

## مدلی تحلیلی برای پیش بینی تغییر مکان های خزشی سنگ اطراف تونل های دایره ای

احمد فهیمی فر<sup>۱</sup>، فرشاد منشی زاده تهرانی<sup>۲\*</sup>

دریافت مقاله : ۸۷/۲/۴

پذیرش مقاله : ۸۸/۳/۶

### چکیده

مقادیر تنش ها و جابجایی های محیط سنگی در حین حفاری فضاهای زیرزمینی دچار تغییراتی می شود که این تغییرات وابسته به هندسه حفاری و زمان می باشد. در رابطه با وابستگی به زمان، اثر پیشروی سینه کار و اثر خزش توده سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله اثر خزش توده سنگ مورد بررسی قرار می گیرد و از ماده برگر که برای بیان خزش توده های سنگی مناسب می باشد، استفاده شده است. در ادامه برای تحلیل تونل های با مقطع دایره و برای رفتار ویسکوالاستیک تحت شرایط هیدرواستاتیک تنش ها، روابط جدیدی برای پیش بینی تغییرات تنش ها و جابجایی ها نسبت به گذشت زمان ارائه شده است. به منظور کنترل صحت روابط تحلیلی پیشنهادی، روابط تحلیلی به دست آمده برای یک تونل تحقیقاتی استفاده شده است. هم چنین برای تونل مورد نظر به کمک نرم افزار Flac تحلیل عددی صورت گرفته است. نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و روابط تحلیلی پیشنهاد شده، تطابق مناسبی با یکدیگر و نتایج ابزاربندی تونل مورد نظر دارد.

کلید واژه ها: عنصر برگر، مدل ویسکوالاستیک، تونل دایره ای

۱- استاد دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

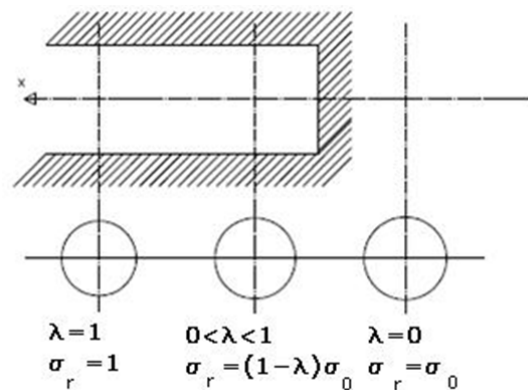
۲- کارشناس ارشد مهندسی خاک و پی دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) farshadm1981@yahoo.com

\* مسئول مکاتبات

مقدمه

محققین بسیاری در رابطه با تحلیل وابسته به زمان تونل‌ها تلاش کرده‌اند (Ladanyi, 1993; Cristescu, 1989; Cristescu, 1993; Hunsche, 1998; Panet, 1993). مطالعات نشان می‌دهد که فشار وارد بر پوشش تونل‌ها با گذشت زمان افزایش می‌یابد. دلیل این پدیده به خاطر خواص مکانیکی وابسته به زمان محیط سنگی پیرامون تونل می‌باشد. از طرف دیگر اگر حایل تونل در قسمت سینه کار بلافاصله پس از حفاری تونل نصب گردد، فشار وارد بر آن با پیشروی تونل افزایش می‌یابد. تاثیر این دو فاکتور مختلف در آنالیز وابسته به زمان حایل باید از یکدیگر متمایز گردد (Sulem et al, 1987).

اثرات حفاری یک تونل در واقع به صورت سه بعدی است که به کمک تحلیل دو بعدی معادل کرنش صفحه‌ای تقریب زده می‌شود. در این تحلیل اثر سینه کار که جابجایی‌های نزدیک خود را محدود می‌کند، به صورت یک تنش مجازی شعاعی با روند کاهشی از مقدار اولیه  $\sigma_0$  در نقاط  $x < -2R$  تا مقدار صفر در نقاط خیلی دور از سینه کار اعمال می‌گردد. چگونگی اعمال این تنش شعاعی مجازی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- تغییرات تنش شعاعی تونل دایره‌ای به ازای میزان پیشروی تونل (Sulem & et al, 1987)

تنش مماسی و شعاعی در حالت الاستیک در اطراف تونل برای شرایط هیدرواستاتیک که تنش‌های اصلی نیز می‌باشند، از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آید (Sulem et al, 1987):

$$\sigma_{\theta} = \left( 1 + \lambda \frac{R^2}{r^2} \right) \sigma_0 \quad (1)$$

$$\sigma_r = \left( 1 - \lambda \frac{R^2}{r^2} \right) \sigma_0 \quad (2)$$

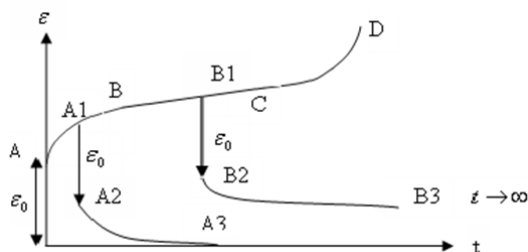
$\lambda$  پارامتر اثر پیشروی سینه کار تونل،  $R$  شعاع تونل و  $r$  فاصله شعاعی هر نقطه از مرکز تونل می‌باشد. مقدار پارامتر  $\lambda$  را می‌توان از رابطه ۳ به دست آورد (Panet & Guenot 1982)

$$\lambda(x) = 0.28 + 0.72 \left[ 1 - \left( \frac{X}{X+x} \right)^2 \right] \quad (3)$$

در این رابطه  $X$  فاصله مقطع مورد بررسی از سینه کار،  $X = 0.84R$  و  $R$  شعاع تونل می‌باشد. مطابق این رابطه مقدار پارامتر  $\lambda$  برای نقاط با فاصله بسیار دور از سینه کار (مطابق شکل ۱) برابر یک می‌شود.

سنگ‌ها رفتارهای وابسته به زمان متفاوتی را می‌توانند تجربه کنند، از جمله آن‌ها می‌توان به تورم، رهاسازی تنش، خزش و موارد دیگر اشاره کرد. در این مقاله منظور از رفتار وابسته به زمان توده‌های سنگی، تنها محدود به بحث خزش آن‌ها می‌شود.

خزش عبارت از تغییر شکل یک ماده تحت بار ثابت در اثر گذشت زمان است. برای بیان خزش مدل‌های بسیاری پیشنهاد شده است (Ladanyi, 1993; Cristescu, 1989; Cristescu & ). تغییرات کرنش خزشی سنگ‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمایش شمانیک خزش سنگ‌ها

مطابق شکل می‌توان کرنش خزشی را به سه ناحیه عمده تقسیم کرد. در ناحیه اول (محدوده A-B) رفتار سنگ ویسکوالاستیک است، یعنی با برداشتن بار وارده بر روی

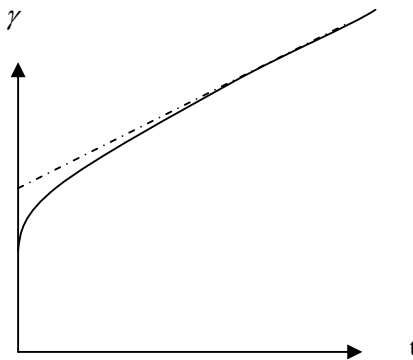
تغییرات کرنش وابسته به زمان در این ماده مطابق رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_1(t) = \frac{2\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3G_2} + \frac{\sigma_1}{3G_1} - \frac{\sigma_1}{3G_1} \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) + \frac{\sigma_1 t}{3\eta_2} \quad (4)$$

در این رابطه K مدول بالک،  $G_1$  مدول ماده کلونین،  $\eta_1$  میرایی ماده کلونین،  $G_2$  مدول ماده ماکسول و  $\eta_2$  میرایی ماده ماکسول می‌باشد.

تغییرات کرنش نسبت به زمان در این مدل در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ماده برگر به خوبی می‌تواند با دو ناحیه ابتدایی منحنی خزش سنگ‌ها (خزش اولیه و ثانویه) تطابق یابد.

با استفاده از ماده برگر و لحاظ کردن اثر پیشروی سینه کار، مدلی تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار درازمدت توده سنگی که در آن تونل حفاری می‌شود، پیشنهاد شده است.



شکل ۴- نمایش کرنش وابسته به زمان مطابق ماده برگر

(Goodman, 1989)

### استفاده از ماده برگر برای پیش‌بینی تغییر شکل‌های تابع زمان تونل در محیط الاستیک

اگر یک تونل دایره‌ای و در شرایطی که نیازی به هیچ‌گونه سیستم نگهداری برای توده سنگ اطراف تونل نباشد، در نظر گرفته شود. هم‌چنین فرضیات زیر نیز برقرار باشد:

- ۱- رفتار توده سنگ الاستیک خطی باشد؛
- ۲- نسبت تنش‌های افقی به قائم برابر واحد باشد ( $K=1$ )؛
- ۳- از وزن توده سنگ سست شده در سقف تونل صرف نظر شود.

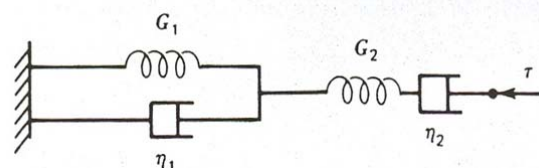
سنگ میزان کرنش با گذشت زمان به صفر می‌رسد. قسمت B-C به خزش ثانویه یا خزش پایدار مشهور است. در ناحیه C-D (ناحیه سوم) سنگ به سمت خردشدگی کامل پیش می‌رود.

یکی از راه‌های بیان پدیده خزش استفاده از مدل‌های کلاسیک می‌باشد. این مواد از ترکیب سری و موازی المان‌های فنر و میراگر تشکیل یافته‌اند. از انواع این مواد می‌توان به ماده ماکسول، ماده کلونین، ماده کلونین اصلاح شده و ماده برگر اشاره کرد.

سولم و همکاران وی (Sulem et al, 1987) با استفاده از ماده کلونین اصلاح شده و با در نظر گرفتن اثر سینه کار بر تغییر مکان‌های اطراف تونل، روش حل بسته‌ای برای تغییر مکان‌های تابع زمان تونل‌های دایره‌ای تحت تنش هیدرواستاتیک را ارائه دادند. طبیعی است که مدل کلونین اصلاح شده صرفاً قادر به تعیین کرنش‌های آنی (مستقل از زمان) و نیز نشان دادن خزش اولیه در سنگ بوده و نمی‌تواند توسط آن خزش‌های ثانویه و پایدار را در سنگ‌ها و به تبع آن در توده‌های اطراف تونل‌ها پیش‌بینی نمود. در حالی‌که ماده برگر که ترکیبی از دو ماده کلونین و ماکسول است قادر به مدل‌سازی کامل‌تری از رفتار تابع زمان سنگ‌ها می‌باشد.

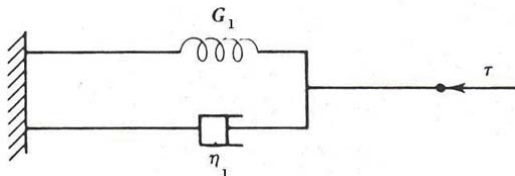
در این مقاله با استفاده از ماده برگر و برای تونل‌های دایره‌ای تحت شرایط تنش هیدرواستاتیک و در حالت توده سنگ الاستیک اطراف تونل، روابط لازم استخراج شده و بر این اساس تغییر مکان‌های خزشی تونل، در نقاط نزدیک و دور از سینه کار پیش‌بینی شده است. در ادامه با استفاده از روش عددی (نرم افزار Flac) و نیز استفاده از نتایج ابزاربندی در یک تونل تحقیقاتی، مدل ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته است.

ماده برگر از ترکیب سری دو ماده ماکسول و کلونین تشکیل یافته است. این ماده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- ماده برگر (Panet & Guenot, 1982)

با اعمال تنش‌های تفاضلی مطابق روابط ۵ و ۶ در عنصر برگر، معادله دیفرانسیل کرنش‌های تابع زمان توده سنگ اطراف تونل را می‌توان به دست آورد. به منظور سهولت، روابط هر یک از دو عنصر کلومین و ماکسول به صورت جداگانه استخراج شده و در نهایت با یکدیگر ترکیب می‌شود. عنصر کلومین در شکل ۶ نشان داده شده است:



شکل ۶- ماده کلومین (Goodman, 1989)

رابطه دیفرانسیلی مدول در این عنصر مطابق رابطه ۷ می‌باشد (Goodman, 1989).

$$G = \eta_1 \frac{d}{dt} + G_1 \quad (7)$$

که در این رابطه مدول عنصر کلومین و  $\eta_1$  میرایی آن می‌باشد.

برای کرنش اصلی بزرگتر در این عنصر می‌توان نوشت:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \frac{\sigma_1^{dev}}{2G} = \frac{\sigma_0}{2G} = \frac{\sigma_0}{2\left(\eta_1 \frac{d}{dt} + G_1\right)} \quad (8)$$

همچنین کرنش اصلی کوچکتر در این عنصر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_r = \frac{\sigma_3^{dev}}{2G} = -\frac{\sigma_0}{2G} = \frac{-\sigma_0}{2\left(\eta_1 \frac{d}{dt} + G_1\right)} \quad (9)$$

اگر شرایط اولیه یعنی کرنش در لحظه شروع (t=0) برای ماده کلومین مطابق رابطه ۱۰ فرض شود:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(0) = 0 \\ \varepsilon_3(0) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

با انتگرال‌گیری نسبت به زمان از رابطه ۸ و لحاظ کردن شرایط اولیه می‌توان نوشت:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \frac{\sigma_0}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (11)$$

برای کرنش شعاعی نیز می‌توان نوشت:

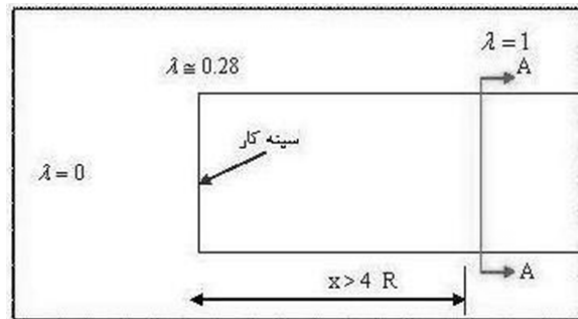
$$\varepsilon_3 = \varepsilon_r = -\frac{\sigma_0}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (12)$$

۴- شرایط تقارن محوری (axisymmetry) برقرار باشد.

در این صورت روابطی برای بیان رفتار وابسته به زمان تونل به دست می‌آید که در ادامه مقاله به روند استخراج این روابط اشاره خواهد شد.

شرایط سینه کار در شکل (۵) نشان داده شده است. در این حالت فرض شده است که مقطع مورد بررسی در فاصله بسیار دور از سینه کار قرار گرفته است.

حالت الف - مقطع مورد بررسی بسیار دور از سینه کار قرار دارد (به عنوان مثال فاصله مقطع از ۴ برابر شعاع تونل بیش‌تر است (مقطع A-A در شکل ۵).



شکل ۵- شرایط سینه کار (مقطع مورد بررسی بسیار دور از سینه کار است)

در شرایط هیدرواستاتیک تنش‌ها، تنش برشی ناشی از حفاری تونل به علت تقارن برابر صفر بوده لذا تنش‌ها در این حالت تنش‌های اصلی هستند. در این صورت مقادیر تنش‌های مماسی و شعاعی در این مقطع بر روی جدار تونل با استفاده از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آید ( $\lambda=1, \rho=R$ ):

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_\theta = 2\sigma_0 \\ \sigma_3 = \sigma_r = 0 \end{cases}$$

$\sigma_1$  تنش اصلی بزرگ‌تر و  $\sigma_3$  تنش اصلی کوچک‌تر در مقطع A-A می‌باشد.

در این حالت برای تنش میانگین می‌توان نوشت:

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{2\sigma_0 + 0}{2} = \sigma_0$$

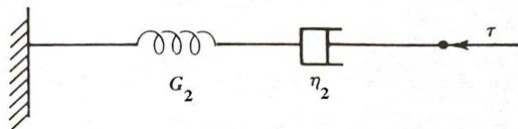
از طرف دیگر مقادیر تنش‌های انحرافی (تفاضلی) به صورت روابط ۵ و ۶ بیان می‌شوند:

$$\sigma_1^{dev} = \sigma_1 - \sigma_{mean} = 2\sigma_0 - \sigma_0 = \sigma_0 \quad (5)$$

$$\sigma_3^{dev} = \sigma_3 - \sigma_{mean} = 0 - \sigma_0 = -\sigma_0 \quad (6)$$

در این رابطه  $G_1$  مدول ماده کلونین و  $\eta_1$  میرایی ماده کلونین می‌باشد.  $G_2$  مدول ماده ماکسول،  $\eta_2$  میرایی ماده ماکسول و  $R$  شعاع تونل می‌باشد. هم‌چنین باید توجه داشت که پارامتر زمان از لحظه‌ای در نظر گرفته می‌شود که فاصله سینه کار از مقطع مورد بررسی به اندازه کافی دور شده باشد ( $t=0$ ،  $x > 4R$ ).

رابطه به دست آمده مشابه روابط موجود برای آزمایش دیلاتومتری خزشی سنگ‌ها می‌باشد که توسط گودمن استخراج شده است (Goodman, 1989). به این ترتیب می‌توان پارامترهای مدل تحلیلی اشاره شده در این مقاله را با انجام آزمایش دیلاتومتری بر روی توده سنگ اطراف تونل به دست آورد.



شکل ۷- ماده ماکسول (Goodman, 1989)

در این شرایط اگر تغییر مکان دو نقطه مقابل هم روی جدار تونل (دو انتهای قطر تونل) در طی زمان اندازه‌گیری شود (یعنی همگرایی تونل)، مقدار همگرایی تونل برابر خواهد بود با:

$$C(t) = 2[u_r(t) - u_0] \quad (20)$$

در این رابطه  $C(t)$  همگرایی وابسته به زمان تونل،  $u_r(t)$  میزان جابجایی یک نقطه روی جدار تونل در طی زمان و  $u_0$  میزان جابجایی به وقوع پیوسته دیواره تونل در زمان شروع اندازه‌گیری همگرایی می‌باشد. بدیهی است که بر میزان همگرایی در طی زمان به علت وقوع پدیده خزش افزوده خواهد شد.

با اعمال رابطه ۱۹ در رابطه ۲۰ میزان همگرایی به صورت رابطه ۲۱ به دست می‌آید:

$$C(t) = \frac{\sigma_0 R t}{\eta_2} + \frac{\sigma_0 R}{G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (21)$$

برای ماده ماکسول که در شکل ۷ نشان داده شده است، رابطه دیفرانسیلی مدول این عنصر (Goodman, 1989) عبارت‌است از:

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{\eta_2} \frac{d}{dt} + \frac{1}{G_2} \quad (13)$$

در این ماده شرایط اولیه مطابق رابطه (۱۴) در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(0) = \frac{\sigma_0}{2G_2} \\ \varepsilon_3(0) = \frac{-\sigma_0}{2G_2} \end{cases} \quad (14)$$

این شرایط بر اساس مقادیر کرنش‌های ناشی از حفاری در یک محیط الاستیک انتخاب شده است.

برای ماده ماکسول با طی کردن مسیر مشابه ماده کلونین برای کرنش مماسی و شعاعی به ترتیب روابط ۱۵ و ۱۶ به دست می‌آید:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \frac{\sigma_0 t}{2\eta_2} + \frac{\sigma_0}{2G_2} \quad (15)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_r = \frac{-\sigma_0 t}{2\eta_2} - \frac{\sigma_0}{2G_2} \quad (16)$$

با جمع روابط مواد کلونین و ماکسول، روابط ماده برگر به دست می‌آید. به این ترتیب کرنش مماسی برای تونل دایره‌ای در این شرایط به صورت رابطه ۱۷ بیان می‌شود (جمع روابط ۱۱ و ۱۵):

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \frac{\sigma_0 t}{2\eta_2} + \frac{\sigma_0}{2G_2} + \frac{\sigma_0}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (17)$$

هم‌چنین کرنش شعاعی برای تونل دایره‌ای در این شرایط برابر خواهد بود با:

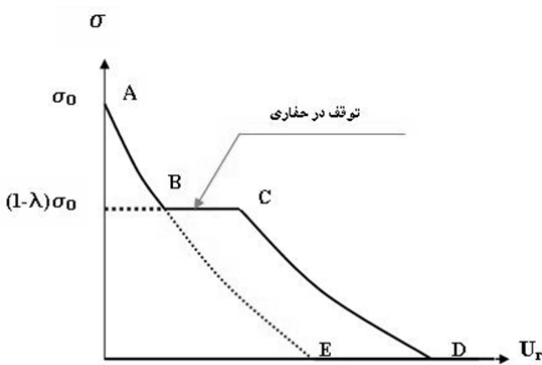
$$\varepsilon_3 = \varepsilon_r = -\frac{\sigma_0 t}{2\eta_2} - \frac{\sigma_0}{2G_2} - \frac{\sigma_0}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (18)$$

با انتگرال‌گیری از کرنش شعاعی (در این حالت، فاصله شعاعی المان از مرکز تونل، متغیر است)، میزان جابجایی شعاعی دیواره تونل در شرایط الاستیک مطابق رابطه ۱۹ به دست می‌آید:

$$U_r(t) = -\frac{\sigma_0 R t}{2\eta_2} - \frac{\sigma_0 R}{2G_2} - \frac{\sigma_0 R}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (19)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_1(0) = \frac{\lambda \sigma_0}{2G_2} \\ \varepsilon_3(0) = \frac{-\lambda \sigma_0}{2G_2} \end{cases} \quad (26)$$

مطابق روند مشابهی که در حالت الف برای این ماده دنبال شده، برای کرنش مماسی و شعاعی در ماده ماکسول به ترتیب روابط ۲۷ و ۲۸ به دست می‌آید:



شکل ۸- منحنی مشخصه زمین برای مقطعی با فاصله  $X < 4R$  از سینه کار

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \frac{\lambda \sigma_0}{2G_2} + \frac{\lambda \sigma_0 t}{2\eta_2} \quad (27)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_r = -\frac{\lambda \sigma_0}{2G_2} - \frac{\lambda \sigma_0 t}{2\eta_2} \quad (28)$$

با جمع روابط دو ماده اشاره شده (روابط ۲۴ و ۲۷ برای کرنش مماسی و روابط ۲۵ و ۲۸) کرنش مماسی و کرنش شعاعی به ترتیب برای تونل در این شرایط برابر خواهد بود با:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \frac{\lambda \sigma_0}{2G_2} + \frac{\lambda \sigma_0 t}{2\eta_2} + \frac{\lambda \sigma_0}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (29)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_r = -\frac{\lambda \sigma_0}{2G_2} - \frac{\lambda \sigma_0 t}{2\eta_2} - \frac{\lambda \sigma_0}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (30)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه ۳۰، (نسبت به متغیر فاصله شعاعی) تغییر مکان شعاعی به دست می‌آید:

$$U_r(t) = \frac{\lambda R \sigma_0}{2G_2} - \frac{\lambda \sigma_0 R t}{2\eta_2} - \frac{\lambda \sigma_0 R}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (31)$$

حالت ب- مقطع بین سینه کار و مقطع A-A قرار دارد: مقطع جدید مورد بررسی به صورتی است که از سینه کار اثر می‌پذیرد. با فاصله گرفتن سینه کار از مقطع مورد بررسی از میزان تنش شعاعی کاسته و بر میزان جابجایی شعاعی افزوده خواهد شد. این حالت در شکل ۸ نشان داده شده است (قسمت AB در شکل ۸). بدیهی است که میزان تغییرات تنش شعاعی بر حسب جابجایی شعاعی دیواره تونل (منحنی مشخصه تونل) در حالت الاستیک خطی می‌باشد، در صورتی که در حالت تحلیلی ویسکوالاستیک منحنی مشخصه تونل غیرخطی است (مطابق شکل ۸).

در صورتی که حفاری‌ها برای مدتی توقف یابد، برای مقدار معینی از  $\lambda$  (پارامتر لحاظ کننده اثر پیشروی سینه کار تونل) و با فرض ثابت ماندن مقدار تنش، بر میزان جابجایی افزوده می‌شود (قسمت BC در شکل ۸). این تغییر شکل به وقوع پیوسته در تنش ثابت، تنها به علت خزش صورت می‌پذیرد. در این حالت نیز تنش‌های مماسی و شعاعی بر روی جدار تونل از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آید:

$$\sigma_1 = \sigma_\theta = (1 + \lambda) \sigma_0$$

$$\sigma_3 = \sigma_r = (1 - \lambda) \sigma_0$$

هم‌چنین برای تنش میانگین می‌توان نوشت:

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \sigma_0$$

در این حالت مقادیر تنش‌های انحرافی به صورت روابط ۲۲ و ۲۳ به دست می‌آید:

$$\sigma_1^{dev} = \sigma_1 - \sigma_{mean} = (1 + \lambda) \sigma_0 - \sigma_0 = \lambda \sigma_0 \quad (22)$$

$$\sigma_3^{dev} = \sigma_3 - \sigma_{mean} = (1 - \lambda) \sigma_0 - \sigma_0 = -\lambda \sigma_0 \quad (23)$$

با در نظر گرفتن شرایط اولیه مشابه قسمت الف و انتگرال‌گیری نسبت به زمان برای ماده کلومین می‌توان نوشت:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \frac{\lambda \sigma_0}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (24)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_r = -\frac{\lambda \sigma_0}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (25)$$

شرایط اولیه یعنی کرنش در لحظه شروع (t=0) برای ماده ماکسول در این حالت به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

از طرفی مقدار تنش شعاعی در جدار تونل طبق رابطه ۲ برابر است:

$$\sigma_r = (1 - \lambda_d) \sigma_0 \quad (35)$$

با مساوی قرار دادن دو رابطه ۳۴ و ۳۵ (تعداد سیستم نگهداری با توده سنگ اطراف تونل) می‌توان با در نظر گرفتن مقداری به عنوان فشار وارد بر حائل که کم‌تر از فشار نهایی حائل باشد ( $P_S < P_{S_{max}}$ ) زمان رسیدن به تعادل را از رابطه ۳۴ به دست آورد.

### تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار FLAC

با استفاده از نرم‌افزار FLAC Ver4.00 مقایسه‌ای به منظور کنترل صحت مدل تحلیلی به دست آمده صورت می‌گیرد. برای این منظور ابتدا می‌بایست نرم افزار مورد استفاده کالیبره شود تا مشخص شود که نتایج به دست آمده از آن قابل استناد می‌باشد. لذا با مدل‌سازی یک تونل تحقیقاتی به نام Quatre-chemins و کنترل نتایج به دست آمده از نرم‌افزار با مقایسه با روابط تحلیلی برای این تونل، صحت نتایج تحلیل عددی بررسی می‌شود.

سولم و همکاران وی برای این‌که صحت روابط پیشنهادی خود را کنترل نمایند، از نتایج ابزاربندی تونل Quatre chemins استفاده نمودند (Sulem et al, 1987). این تونل، یک تونل دایره‌ای به طول ۳۸ متر به شعاع  $R=1.5$  متر در عمق حدود ۸۵ متری از سطح زمین در یک توده سنگ مارنی به منظور اهداف تحقیقاتی احداث شده است. مشخصات توده سنگ مارن در جدول ۱ آورده شده است (Sulem et al, 1987).

به منظور ابزاربندی این تونل از همگرایی‌سنج استفاده شده است. میزان همگرایی دیواره تونل از شروع حفاری، در زمان توقف در حفاری و در درازمدت اندازه‌گیری شده است (Sulem et al, 1987). در این مقاله با استفاده از نتایج اندازه‌گیری این تونل میزان جابجایی به وقوع پیوسته دیواره آن در طی زمان، استخراج شده است (جدول ۲).

در این رابطه  $\lambda$  پارامتر لحاظ‌کننده اثر پیشروی تونل،  $G_1$  مدول ماده کلومین،  $\eta_1$  میرایی عنصر کلومین،  $G_2$  مدول ماده ماکسول،  $\eta_2$  میرایی ماده ماکسول و  $R$  شعاع تونل می‌باشد. هم‌چنین  $t$  پارامتر زمان بوده که برای لحظه صفر، سینه کار بر مقطع مورد بررسی منطبق می‌باشد (در لحظه  $x=0, t=0$  خواهد بود). میزان همگرایی در این حالت برابر خواهد بود با:

$$C(t) = \frac{\lambda \sigma_0 R t}{\eta_2} + \frac{\lambda \sigma_0 R}{G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (32)$$

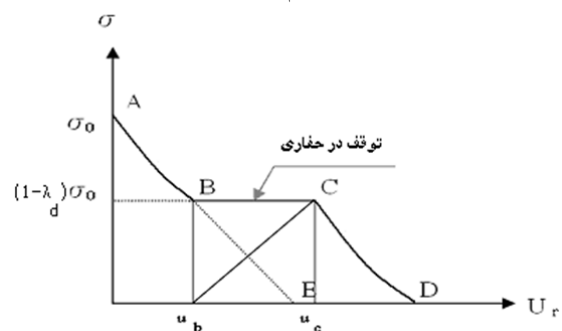
حالت ج- در صورت وجود حائل (نصب سیستم نگهداری): اگر مطابق شکل ۹ فرض شود که سیستم نگهداری در زمان ابتدای توقف حفاری نصب شده باشد، می‌توان نوشت (با استفاده از رابطه ۳۱):

$$u_c = u_b + \frac{\lambda_d \sigma_0 R t}{2\eta_2} + \frac{\lambda_d \sigma_0 R}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (33)$$

در این رابطه  $\lambda_d$  پارامتر تاثیر سینه کار و  $u_b$  میزان تغییر مکان دیواره تونل در زمان ابتدای توقف حفاری می‌باشد. در صورتیکه در نقطه C حائل و توده سنگ با هم به تعادل برسند، مقدار فشار حائل برابر خواهد بود با:

$$P_S = K_S (u_c - u_B) = K_S \left( \frac{\lambda_d \sigma_0 R t}{2\eta_2} + \frac{\lambda_d \sigma_0 R}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \right) \quad (34)$$

در این رابطه  $K_S$  سختی سیستم نگهداری است.



شکل ۹- منحنی مشخصه زمین برای مقطعی با فاصله  $X < 4R$  از سینه کار

## مقایسه مدل تحلیلی ارائه شده با نتایج Flac و ابزاربندی در حالت الاستیک

حفاری تونل Quatre chemins در شرایط الاستیک، در حالتی که مقدار  $\lambda = 0.53$  و فاصله مقطع مورد بررسی از سینه کار برابر  $x=0.2$  m بود، به مدت سه روز توقف یافت (Sulem et al, 1987). سرعت حفاری در این مقطع از تونل به اندازه ۰/۲ متر، با زمان ۰/۲ گذشته است.

### جدول ۱- مشخصات مکانیکی توده سنگ تونل Quatre

(Sulem et al, 1987) chemins

$\sigma_c$ (MPa)	C (MPa)	$\varphi$	$\nu$	E (MPa)
۲	۰/۵	۳۰	۰/۴	۳۶۰

### جدول ۲- میزان جابجایی های استخراج شده دیواره تونل مورد

بررسی در طی زمان

زمان (t) بر حسب روز	۰	۰/۲	۳
جابجایی شعاعی دیواره تونل بر حسب میلی متر	۵/۶	۸/۴	۱۴

میزان جابجایی دیواره تونل با توجه به گزارش های سولم و همکاران وی (Sulem et al, 1987) به صورت جدول ۲ استخراج شده است: با بهره گیری از نرم افزار Excel با تطابق دادن رابطه ۳۱ به نتایج استخراج شده در جدول ۲، پارامترهای مورد نیاز برای رابطه ۳۱ مطابق جدول ۳ به دست آمده است:

### جدول ۳- پارامترهای مدل زمانی ورودی به نرم افزار برای تحلیل

وابسته به زمان

$\eta_v$ (MPa-Day)	$\eta_h$ (MPa-Day)	$G_v$ (MPa)	$G_h$ (MPa)
۵۰۰	۴۰	۱۲۸/۵۷	۱۸۰

$G_1$  مدول ماده کلومین،  $\eta_1$  میرایی ماده کلومین،  $G_2$  مدول ماده ماکسول و  $\eta_2$  میرایی ماده ماکسول می باشد.

به منظور کنترل مدل تحلیلی، با استفاده از نرم افزار FLAC مدلی از تونل مورد بررسی تهیه شد. با استفاده از پارامترهای به دست آمده از جدول ۲، تحلیل خزشی این تونل انجام شد که نتایج جابجایی دیواره تونل در ابتدای زمان توقف حفاری در شکل ۱۰ آورده شده است:

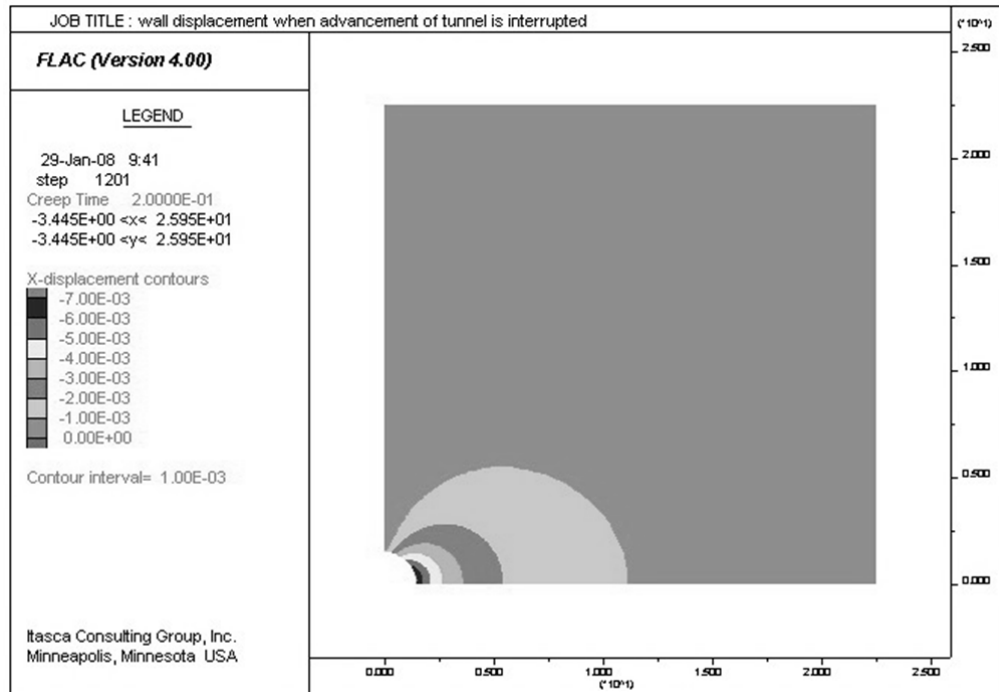
جابجایی دیواره تونل بعد از گذشت سه روز توقف حفاری در شکل ۱۱ نشان داده شده است:

مطابق شکل ۱۱ میزان جابجایی دیواره بعد از سه روز بر اساس روش عددی حدود ۱۲/۵ میلی متر به دست آمد. در حالت استفاده از روابط تحلیلی یعنی استفاده از رابطه ۳۳ میزان جابجایی دیواره بعد از سه روز ۱۴ میلی متر به دست آمد. هم چنین میزان جابجایی دیواره تونل پس از سه روز توقف در حفاری بر اساس نتایج ابزاربندی (مطابق جدول ۲) در حدود ۱۴ میلی متر اندازه گیری شد (Sulem et al, 1987). نتایج به دست آمده به ازای پارامترهای خزشی اشاره شده در جدول ۳ نشان داده شده اند.

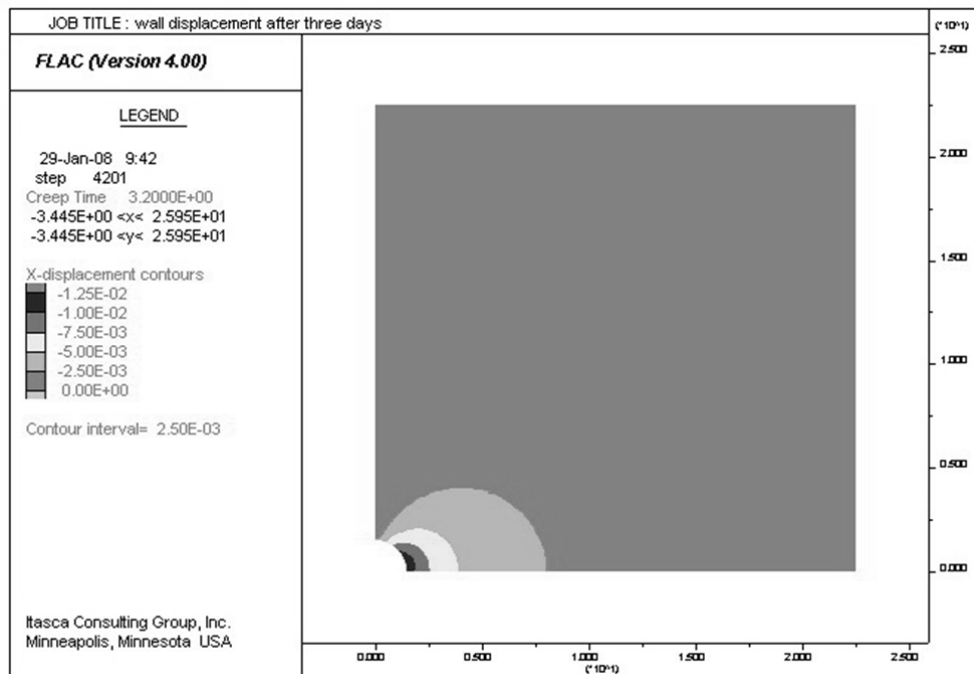
## نتیجه گیری

با استفاده از عنصر برگر که عنصری کامل برای بیان خزش سنگ ها در دو ناحیه اولیه و ثانویه خزش می باشد، برای تونل ها در صورت الاستیک کامل بودن محیط و برقراری شرایط هیدرواستاتیک تنش ها، مدل خزشی جدیدی به دست آمد. این مدل قادر است تغییر شکل های خزشی توده سنگ جدار تونل در هنگام توقف در حفاری و میزان جابجایی های دیواره تونل در درازمدت را برای مقاطع مختلف تونل پیش بینی کند. با مقایسه نتایج تحلیلی مثال اشاره شده با نتایج تحلیل عددی (به کمک نرم افزار FLAC) و نتایج ابزاربندی تونل، این مدل با تطابق مناسب مورد ارزیابی قرار گرفت.





شکل ۱۰- نمودار کانتوری جابجایی دیواره تونل در زمان ابتدای توقف در حفاری (بزرگ‌ترین جابجایی در دیواره، ۷ میلی‌متر). محور X و Y ابعاد مدل بر حسب ۱۰ متر (ابعاد نشان داده شده در ۱۰ ضرب می‌شوند)



شکل ۱۱- نمودار کانتوری جابجایی دیواره تونل بعد از سه روز توقف حفاری (بزرگ‌ترین جابجایی در دیواره ۱۲/۵ میلی‌متر). محور X و Y ابعاد مدل بر حسب ۱۰ متر (ابعاد نشان داده شده در ۱۰ ضرب می‌شوند)

## منابع

- Ladanyi B. (1993) "Time dependent response of rock around tunnel", Rock Comprehensive Engineering, Vol 2, pp. 77-112.
- Cristescu N. D. (1989) "Rock rheology", 1<sup>st</sup> Edn. , Kluwer Academic Publishers.
- Cristescu N. D. , Hunsche U. (1998) "Time effect in rock mechanics", 1<sup>st</sup> Edn. , Wiley, New York.
- Panet M. (1993) "Understanding deformations in tunnels" , Rock Comprehensive Engineering, Vol 2, pp. 663-690.
- Sulem J., Panet M., Guenot A. (1987) "An analytical solution for time-dependent displacements in circular tunnel" , Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol 24, No. 3, pp. 155-164.
- Panet M., Guenot A. (1982) "Analysis of convergence behind the face of a tunnel, proceedings of the 3rd international symposium, Brighton, 7-11 June", pp.197-204.
- Goodman R. E. (1989) "Introduction to rock mechanics", 2<sup>nd</sup> Edn. , Wiley ,New York.