است. همچنین همگرایی نقاط سقف و دیواره در مترهاژ ۲۲۰۰ به ترتیب در حدود ۱/۷ و ۱/۹ سانتیمتر و در مترهاژ ۳۲۰۰





این مقدار در دیواره ۱/۴ و در سقف ۱/۵ می‌باشد. لذا با توجه به مطالب ذکر شده، همگرایی زیاد سقف انتظار نمی‌رود. تحلیل عددی انجام گرفته نیز این موضوع را تأیید می‌کند. برای تشخیص میزان همگرایی مجاز تونل از روابط کرنش بحرانی ساکورایی استفاده شد. این روابط در ذیل ارائه گردیده است:

تراز هشدار خطر (۱)

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.89$$

تراز هشدار خطر (۲)

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1/22$$

تراز هشدار خطر (۳)

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1/59$$

لازم به ذکر است که در این رابطه مدول یانگ بر حسب (کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مکعب) و کرنش بر حسب درصد است.

از سه رابطه تراز هشدار خطر، رابطه دوم باید مبنای طراحی مهندسی قرار گیرد. در این قسمت میزان جابجایی حاصل از تحلیل عددی با جابجایی مجاز حاصل از روابط فوق مقایسه گردید. با در نظر گرفتن مدول یانگ توده‌سنگ برابر حدود ۱/۵ گیگاپاسکال، حدود بالا و پایین کرنش بحرانی به شرح زیر محاسبه می‌شود (جدول ۵-۶).

جدول ۵-۶- حدود تراز هشدار خطر برای سه محدوده کرنش بحرانی

جابجایی (متر)	کرنش	تراز هشدار
۰/۰۲۹۱	۰/۰۱۲۷۶	تراز هشدار خطر ۱
۰/۰۱۲۴۱۴	۰/۰۰۵۴۴۵	تراز هشدار خطر ۲
۰/۰۰۵۲۹	۰/۰۰۲۳۲۳	تراز هشدار خطر ۳

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج تحلیل عددی توسط نرم‌افزار در نقاط با پتانسیل مجاله‌شوندگی با نتایج حاصل از روابط تجربی همگرایی خوبی دارد.

در مترازهایی از تونل که توسط تحلیل عددی و روش‌های تجربی پتانسیل مجاله‌شوندگی تشخیص داده شده است تیم حفار باید آمادگی لازم را برای جلوگیری از گیرکردن دستگاه حفاری داشته باشد.

ممکن است در صورت لزوم مسیر حفاری تصحیح و مجدداً تحلیل انجام گیرد.