



## بررسی سیستم نگهداری انعطاف‌پذیر در سنگ‌های با رفتار وابسته به زمان،

### با استفاده از تحلیل تقارن و تحلیل کرنش صفحه‌ای

مهران میرزایی<sup>1</sup>، سیده شیلان حسینی<sup>2</sup>

1- گروه تونل و ژئوتکنیک شرکت مهندسین مشاور راهیاب ملل، [memirzaei@aut.ac.ir](mailto:memirzaei@aut.ac.ir)  
 2- گروه تونل و ژئوتکنیک شرکت مهندسین مشاور راهیاب ملل، [shilan.hosseini@yahoo.com](mailto:shilan.hosseini@yahoo.com)

#### چکیده

تونلسازی در سنگ با رفتار مجاله‌شونده منجر به تغییر شکل‌های بزرگ و در نتیجه کاهش سطح مقطع حتی در کف تونل خواهد شد. این تغییرشکل‌ها ممکن است در طول ساخت و یا در یک دوره طولانی ادامه یابند. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که ترکیب تنش‌های القایی و مواد ضعیف، باعث ایجاد تنشهای القایی فراتر از مقاومت برشی توده سنگ شده باشند. به منظور جلوگیری از ادامه این تغییرشکل‌ها نیاز به نصب سیستم نگهداری است. عدم شناخت صحیح رفتار خزشی سنگ‌ها و استفاده از مدل‌های رفتاری نامناسب در تحلیل و طراحی تونل‌ها، ممکن است منجر به خسارات جبرانناپذیری گردد. در این تحقیق، مطالعه بر روی رفتار تونل آزادراه اراک- خرم آباد انجام شد. بیشترین روباره منطقه تونل 456 متر با دهانه 15/30 متر می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، سیستم نگهداری بهینه‌ای برای قسمت بحرانی تونل تعیین شد. همچنین مشاهده شد که زون T3 به علت روباره زیاد و کیفیت پایین توده سنگ، بیشترین پتانسیل مجاله‌شوندگی را دارا می‌باشد که منجر به همگراییهای بزرگ در این زون میشود. جهت همخوانی با شرایط واقعی، طراحی بر اساس شرایط الاستوپلاستیک، رفتار وابسته به زمان برگر (cvisc) با نصب سیستم نگهداری انعطاف‌پذیر انجام شده است. سیستم نگهداری بهینه با بکار بردن المان‌های hidcon و قاب فلزی انعطاف‌پذیر، با استفاده از تحلیل تقارن و تحلیل کرنش صفحه‌ای حاصل شد.

#### کلمات کلیدی

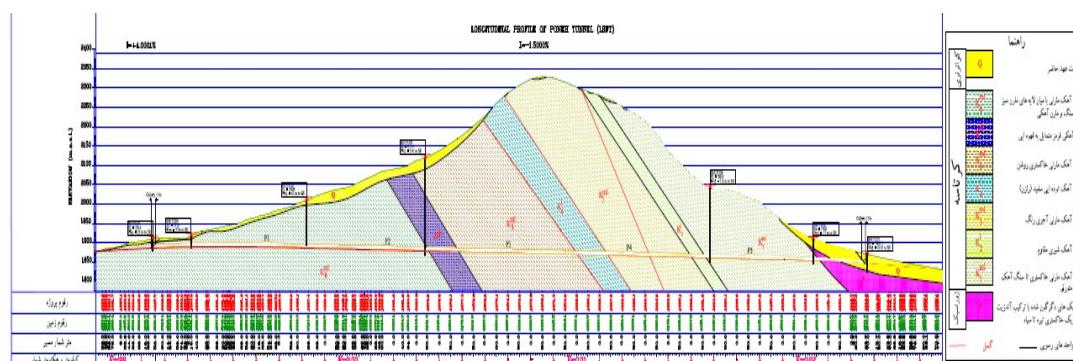
- فشارندگی
- رفتار خزشی
- نگهداری
- انعطاف‌پذیر
- تحلیل تقارن
- تحلیل کرنش صفحه‌ای
- مجاله‌شوندگی

<sup>1</sup> مهران میرزایی، شرکت مهندسین مشاور راهیاب ملل (تهران، یوسف آباد، خیابان فتحی شقاقی، مابین خیابان چهلستون و خیابان اسدآبادی، پلاک 31، کدپستی: 1431793843، تلفن: 021 - 88105110 و نمابر: 021 - 88105610)

## 1- مقدمه

مچاله‌شوندگی، پدیده‌های با تغییرشکل زیاد در سنگ‌های ضعیف می‌باشد. اگرچه جهت توقف تغییرشکل‌ها از لاینیگ استفاده شود ممکن است فشار ناشی از شرایط مچاله‌شونده، فراتر از حد قابل کنترل سیستم نگهداری بوده و منجر به تخریب آن شود. در چنین شرایطی تنها راه حل ممکن نصب سیستم نگهداری است که بتواند هماهنگ با تغییرشکل توده سنگ، تغییرشکل پیدا کند. این نوع سیستم‌های نگهداری را انعطاف‌پذیر می‌گویند که به دو صورت قابل استفاده است. نوع اول همراه با لایه تراکم‌پذیر که بین مرز حفاری شده و سطح خارجی سیستم نگهداری قرار گرفته و دومی که لایه تراکم‌پذیر در شکاف‌های تعبیه شده بین سیستم نگهداری در راستای طولی قرار می‌گیرد و باعث کاهش محیط تونل می‌شود. امروزه از مورد دوم با بکار بردن قاب‌های انعطاف‌پذیر در ترکیب با المان‌های hidcon<sup>۱</sup> و شاتکریت بیشتر استفاده می‌شود.

تونل پونه واقع در قطعه سوم آزادراه اراک-خرم آباد با دهانه 15/30 متر و ارتفاع 10 متر با مقطع نعل اسبی اصلاح شده و 127 متر مربع احداث شده است. این تونلها به طول تقریبی 3 کیلومتر، در 25 کیلومتری جنوب غربی شهر بروجرد و 35 کیلومتری شمال شرق خرم آباد واقع شده است. مهمترین راه‌های دسترسی به این تونلها از طریق جاده ارتباطی بروجرد-چگلوندی و روستای دینارآباد و پیرشریف برای بخش ورودی و جاده ارتباطی خرم آباد-چگلوندی روستای کاسیان و خلیل بیک برای بخش‌های خروجی تونل‌های دوقلوی پونه می‌باشد. تونل پونه در انواع سنگ‌های مختلف از جمله سنگ مقاوم، ضعیف و متوسط تحت زونهای T1 تا T8 با روبراه‌های مختلفی حفر شده است که پروفیل طولی و خصوصیات هر یک از زونها ادامه نمایش داده شده است.



شکل 1: پروفیل طولی تونل پونه [1]  
جدول 1: خصوصیات زون‌های مسیر تونل

زون	نوع سنگ	مقاومت فشاری توده سنگ (Mpa)	ارتفاع روباره (m)	کیفیت توده سنگ (Q)	عدد توده سنگ (N)	RMR
T1	آهک ماری	0/48	230	0/28	1/4	39
T2	شیل آهکی قرمز	0/28	274	0/17	0/68	28
T3	آهک ماری خاکستری	0/28	456	0/36	1/8	33
T4	آهک توده ای	6/73	434	4	10	69
T5	آهک ماری آجری رنگ	1/89	400	1/44	3/5	48
T6	سنگ آهک شیری رنگ	3/89	215	2/88	6/25	64
T7	آهک ماری	2/54	192	2/6	6/5	62
T8	آتشفشان دگرگون شده	0/33	40	0/165	0/8	32

مطابق با بررسی‌های انجام‌شده، زون T3 دارای بیشترین پتانسیل مچاله‌شوندگی بوده و در این پژوهش نیز سعی بر آن است که به تحلیل سیستم نگهداری بر روی این زون پرداخته شود.

## 2- روش‌شناسی

<sup>۱</sup> High deformable concrete

**2-1-1- تخمین بار وارده بر سیستم نگهدارنده با استفاده از روش‌های تجربی**  
یکی از بارهای وارد بر سیستم نگهداری در مرحله بعد از نصب، بار وارد از طرف توده سنگ دربرگیرنده تونل است. با توجه به اطلاعات قابل دسترس در تونل پونه، در روش‌های تجربی می‌توان از روش RMR و روش ترزاقی استفاده کرد و چون روش RMR شرایط مجاله‌شوندگی را در نظر نمی‌گیرد، نتایجش دور از انتظار می‌باشد ولی روش ترزاقی بدلیل در نظر گرفتن شرایط مجاله‌شوندگی نتیجه محافظه‌کارانه‌ای ارائه می‌کند.

**2-1-1-1- استفاده از طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ**  
گوئل و جتوا رابطه زیر را برای تخمین فشار نگهدارنده بر اساس طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ RMR ارائه کردند که در تونل پونه برابر با 0.268 مگاپاسکال می‌باشد [2].

$$P = (7.5B^{0.1} \times H^{0.5} - RMR) / 20RMR$$

**2-1-1-2- استفاده از روش بار سنگ ترزاقی**  
نسخه اصلاح شده طبقه‌بندی بار سنگ ترزاقی در سال 1982 پیشنهاد گردید که طبقه‌بندی انجام شده برای تونل‌های با عمق بیشتر از  $1.5(H_t + B)$  معتبر است که در اینجا پارامتر  $H_t$ ، ارتفاع و پارامتر B پهنای تونل می‌باشد. طبق روش ترزاقی میزان فشار وارد بر سیستم نگهداری در محدوده 2.9 الی 1.3 می‌باشد [3].

**2-1-1-3- استفاده از روش گوئل**  
گوئل در سال 1994 مقدار فشار نهایی روی سیستم نگهداری را برای شرایط مجاله‌شونده تخمین زد که در تونل پونه 0.575 مگاپاسکال است.

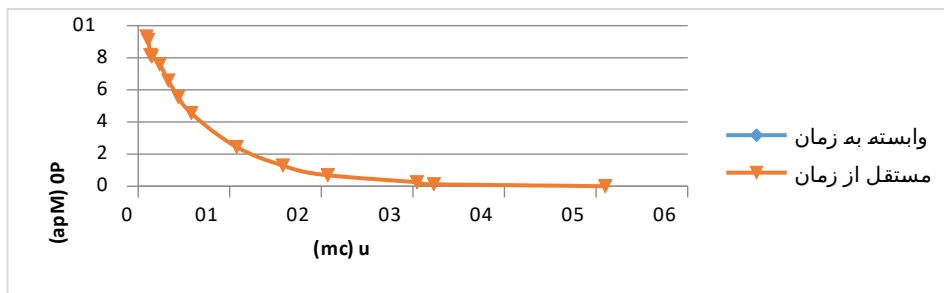
$$(N) = \sqrt{p}$$

#### 2-1-4 تخمین بار وارده بر سیستم نگهدارنده با استفاده از نرم افزار FLAC2D

بکارگیری تحلیل‌های عددی در مواردی که نسبت  $\frac{\sigma_{cm}}{p_0}$  زیر 3/0 است [4]، توصیه شده و اگر این نسبت به زیر 15/0 سقوط کند پایداری تونل ممکن است در شرایط بحرانی قرار گیرد. در این شرایط استفاده از تحلیل‌های عددی در مرحله طراحی یک مزیت مهم است زیرا با استفاده از آنها می‌توان مراحل حفاری و نگهداری و ترکیب آنها با یکدیگر شامل پایدارسازی و پیش‌نگه دارنده را مدل کرد. با استفاده از مدل‌سازی عددی فهم صحیحی از پدیده واقعی در حال اتفاق به دست خواهد آمد و ضمناً با استفاده از این روشها شرایط حفاری چند مرحله‌ای، تأثیر پیشروی جبهه‌کار، مدل‌سازی سه بعدی را میتوان بررسی کرد که با راه حل فرم بسته امکانپذیر نیست.

#### • نمودار GRC در نرم افزار

برای رسم منحنی واکنش زمین در نرم افزار، یک کاهش یکنواختی از تنش شعاعی در مرز حفاری ایجاد می‌شود و در مقابل میزان جابجایی حاصل از این کاهش فشار به رسم نمودار رفتار زمین (GRC) منتهی خواهد شد. طبق مقایسه انجام گرفته بین دو منحنی رفتار زمین در شکل زیر نتیجه گرفته میشود که سنگ مورد مطالعه دارای خواص وابسته به زمان شدیدی بوده و ممکن است با تحلیل مستقل از زمان در اجرای تونل با مشکل مواجه شود.



نمودار 1:-مقایسه نمودار GRC در حالت وابسته به زمان و مستقل از زمان

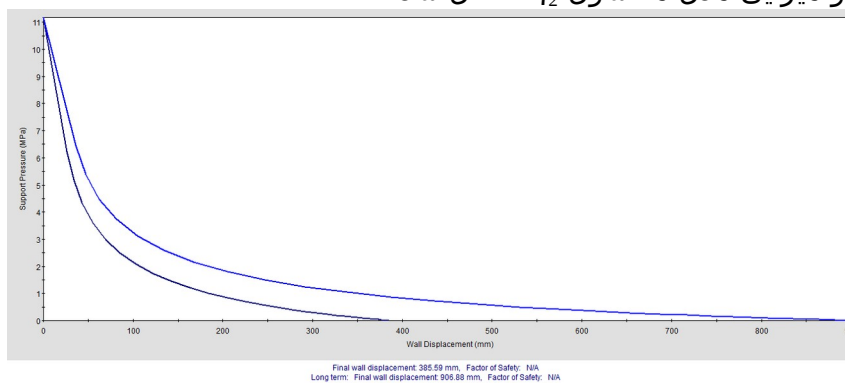
## 1-2-2- پارامترهای وابسته به زمان (ویسکو الاستیک)

با وجود اینکه در تونل پونه آزمایشات خزش انجام نشده و داده‌های همگرایسنجی نیز بدلیل حفر نشدن تونل در دسترس نیست، بایستی با توجه به ویژگیهای توده سنگ مورد مطالعه از مقالات معتبر بهره جست. طبق طراحیهای هوک در سال 2009، برای بدست آوردن پارامترهای دراز مدت در نرم افزار، پارامترهای مقاومتی را تا 30 درصد کاهش میدهم [4]. در نرم افزار Rock Support نیز برای بدست آوردن رفتار زمین در حالت دراز مدت، پارامترهای مقاومتی را به صورت پیش فرض به 30 درصد کاهش میدهد. در این پژوهش نیز با اعمال کاهش 30 درصدی مقاومت و بهره جستن از مقالات، به یک مقدار بهینه برای پارامترهای وابسته به زمان رسیده شد (جدول 1).

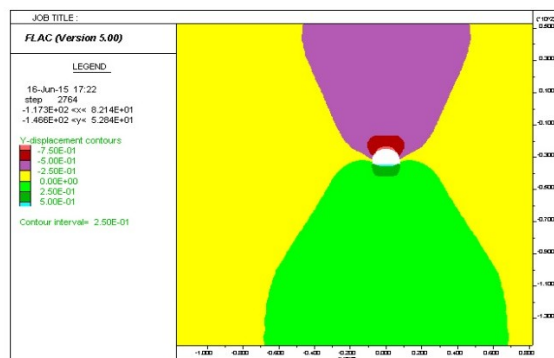
جدول 1: پارامترهای توده سنگ در کوتاه مدت و دراز مدت

پارامترها	پارامتر کوتاه مدت	پارامتر بلند مدت
عمق تونل (m)	456	456
$\sigma_{cm}$ (Mpa)	0/29	0/2
GSI	31	31
$m_i$	9	9
E	1486	1040
C (Mpa)	0/608	0/608
$\phi$ (درجه)	21/78	21/78

با استفاده از پارامترهای بلند مدت در تحلیل نرم افزار [5] FLAC 2D با معیار شکست مورکلمب و در نرم افزار Rock Support به میزان جابجایی 95 سانتیمتر در سقف رسیده شد. با انجام آنالیز برگشتی در مدل رفتاری ویسکوپلاستیک برگر و با استناد به پارامترهای حاصل شده برای این نوع سنگ یعنی آهک شیلی، مقدار بهینه ضرایب ویسکوالاستیک از جمله مدول برشی کلونین G، میرایی مدل کلونین  $\eta_1$  و میرایی مدل ماکسول  $\eta_2$  حاصل شد.



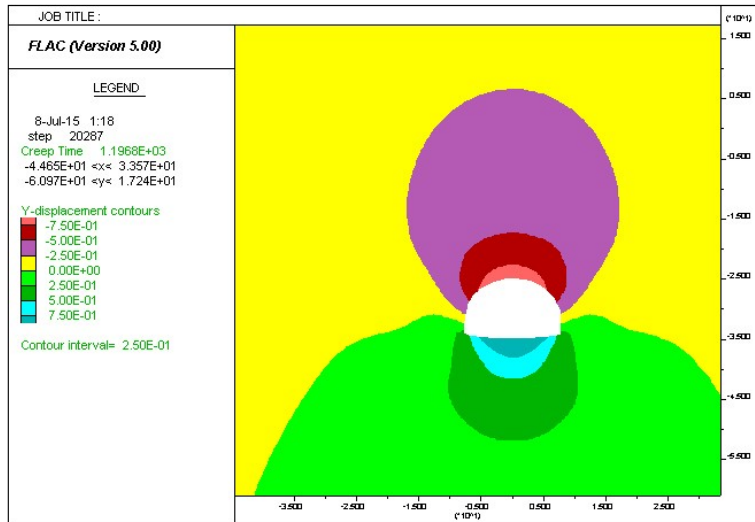
نمودار 2- جابجایی کوتاه مدت و بلند مدت



شکل 2: جابجایی سقف در مدل موهر کلمب در حالت دراز مدت

جدول 2: پارامترهای مورد نیاز در مدل cvise

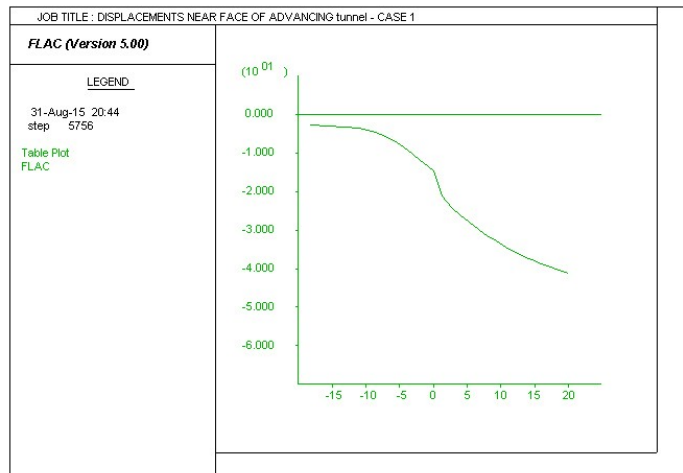
میرایی مدل ماکسول $\eta_2$ (Pa-h)	میرایی مدل کلوین $\eta_1$ (h)	مدول برشی کلوین G (pa)
$19.6 \times 10^{10}$	$6.94 \times 10^9$	$11.65 \times 10^{10}$



شکل 3: جابجایی در سقف و کف تونل در مدل cvisc

### 2-2-2- جابجایی طولی LDP برای تونل بدون نصب لاینینگ

نمودار LDP جابجایی دیواره یا سقف تونل را در راستای محور تونل نشان میدهد که در این جا به رسم این نمودار در حالت پلاستیک، پرداخته شده است. برای حالت پلاستیک نمودار LDP، از مدل موهر کولمب استفاده شده و جابجایی نسبت به فاصله از سینه کار به صورت نمودار زیر حاصل شده است که در مقدار تقریباً 50 سانتیمتر، ثابت شده و با نتیجه حاصل از روش‌های تحلیلی تقریباً برابر میباشد.



نمودار 3- نمودار LDP برای حالت پلاستیک

### 3- سیستم نگهداری بهینه برای تونل مورد مطالعه

#### 3-1- سیستم نگهداری غیرفعال (انعطاف‌پذیر) با روش کرنش صفحه‌ای

در تونلهای دارای شرایط مچاله‌شوندگی زیاد، سیستم نگهداری صلب، کاربردی ندارد در نتیجه از سیستم نگهداری انعطاف‌پذیر در حفر تمام مقطع با تقویت جنبه‌کار با استفاده از داولها استفاده میشود. هدف از سیستمهای نگهداری انعطاف‌پذیر، کاهش فشار نگهداری با اجازه دادن به تغییر شکل تونل میباشد. وقتی که مقدار تغییر شکل مورد نیاز تخمین زده شد، بایستی فشار زمین

نیز توسط خط مشخصه زمین بدست آید. در محاسبات برای حاصلشدن نمودار رفتار زمین (GRC) یک کاهش یکنواختی از تنش شعاعی در مرز حفاری ایجاد می شود و در مقابل میزان جابجایی حاصل از این کاهش فشار به رسم نمودار GRC منتهی خواهد شد در حالی که در حفاری تونل واقعی و نصب سیستم نگهداری، باربرداری کاملاً آبی در دیواره تونل اتفاق خواهد افتاد. به ویژه این پدیده برای منطقه پشت جبهه کار تاثیر غالبی دارد که به مشخصه سیستم نگهداری نیز بستگی دارد. در این پژوهش با اعمال سیستم نگهداری های مختلف، سیستم نگهداری بهینه با حفر یک مرحله ای حاصل شد با شرایط زیر:

- نصب المان های انعطاف پذیر مانند HDC و قاب های کشویی TH جهت تامین تنش شعاعی 1.1 مگاپاسکال و با جابجایی 28 سانتیمتر برای تحلیل تقارن در طی 30 روز و تحلیل کرنش صفحه ای در طول 60 روز. در ادامه به روند طراحی این سیستم پرداخته شده است.

### 3-3- سیستم نگهداری غیرفعال (انعطاف پذیر) با روش تقارن

برای محاسبه مقدار جابجایی در حین پلاستیک شدگی، از نمودارهای بدست آمده توسط کانتینی (برای شرایط آنالیز تقارن) استفاده شده است. به هر حال بایستی سیستم نگهداری طراحی شود که قابلیت تغییر شکل اجازه داده شده در نمودار کانتینی داشته باشد و میزان مقاومتی را با این جابجایی تحمل کند که تونل دچار ریزش نشود. در این پژوهش با استفاده از سیستم قاب انعطاف پذیر دارای 10 حلقه اصطکاکی و 9 عدد المان HDC در 30 سانتیمتر شاتکریت، می توان هم جابجایی و هم ایمنی هنگام کار تا زمان عملکرد لاینینگ نهایی را فراهم کرد. میزان تنش تسلیم سیستم به صورت رابطه زیر حاصل شده که برابر 1.1 مگاپاسکال میباشد. خصوصیات سیستم نگهداری انعطاف پذیر به صورت زیر میباشد. قاب فلزی TH36 به عنوان المان اول و شاتکریت به عنوان المان دوم در نظر گرفته شده است. خصوصیات TH36 به صورت زیر است:

$$E_1 = 200Gpa$$

$$I_1 = 969cm^4$$

$$A_1 = 46cm^2$$

خصوصیات شاتکریت نیز به صورت زیر است:

$$E_2 = 20Gpa$$

$$I_2 = 2.25 \times 10^5 cm^4$$

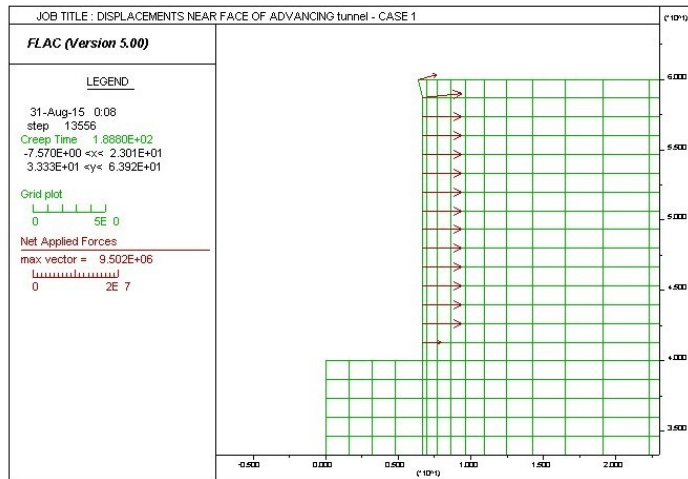
$$A_2 = 3000cm^2$$

I ممان اینرسی، E مدول شکل پذیری و A سطح مقطع المان میباشد. مدول یانگ با در نظرگیری آنالیز کرنش صفحه ای بر مقدار  $1-\nu^2$  تقسیم خواهد شد. مقاومت حلقه اصطکاکی برابر 400 کیلوپاسکال، فاصله مرکز قاب ها برابر 1 متر، ضخامت لاینینگ برابر 30 سانتیمتر و تنش تسلیم المان برابر 10 مگاپاسکال میباشد

$$N_y = \frac{n_f \times N_f}{b} + d \times f_y \times b' = \frac{10 \times 0.4}{1} + 0.3 \times 10 = 7 \text{ MN/M}$$

$$p_y = \frac{N_y}{a} = \frac{7}{6.36} = 1.1 \text{ Mpa}$$

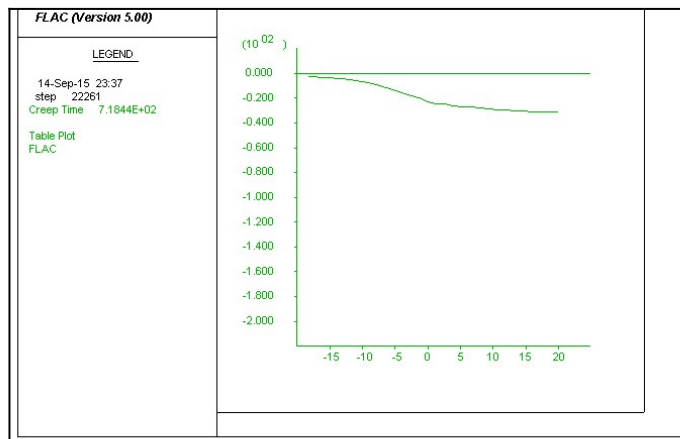
$n_f$  تعداد حلقه اصطکاکی،  $N_f$  مقاومت حلقه اصطکاکی،  $b$  فاصله مرکز قاب ها،  $d$  ضخامت لاینینگ،  $f_y$  تنش تسلیم و  $b'$  نیز فاصله بین قاب ها میباشد. مطابق با شکل زیر این سیستم نگهداری بار ثابت 1.1 مگاپاسکال را تحمل میکند.



شکل 4- فشار ناشی از سیستم نگهداری انعطاف پذیر در 1 متری جبهه کار

### • نمودار LDP برای تونل با نصب لاینینگ

با نصب سیستم نگهداری انعطاف پذیر به مدت 30 روز جهت وقوع 32 سانتیمتر جابجایی و خنثی کردن تنشهای حاصل شده با این جابجایی و در آخر با صلب شدن سیستم نگهداری تونل، نحوه تغییرات جابجایی در طول پروفیل تونل به صورت نمودار LDP در نمودار 3 حاصل شده است. طبق بررسی های انجام شده روی سیستم نگهداری ها، سیستم نگهداری پایدارتر است که مقدار تنش تسلیم اولیه بیشتری داشته باشد.



شکل 5: نمودار LDP بعد از نصب سیستم نگهداری

### 3-2- رفتار سیستم نگهداری اعمالی

برای حاصل شدن مقاومت نهایی، یعنی زمانی که سیستم نگهداری جابجایی مجاز خود را انجام داده و به حالت صلبی در می آید، مقاومت نهایی به صورت زیر حاصل میشود. برای شاتکریت و المان hidcon به صورت رابطه زیر:

$$P(\infty) = \sigma_c d / a = 30 \text{ mpa} \times 0.3 / 6.36 = 1.40 \text{ Mpa}$$

و برای قاب فولادی نیز به صورت رابطه روبرو میباشد.

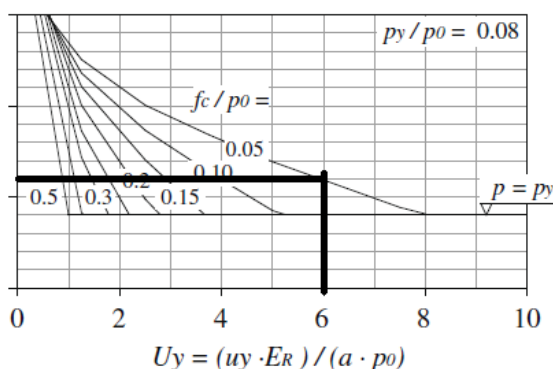
$$P(\infty) = \sigma_s A / a = 240 \text{ mpa} \times 46 \times 10^{-4} / 6.36 = 0.17 \text{ Mpa}$$

d ضخامت لاینینگ،  $\sigma_s$  مقاومت فشاری قاب فولادی،  $\sigma_c$  مقاومت فشاری شانکریت، A سطح مقطع قاب فولادی و a نیز شعاع تونل میباشد.

اساسیترین بخش در این طراحی، تخمین میزان جابجایی که در سیستم انعطاف‌پذیر بایستی اتفاق بیافتد به طوری که شکستی در تونل رخ ندهد به عبارتی میزان جابجایی حین پلاستیک‌شدگی از روی نمودار کانتینی تخمین داده شود (شکل 6).

$f_c$  مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ و محور y نیز نسبت فشار نگهداری نهایی به تنش برجا می‌باشد که مقدارش از رابطه زیر حاصل شده و روی شکل 6 نشان داده شده است.

$$\frac{p(\infty)}{p_0} = \frac{1.40}{11.172} \approx 0.125$$

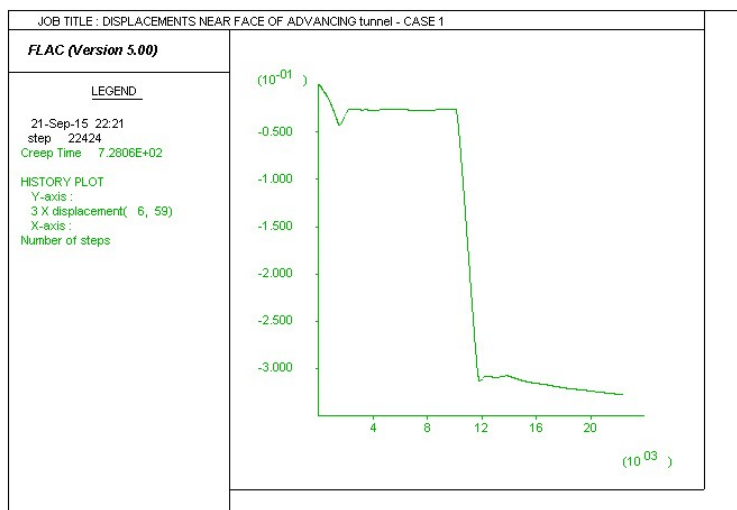


شکل 6- نمودار جابجایی حین پلاستیک‌شدگی

با استفاده از شکل 7 مطابق با شرایط تونل مورد مطالعه به تخمین میزان جابجایی در حین پلاستیک‌شدگی رسیده شد رابطه زیر:

$$U_Y = u_y E_R / a p_0 = 6 = 1486 \times u_y / 6.36 \times 11.172 \Rightarrow u_y = 28 \text{ cm}$$

که  $\varphi$  زاویه اصطکاک،  $p_0$  تنش برجا،  $f_c$  مقاومت فشاری توده سنگ،  $P_\infty$  فشار نگهداری نهایی، a شعاع تونل،  $E_R$  مدول الاستیسیته توده سنگ و  $u_y$  تغییر شکل در حین پلاستیک‌شدگی میباشد. جابجایی در حین پلاستیک‌شدگی برای تونل پونه، برابر با 28 سانتیمتر حاصل شده است.



شکل 7- پایداری تونل بعد از جابجایی رخ داده در تونل



با مدل‌سازی این نوع سیستم نگهداری در نرم افزار FLAC با آنالیز تقارن در مدل *visc*، سیستم نگهداری انعطاف‌پذیر به مدت 30 روز با سرعت حفاری 1 متر بر روز به میزان جابجایی 32.5 سانتیمتر رسیده است که 4.5 سانتیمتر این جابجایی میزان جابجایی اولیه قبل از نصب سیستم نگهداری می‌باشد.

### • المان‌های HDC مورد استفاده در جابجایی مجاز

ارتباط بین کرنش شعاعی و همگرایی در دیواره تونل به صورت رابطه روبرو است [6].

$$u_{1,1-2} = \varepsilon_{t,1-2} R$$

( $\varepsilon_{t,1-2}$ ) کرنش شعاعی و ( $R$ ) شعاع تونل است

$$\varepsilon_{t,1-2} = \frac{\Delta C_{1-2}}{c} = (\Delta c_{sc} + \Delta c_{ce}) / 2R \pi$$

در رابطه بالا ( $\Delta C_{1-2}$ ) تغییر محیط تونل و ( $C$ ) محیط اولیه تونل است. چون جابجایی مجاز توسط سیستم نگهداری انعطاف‌پذیر برابر 28 سانتیمتر می‌باشد، کاهش محیط تونل بخاطر کاهش در المان انعطاف‌پذیر ( $C_{ce}$ ) می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\Delta c_{ce} = \varepsilon_{t,ce} c_{ce} = \varepsilon_{t,ce} n_{ce} d_2$$

$d_2$  ارتفاع المان،  $n_{ce}$  تعداد المان و  $\varepsilon_{t,ce}$  کرنش المان می‌باشد. ارتفاع المان بکار رفته 40 سانتیمتر و میزان تغییر شکل المان در حین پلاستیک‌شدگی، 50 درصد می‌باشد که به صورت زیر تعداد المان بکار گرفته شده در تونل حاصل می‌شود.

$$\Delta c_{ce} = 0.5 \times n_{ce} \times 0.4$$

$$\varepsilon_{t,1-2} = \Delta c_{ce} / 2\pi R$$

با جایگذاری معادله:

$$0.5 \times n_{ce} \times 0.4 / 2\pi R = u_{1,1-2} / R$$

$$n_{ce} = 9$$

با توجه به روابط بالا تعداد المان بکار گرفته شده در تونل تقریباً 9 عدد می‌باشد.

### 5- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، ارائه روش‌های مورد استفاده در تحلیل شرایط مجال‌شوندگی فضاهای زیرزمینی و مقایسه روش‌های مختلف جهت طراحی می‌باشد و در ادامه انواع سیستم‌های نگهداری، از جمله سیستم‌های نگهداری فعال و غیرفعال و اندرکنش آن با توده سنگ مورد بررسی قرار داده و به تحلیل و طراحی سیستم نگهداری، با بکاربردن قاب کشویی و المان‌های انعطاف‌پذیر HDC جهت کنترل همگرایی بیش از حد، با مدل‌سازی عددی در دو تحلیل جداگانه کرنش صفحه‌ای و آنالیز تقارن تحت مدل رفتاری ویسکوپلاستیک برگرداخته است. نتایج حاصل از این پژوهش شامل موارد زیر می‌باشد:

- در آنالیز زون‌های موجود مسیر تونل، زون T3 دارای بحرانیترین شرایط مجال‌شوندگی بود و مطابق با مدل‌سازی عددی در نمودار رفتار زمین (GRC)، وابستگی شدیدی به زمان داشت.
- در شناسایی شرایط مجال‌شونده روش‌های زیادی از جمله روش‌های تجربی، روش‌های نیمه تجربی و روش‌های تحلیلی ارائه شد که این روش‌ها هم همخوانی خوبی در راستای شناسایی پدیده مجال‌شونده با مدل‌سازی انجام گرفته به خصوص در شرایط غیروابسته به زمان داشتند.
- تنها راه حل منطقی در شرایط مجال‌شوندگی زیاد، اینست که سیستم نگهداری تونل قادر به تغییر شکل، بدون اینکه دچار خرابی در خود شود، باشد. این تغییر شکل نیاز به یک اضافه حفاری

مطمئن دارد که آن هم توسط نومیگرام‌های حاصل شده توسط کانتینی می‌توان به صورت محافظه‌کارانه‌ای استفاده کرد.

- اساسی‌ترین نکته طراحی، تخمین میزان جابجایی در سیستم انعطاف‌پذیر که بایستی اتفاق بیافتد به طوری که شکستی در تونل رخ ندهد.
- میزان تغییرشکل رخ داده توسط سیستم نگهداری در تحلیل کرنش صفحه‌ای نسبت به تحلیل تقارن، دیرتر اتفاق افتاده است.
- یکی از مشکلات تونل‌های عمیق با سنگ ضعیف، همان ناپایداری جبهه می‌باشد که در تحلیل تقارن هم نشان داده شده و می‌توان با تقویت جبهه‌کار با استفاده از داولها به پایداری جبهه کمک کرد.
- طبق بررسی‌های انجام‌شده روی سیستم نگهداری‌ها، سیستم نگهداری پایدارتر است که مقدار تنش تسلیم اولیه بیشتری داشته باشد.

## 6- منابع

[1]. شرکت مهندسی مشاور طاها، 1390، گزارش زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل راه، مطالعات مرحله اول قطعه سوم پروژه آزادراه اراک-خرم آباد

[2] Goel R.K., Jethwa J.L. and Paithakan A.G. (19) – *Tunnelling through the young Himalayas– a case history of the Maneri-Uttarkashi power tunnel*. Engrg. Geol., 39, pp. 31-44.

[3] Don Rose. Revising Terzaghi's Tunnel Rock Load Coefficients. American Rock Mechanics Association. 1982

[4] Hoek, E and Guevara, R. 2009. Overcoming squeezing in the Yacambú-Quibor tunnel, Venezuela. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 42, No. 2, 389 - 418. ;24:309–22.

[5] Itasca(2002). FLAC2D Version 4.0 user's Manual. Minneapolis, USA

[6]. M. Bonini . G. Barla. The Saint Martin La Porte access adit (Lyon–Turin Base Tunnel) revisited. *Tunnelling and Underground Space Technology* 30 (2012) 38–54



## Investigation of flexible maintenance system in rocks with time-dependent behavior, Using symmetry analysis and plane strain analysis

Mehran Mirzaie, Seyyede Shilan Hosseini

1. Tunnel and Geotechnics Department of Rahyab Melal Consulting Engineers Company, [memirzaii@aut.ac.ir](mailto:memirzaii@aut.ac.ir)
2. Tunnel and Geotechnics Department of Rahyab Melal Consulting Engineers Company, [shilan.hosseini@yahoo.com](mailto:shilan.hosseini@yahoo.com)

### ABSTRACT

Tunnelling in a rock with squeezing behavior will lead to large deformations, and it reduces the cross-sectional area even in the tunnel floor. These deformations may either terminate during construction or continue in a long-term period of time. This phenomenon will occur when the induced stresses exceeds the shear strength of rockmass. Support system is needed in order to prevent the continuation of these deformations. Lack of accurate understanding of creep behavior and use of inappropriate behavior models will lead to significant damages. In this research, the behavior of Arak- Khorramabad highway tunnel is studied. The maximum overburden of the study area is 456 meters with a span of 15.30 meters. Then, tunneling in squeezing conditions, mechanism recognition, identification methods, and evaluation of the support system is investigated. In that regard, active and passive support systems and the interaction between the support system and the rock mass was studied. Based on the result, the optimum support system for this particular part of the tunnel is determined. Also, it was observed that the T3 zone has the most squeezing potential due to high overburden and weak rock mass quality. This will lead to large convergence at this section. In order to have a real estimation of the condition, the tunnel designing is carried out with respect to Elasto-plastic condition, time-dependent behavior of Berger criterion (cvisc), and the probability of installing flexible support systems. The optimum support system is determined using hidcon elements and flexible frame based on symmetric and plane-strain analysis.

### KEYWORDS

- squeezing
- support
- creep behavior
- flexibility
- symmetry analysis