مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۶، شماره‌ی ۲، ص. ۶۷-۷۲

روشی تحلیلی برای تخمین تغییر شکل‌های خزشی جدار تونل‌های دایروی

احمد فهیمی‌فر (استاد)
فرشاد منشی‌زاده تهرانی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تغییرشکل‌های ایجادشده در هنگام حفاری تونل‌ها به میزان پیشروی تونل، خواص رئولوژیکی توده‌سنگ اطراف تونل و زمان نصب سیستم نگه‌داری وابسته است. در این نوشتار تحلیل تونل‌ها با مقطع دایره و برای رفتار خزشی تحت شرایط هیدرواستاتیک تنش‌ها بررسی شده است. با استفاده از معیار تسلیم موهر_کولمب در صورت تسلیم‌شدن توده‌سنگ اطراف تونل در این شرایط، به‌منظور پیش‌بینی تغییرشکل‌های خزشی مدل تحلیلی جدیدی به دست آمده است. روابط جدید برای یک تونل تحقیقاتی مورد استفاده قرارگرفت و نتایج حاصل از آن با تحلیل عددی نرم‌افزار FLAC مقایسه شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که مدل یادشده از صحت و دقت بالایی برخوردار است.

واژگان کلیدی: مدل برگر، تونل‌های دایروی، خزش.

fahim@aut.ac.ir
farshadm1981@yahoo.com

مقدمه

در حین حفاری تونل، بر میزان جابه‌جایی دیواره‌ی تونل و فشار وارده بر سیستمِ نگه‌داری افزوده خواهد شد. دو دلیل مهم می‌توان برای این امر برشمرد: یکی به‌علت پیشروی سینه کار تونل و دیگری به‌دلیل خواص وابسته به زمانِ محیط اطراف تونل؛ در تحلیل‌ها می‌بایست سهم هریک از این دو پدیده از یکدیگر تفکیک شود.

برای «مقاطع نزدیک به سینه کار» ـ مقاطعی که فاصله‌ی طولی‌شان از سینه کار کم‌تر از دو تا سه برابر قطر تونل است ـ جابه‌جاییِ رخداده در دیواره‌ی تونل عمدتاً ناشی از اثر پیشروی سینه کار خواهد بود. مؤلفین مختلف به‌کمک توابع متفاوت، به بیان ارتباط تجربی میان فاصله‌ی مقطع از سینه کار با جابه‌جاییِ رخداده در دیواره‌ی تونل پرداخته‌اند.[۱،۲] رابطه‌ی ۱، نمونه‌یی از این توابع است:[۳]

$$\lambda(x) = ۰/۲۸ + ۰/۷۲\left[۱ - (\frac{۰/۸۴R}{۰/۸۴R + x})^۲\right] \quad (۱)$$

در این رابطه λ پارامتر لحاظ‌کننده‌ی اثر پیشروی تونل، x فاصله‌ی مقطع مورد بررسی از سینه کار و R شعاع تونل است. برای «مقاطع دور از سینه کار» ـ مقاطعی که فاصله‌ی بیشتری از فاصله‌ی ذکر شده از سینه کار دارند ($\lambda = ۱$) ـ جابه‌جایی‌های ایجادشده در دیواره براثر رفتار وابسته به زمانِ توده است (اثر خزش). پدیده‌ی خزش توسط محققین زیادی مورد بررسی قرارگرفته است و در این رابطه مدل‌های متعددی پیشنهاد شده است.[۴-۶]

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۷/۸، داوری ۱۳۸۸/۵/۱۳، پذیرش ۱۳۸۸/۹/۲۲.

مطالعه‌ی موردی بر روی چند تونل ابزاربندی شده نشان می‌دهد که از کل تغییر مکان ایجادشده در دیواره‌ی تونل، دست‌کم ۵۰ درصد آن تغییر مکانِ وابسته به زمان است.[۷] به همین منظور، با در نظر گرفتن اثر سینه کار بر تغییر مکان‌های اطراف تونل و نیز با استفاده از مدل خزشیِ کلوینِ اصلاح‌شده برای بیان رفتار وابسته به زمان توده، روش حل بسته‌یی برای تغییرمکان‌های تابع زمان تونل‌های دایره‌یی تحت تنش هیدرواستاتیک ارائه شده است.[۸] در حالت کشسان، تنش مماسی و شعاعی برای مقاطع نزدیک به سینه کار از روابط ۲ و ۳ به دست می‌آید:[۸]

$$\sigma_r = \left(۱ - \lambda\frac{R^۲}{r^۲}\right)\sigma_۰ \quad (۲)$$

$$\sigma_\theta = \left(۱ + \lambda\frac{R^۲}{r^۲}\right)\sigma_۰ \quad (۳)$$

که در آن R شعاع تونل، r فاصله‌ی شعاعی از مرکز تونل و در امتداد شعاع تونل، و $\sigma_۰$ مقدار تنش اولیه است. چنانچه تنش‌ها به حد تسلیم برسند، مقادیر تنش‌های شعاعی و مماسی برای جدار تونل در لحظه‌ی تسلیم، مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:[۸]

$$\begin{cases}\sigma_\rho = \sigma_۰(۱ - \lambda_e)\\ \sigma_\theta = \sigma_۰(۱ + \lambda_e)\end{cases} \quad (۴)$$

λ_e مقداری خاص از پارامتر λ است که اثر پیشروی سینه کار را لحاظ می‌کند و به‌ازای $\lambda_e < \lambda$ ناحیه‌ی خمیری اطراف تونل تشکیل می‌شود. این ناحیه به‌شکل

دایره‌یی به‌شعاع r_p در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که از معیار موهرـکولمب برای تشخیص تسلیم توده زمین استفاده شود:[۸]

$$\sigma_\theta = K_P \sigma_r + \sigma_C \quad (۵)$$

σ_c مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ یا خاک اطراف تونل است K_P نیز ضریبی است که مقدار آن برابر است با (رابطه‌ی ۶):[۸]

$$K_P = \frac{۱ + \sin\varphi}{۱ - \sin\varphi} \quad (۶)$$

φ زاویه‌ی اصطکاک داخلی توده است. مقدار λ_e در این حالت عبارت است از:[۸]

$$\lambda_e = \frac{۱}{K_P + ۱}\left(K_P - ۱ + \frac{\sigma_C}{\sigma_۰}\right) \quad (۷)$$

طبیعی است که مدل کلوین اصلاح‌شده صرفاً قادر به تعیین کرنش‌های آنی (مستقل از زمان) و نیز نشان‌دادن خزش اولیه در توده است و نمی‌توان توسط آن خزش‌های ثانویه و پایدار در توده‌های اطراف تونل‌ها را پیش‌بینی کرد. این در حالی است که عنصر برگر که ترکیبی از دو عنصر کلوین و ماکسول است قادر به مدل‌سازی کامل‌تری از رفتار تابع زمان مصالح است.

در این نوشتار با استفاده از عنصر برگر روابط لازم برای تونل‌های دایره‌یی تحت شرایط تنش هیدرواستاتیک و در حالت توده خمیری‌شده‌ی اطراف تونل استخراج شده و بر همین اساس تغییر مکان‌های خزشی تونل در نقاط نزدیک و دور از سینه کار تونل پیش‌بینی شده است. با استفاده از روابط به دست آمده در این نوشتار، می‌توان مدل‌سازی منطقی‌تری از پدیده‌ی خزش در درازمدت انجام داد. در صورتی که مقدار کرنش خزشی در درازمدت ثابت می‌ماند.[۸] از طرف دیگر، مطابق نتایج ابزاربندی تونل‌ها، چنانچه تونل فاقد سیستم نگه‌داری باشد بر مقدار کرنش خزشی در گذشت زمان افزوده می‌شود (مانند مغارهای احداث‌شده در توده‌سنگ‌های نمکی). بدیهی است در صورت وجود سیستم نگه‌داری،فشار وارده بر سیستم حائل به‌مرور زمان برای مقابله با کرنش‌های خزشی افزایش می‌یابد. این دو مطلب خود گواهی است بر این مدعا که کرنش خزشی بسته به سطح تنش در طی زمان افزایش می‌یابد. در ادامه با استفاده از روش عددی (نرم‌افزار Flac)[۹] و نیز با استفاده از نتایج ابزاربندی در یک تونل تحقیقاتی، مدل ارائه‌شده مورد بررسی قرار گرفته است.

کاربرد مدل برگر برای پیش‌بینی تغییر شکل‌های تابع زمان تونل درصورت خمیری‌شدن توده

مؤلفین در محدوده‌ی کشسان تنش‌ها و با استفاده از عنصر زمانی برگر، برای پیش‌بینی تغییر مکان‌های ایجاد شده در جدار تونل مدلی پیشنهاد داده‌اند.[۱۰] در این نوشتار حالت جدیدی مورد بررسی قرار می‌گیرد که در آن تنش‌ها از محدوده‌ی کشسان فراتر رفته و ناحیه‌یی خمیری در اطراف تونل تشکیل می‌شود. با این فرضیات که:

۱. توده‌ی اطراف تونل رفتار خمیری‌ـکشسانی دارد؛

۲. نسبت تنش‌های افقی به تنش‌های قائم برابر واحد است ($K = ۱$)؛

۳. از وزن توده‌ی سست شده در سقف تونل صرف‌نظر می‌شود؛

۴. شرایط تقارن‌محوری[۱] برقرار است؛

۵. مصالح اطراف تونل تراکم‌ناپذیر است (امکان اتساع وجود ندارد).

در رابطه با فرض اخیر، باید توجه داشت در صورتی که امکان اتساع در نظر گرفته شود، روابطی که میزان تغییر شکل ایجادشده در جدار ناشی از حفاری تونل را بتواند پیش‌بینی کند، شکل بسیار پیچیده‌یی پیدا خواهد کرد. ممکن است این روابط را نتوان به‌صورت حل بسته ارائه کرد. همچنین در فرضیات به‌طور ضمنی رفتار توده سنگ خمیری‌ـکشسانی کامل در نظر گرفته شده است. رفتار خمیری کامل خود بیان‌گر ثابت‌ماندن کرنش حجمی است. براساس آزمایشات تک‌محوری و سه‌محوری انجام‌شده بر اکثر سنگ‌ها، در لحظه‌ی تسلیم مقدار نسبت پواسون حدود ۰/۵ است که این نیز ناشی از عدم امکان اتساع در لحظه‌ی تسلیم است. بدیهی است با در نظر گرفتن امکان اتساع، ارائه‌ی روابط منوط به تعریف‌کردن تابع پتانسیل است.

فرض کنید تونلی با مقطع دایره مطابق شکل ۱ حفر می‌شود. فاصله‌ی مقطع A-A در این شکل بیش از چهار برابر شعاع تونل از سینه کار است. لذا مقطع مورد بررسی، مقطع دور از سینه کار است. بنابراین سینه کار بر تغییر مکان‌های مقطع مورد بررسی تأثیری ندارد (یعنی $\lambda = ۱$).

برای سایر مقاطعی که فاصله‌شان کم‌تر از چهار برابر شعاع تونل از سینه کار است λ کوچک‌تر از ۱ خواهد بود ($\lambda < ۱$). هنگامی که $\lambda < \lambda_e$ هیچ منطقه‌یی از دیواره‌ی تونل تسلیم نخواهد شد و لذا تحلیل کشسان است.[۱۰] اما زمانی که $\lambda_e < \lambda$ می‌شود، فرض می‌شود زمین جدار تونل در مقطع مورد بررسی مطابق معیار موهرـکولمب تسلیم شود. تنش شعاعی در جدار تونل با استفاده از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$\sigma_۳ = \sigma_r = (۱ - \lambda)\sigma_۰$$

تنش مماسی با استفاده از رابطه‌ی ۵ در این حالت برابر است با:

$$\sigma_۱ = \sigma_\theta = K_p \sigma_r + \sigma_C = K_p(۱ - \lambda)\sigma_۰ + \sigma_C$$

برای تنش‌های میانگین نیز در این حالت می‌توان نوشت:

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_۱ + \sigma_۳}{۲} = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{۲} = \frac{(K_p + ۱)\,(۱ - \lambda)\sigma_۰ + \sigma_C}{۲}$$

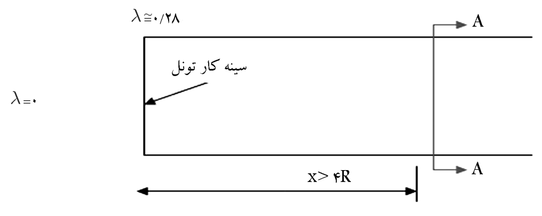
همچنین برای تنش‌های انحرافی می‌توان نوشت:

$$\sigma_۱^{dev} = \sigma_۱ - \sigma_{mean} = \frac{(K_p - ۱)\,(۱ - \lambda)\sigma_۰ + \sigma_C}{۲} \quad (۸)$$

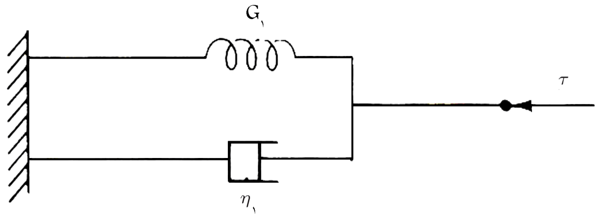
$$\sigma_۳^{dev} = \sigma_۳ - \sigma_{mean} = -\frac{(K_p - ۱)\,(۱ - \lambda)\sigma_۰ + \sigma_C}{۲} \quad (۹)$$

با اعمال تنش‌های تفاضلی مطابق رابطه‌های ۸ و ۹ در عنصر برگر، معادله‌ی دیفرانسیل کرنش‌های تابع زمانِ توده‌ی اطراف تونل را می‌توان به دست آورد. به‌منظور سهولت، روابط هریک از دو عنصر کلوین و ماکسول به‌صورت جداگانه استخراج، و در نهایت با یکدیگر ترکیب می‌شوند. عنصر کلوین در شکل ۲ نشان داده شده است. ارتباط دیفرانسیلی مدول برشی با زمان در این عنصر عبارت است از:[۱۱]

$$G = \eta_۱ \frac{d}{dt} + G_۱ \quad (۱۰)$$



شکل ۱. شرایط سینه کار (مقطع مورد بررسی دور از سینه کار است).



شکل ۲. عنصر کلوین.

که در آن G_1 مدول برشی عنصر کلوین، و η_1 میرایی آن است. برای کرنش اصلی بزرگ‌تر در این عنصر می‌توان نوشت:

$$\varepsilon_1=\varepsilon_\theta=\frac{\sigma_1^{dev}}{2G}=\frac{\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_C}{2}}{2G}=\frac{\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_C}{2}}{2\left(\eta_1\frac{d}{dt}+G_1\right)} \qquad (11)$$

همچنین کرنش اصلی کوچک‌تر در این عنصر چنین بیان می‌شود:

$$\begin{aligned}\varepsilon_2=\varepsilon_r=\frac{\sigma_2^{dev}}{2G}&=-\frac{\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0}{2}+\frac{\sigma_C}{2}}{2G}\\&=-\frac{\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0}{2}+\frac{\sigma_C}{2}}{2\left(\eta_1\frac{d}{dt}+G_1\right)}\end{aligned} \qquad (12)$$

اگر شرایط اولیه یعنی کرنش در لحظه‌ی شروع(t=۰)، برای عنصر کلوین (مبداء زمان می‌تواند شروع توقف در حفاری باشد) عبارت باشد از:

$$\begin{cases}\varepsilon_1(0)=0\\ \varepsilon_2(0)=0\end{cases}$$

با انتگرال‌گیری نسبت به زمان از رابطه‌ی ۱۱ و لحاظ‌کردن شرایط اولیه می‌توان نوشت:

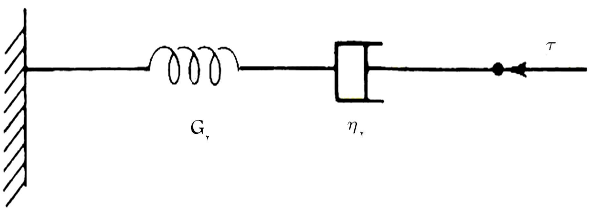
$$\varepsilon_1=\varepsilon_\theta=\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_C}{4G_1}\left[1-\exp\left(-\frac{G_1t}{\eta_1}\right)\right] \qquad (13)$$

برای کرنش شعاعی نیز با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی ۱۲ می‌توان نوشت:

$$\varepsilon_2=\varepsilon_r=-\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_c}{4G_1}\left[1-\exp\left(-\frac{G_1t}{\eta_1}\right)\right] \qquad (14)$$

برای عنصر ماکسول (شکل ۳)، رابطه‌ی دیفرانسیلی مدول برشی عبارت است از:[11]

$$\frac{1}{G}=\frac{1}{\eta_2\frac{d}{dt}}+\frac{1}{G_2} \qquad (15)$$



شکل ۳. عنصر ماکسول.

که در آن G_2 مدول برشی عنصر ماکسول و η_2 میرایی آن عنصر است. برای کرنش اصلی بزرگ‌تر در این عنصر با استفاده از رابطه‌ی $\varepsilon_1=\frac{\sigma_1^{dev}}{2G}$ می‌توان نوشت:

$$\varepsilon_1=\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_C}{4\eta_2\frac{d}{dt}}+\frac{K_p(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_C}{4G_2} \qquad (16)$$

همچنین کرنش اصلی کوچک‌تر در این عنصر با استفاده از رابطه‌ی $\varepsilon_2=\frac{\sigma_2^{dev}}{2G}$ چنین بیان می‌شود:

$$\varepsilon_2=-\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_c}{4\eta_2\frac{d}{dt}}-\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_c}{4G_2} \qquad (17)$$

شرایط اولیه یعنی کرنش در لحظه‌ی شروع ($t=0$) برای عنصر ماکسول به‌صورت رابطه‌ی ۱۸ در نظر گرفته شده است:

$$\begin{cases}\varepsilon_1(0)=\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_C}{4G_2}\\ \varepsilon_2(0)=-\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_c}{4G_2}\end{cases} \qquad (18)$$

در عنصر ماکسول، برای کرنش اصلی بزرگ‌تر با حل معادله‌ی دیفرانسیل ۱۶ و با در نظر گرفتن شرایط اولیه مطابق رابطه‌ی ۱۸، برای این عنصر می‌توان نوشت:

$$\varepsilon_1=\varepsilon_\theta=\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_C}{4G_2}+\frac{\lfloor(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_C\rfloor t}{4\eta_2} \qquad (19)$$

همچنین با حل معادله‌ی دیفرانسیل ۱۷ و با اعمال شرایط اولیه مطابق رابطه‌ی ۱۸ مقدار کرنش شعاعی به‌دست آمده عبارت است از:

$$\varepsilon_2=\varepsilon_r=-\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_c}{4G_2}-\frac{\lfloor(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_c\rfloor t}{4\eta_2} \qquad (20)$$

با جمع روابط دو عنصر اشاره شده (روابط ۱۳ و ۱۹) کرنش مماسی در عنصر برگر برای تونل در این شرایط برابر است با:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1=\varepsilon_\theta&=[(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_C]\\&\left\{\frac{1}{4G_2}+\frac{t}{4\eta_2}+\frac{1}{4G_1}\left[1-\exp\left(-\frac{G_1t}{\eta_1}\right)\right]\right\}\end{aligned} \qquad (21)$$

در همین شرایط، کرنش شعاعی در عنصر برگر برای تونل چنین بیان می‌شود (جمع رابطه‌های ۱۴ و ۲۰):

$$\begin{aligned}\varepsilon_2=\varepsilon_r&=-[(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_0+\sigma_c]\\&\left\{\frac{1}{4G_2}+\frac{t}{4\eta_2}+\frac{1}{4G_1}\left[1-\exp\left(-\frac{G_1t}{\eta_1}\right)\right]\right\}\end{aligned} \qquad (22)$$

با انتگرال گیری از کرنش شعاعی، تغییر مکان شعاعی به دست می‌آید:

$$U_r=\int\varepsilon_r dr \qquad (23)$$

در این رابطه dr جزء متغیر شعاعی است. با توجه به روابط ۲۲ و ۲۳ و با اعمال شرایط مرزی برای جدار تونل پس از یک سری عملیات ریاضی، میزان تغییر مکان‌های

خزشی در جدار تونل طبق رابطه‌ی ۲۴ به دست می‌آید:

$$\begin{cases} U_r = -\left\{ \left[\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_\circ+\sigma_c}{4R^{K_P}(K_p-1)} \right] \left(R^{K_P} - r_P^{K_P} \right) + \frac{\lambda\sigma_\circ R^2}{2r_P} \right\} \\ \quad \left\{ \frac{1}{G_2} + \frac{t}{\eta_2} + \frac{1}{G_1}\left[1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1} \right) \right] \right\} \\ \frac{r_P}{R} = \left[\frac{2}{K_P+1} \frac{\sigma_\circ(K_p-1)+\sigma_c}{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_\circ+\sigma_c} \right]^{\frac{1}{(K_P-1)}} \end{cases} \tag{24}$$

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

$$C(t) = 2\left[U_r(t) - U_\circ \right] \tag{25}$$

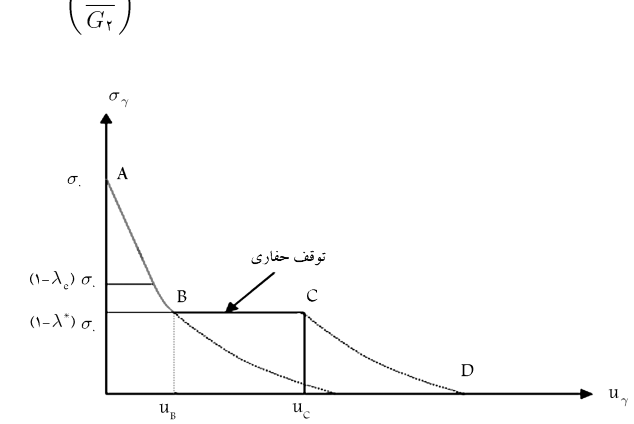
که در آن $C(t)$ همگرایی وابسته به زمان تونل، $U_r(t)$ میزان جابه‌جایی یک نقطه روی جدار تونل در طی زمان t، و $U_\circ$ میزان جابه‌جایی رخداده در دیواره‌ی تونل در زمان شروع همگرایی است. بدیهی است به مرور زمان، به‌علت وقوع پدیده‌ی خزش بر میزان همگرایی افزوده خواهد شد. میزان همگرایی با استفاده از روابط ۲۴ و ۲۵ به دست می‌آید:

$$C(t) = -\left\{ \left[\frac{(K_p-1)(1-\lambda)\sigma_\circ+\sigma_c}{2R^{K_P}(K_p-1)} \right] \left(R^{K_P} - r_P^{K_P} \right) + \frac{\lambda\sigma_\circ R^2}{r_P} \right\} \left\{ \frac{t}{\eta_2} + \frac{1}{G_1}\left[1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1} \right) \right] \right\} \tag{26}$$

به‌منظور استفاده از روابط به دست آمده، مقطعی در نظر گرفته می‌شود که نزدیک به سینه کار است ($\lambda = \lambda^*$). (λ^* پارامتر لحاظ‌کننده‌ی اثر سینه کار در این حالت است). فرض بر آن است که در این مقطع دیواره تسلیم شده است ($\lambda_e < \lambda^*$). در این شرایط حفاری تونل برای مدتی متوقف می‌شود و ضریب λ^* ثابت می‌ماند؛ در این حالت رهاسازی تنش غیرممکن فرض شده است (شکل ۴).

میزان جابه‌جایی دیواره‌ی تونل در ابتدای توقف حفاری‌های (U_B) از رابطه‌ی ۲۴ به دست می‌آید:

$$U_B = -\left\{ \left[\frac{(K_p-1)(1-\lambda^*)\sigma_\circ+\sigma_c}{4R^{K_P}(K_p-1)} \right] \left(R^{K_P} - r_P^{K_P} \right) + \frac{\lambda^*\sigma_\circ R^2}{2r_P} \right\} \left(\frac{1}{G_2} \right)$$



شکل ۴. منحنی مشخصه زمین و عکس‌العمل حائل برای مقطعی با فاصله‌یی کم‌تر از چهار برابر شعاع از سینه کار.

از سوی دیگر میزان جابه‌جایی دیواره‌ی تونل در انتهای توقف حفاری‌ها (U_C)، از همان رابطه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U_C(t) = -\left\{ \left[\frac{(K_p-1)(1-\lambda^*)\sigma_\circ+\sigma_c}{4R^{K_P}(K_p-1)} \right] \left(R^{K_P} - r_P^{K_P} \right) + \frac{\lambda^*\sigma_\circ R^2}{2r_P} \right\} \left\{ \frac{1}{G_2} + \frac{t}{\eta_2} + \frac{1}{G_1}\left[1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1} \right) \right] \right\}$$

بدیهی است اختلاف میان این دو جابه‌جایی، تنها به‌علت خزش به‌وجود آمده در دیواره‌ی تونل است.

تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار FLAC

با استفاده از نرم‌افزار FLAC (نسخه‌ی ۴٫۰۰)، و به‌منظور کنترل صحت مدل تحلیلی به‌دست آمده مقایسه‌یی صورت می‌گیرد. لذا با مدل‌سازی یک تونل تحقیقاتی به‌نام Quatre-chemins و کنترل نتایج حاصل از به‌کارگیری نرم‌افزار، و نیز مقایسه‌ی آنها با روابط تحلیلیِ این تونل صحت نتایج بررسی می‌شود. عنصر برگرِ موجود در نرم‌افزار در تحلیل ویسکوپلاستیک در شکل ۵ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۵ عنصر برگر از سه جزء متفاوت تشکیل شده است: ۱. عنصر کلوین؛ ۲. عنصر ماکسول؛ ۳. عنصر خمیری موهر-کولمب. در نرم‌افزار Flac که روش کار آن مبتنی‌بر روش تفاضلات محدود است، برای کرنش انحرافیِ کل در عنصر برگر می‌توان نوشت:[9]

$$\Delta e_{ij} = \Delta e_{ij}^K + \Delta e_{ij}^M + \Delta e_{ij}^P \tag{27}$$

که در آن Δe_{ij}^K جزء کرنشی عنصر کلوین، Δe_{ij}^M جزء کرنشی عنصر ماکسول، و Δe_{ij}^P جزء کرنشی خمیری موهر-کولمب است. برای عنصر کلوین ارتباط تنش با کرنش در هرگام زمانی چنین بیان می‌شود:

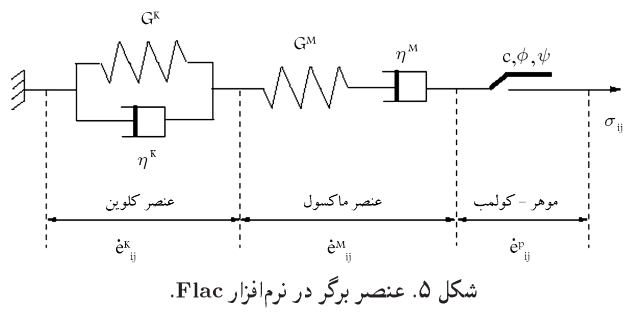
$$\overline{S_{ij}} \cdot \Delta t = 2\eta^K \Delta e_{ij}^K + 2G^K \overline{e}_{ij}^K \cdot \Delta t \tag{28}$$

که در آن $\overline{S_{ij}}$ میانگین تنش انحرافی، Δt گام زمانی η^K، ویسکوزیته (گران‌روی) G^K، مدول برشی عنصر کلوین $\overline{e}_{ij}^K$ و کرنش انحرافی میانگین عنصر کلوین است. مقدار $\overline{S_{ij}}$ (میانگین تنش انحرافی) از رابطه‌ی ۲۹ به دست می‌آید:

$$\overline{S_{ij}} = \frac{S_{ij}^N + S_{ij}^O}{2} \tag{29}$$

که در آن S_{ij}^O گام قبلی و S_{ij}^N گام جدید است. کرنش انحرافی میانگین ($\overline{e}_{ij}$) نیز عبارت است از نصف مجموع مقدار این کمیت در گام قبلی و گام جدید (رابطه‌ی ۳۰):

$$\overline{e_{ij}} = \frac{e_{ij}^N + e_{ij}^o}{2} \tag{30}$$



شکل ۵. عنصر برگر در نرم‌افزار Flac.

در عنصر ماکسول ارتباط تنش با کرنش عبارت است از:

$$\Delta e_{ij}^{M} = \frac{\Delta S_{ij}}{۲G^{M}} + \frac{\overline{S_{ij}}}{۲\eta^{M}}\Delta t \qquad (۳۱)$$

در این رابطه G^M مدول برشی و η^M گران‌روی عنصر ماکسول است.[۹] اما برای جزء کرنشی خمیری موهرـکولمب باید از قانون جریان استفاده کرد. بسته به قانون جریان مرتبط یا غیر مرتبط (در صورت غیرمرتبط بودن قانون جریان باید تابع پتانسیل تعریف شود)، روابط متفاوت خواهد بود. با در نظرگرفتن قانون جریان غیر مرتبط می‌توان برای جزء کرنشی خمیری موهرـکولمب نوشت:

$$\Delta e_i^P = \lambda^s \frac{\partial g^s}{\partial \sigma_i} \qquad i = ۱, ۳ \qquad (۳۲)$$

که در آن Δe_i^P کرنش انحرافی خمیری λ^s،کمیت اسکالر مثبت، g^s تابع پتانسیل و اندیس i مقدارکمیت در دستگاه مختصات (در سه راستای عمود بر هم) است.

چنان که مشاهده شد روابط به‌کار رفته در نرم‌افزار صریح (روش حل بسته) نبوده و قادر به محاسبه‌ی کرنش در حالت تحلیل ویسکوپلاستیک در هرگام زمانی نیست، بلکه از نتایج هر گام محاسباتی در گام محاسباتی بعدی استفاده می‌شود. روابط به دست آمده در نوشتار کاملاً به‌صورت حل بسته است لذا این دو روش کاملاً با هم متفاوت است.

تونل Quatre chemins

سولم و همکاران وی برای اینکه صحت روابط پیشنهادی خود را کنترل نمایند، از نتایج ابزاربندی تونل Quatre chemins استفاده کردند.[۸] این تونل، یک تونل دایروی به طول ۳۸ متر و به قطر ۳ 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. به‌منظور ابزاربندی این تونل از همگرایی سنج استفاده شده است. میزان همگرایی دیواره تونل از شروع حفاری، در زمان توقف در حفاری و در درازمدت اندازه گیری شده است.[۸]

تونل مذکور در حالت خمیری به‌کمک نرم‌افزار FLAC مدل شد. فرض بر این است که مقطع مورد بررسی در این حالت از سینه‌کار دور است. پارامترهای خزشی که به‌ازای آنها مدل تحلیلی ویسکوپلاستیکِ پیشنهادی با نتایج ابزاربندی تونل برای این مقطع تطابق مناسب برقرارکند (با بهره‌گیری از نرم‌افزار Excel و برازش رابطه‌ی ۲۴ با نتایج ابزاربندی)، در جدول ۲ آورده شده است. یادآور می‌شود که $G_۲$ انتخابی نیست و از روی مقدار مدول کشسانی و نسبت پواسون محاسبه می‌شود. همچنین با درنظرگرفتن نتایج ابزاربندی این تونل و با انجام حساسیت‌سنجی، بهترین مقادیر برای پارامترهای لازم در این مدل تحلیلی انتخاب شده است. نتایج این حساسیت‌سنجی در یکی از گزارشات نگارندگان آمده است.[۱۰] نتیجه‌ی تحلیل برای ۵۰ روز در این حالت در شکل ۶ آمده است.

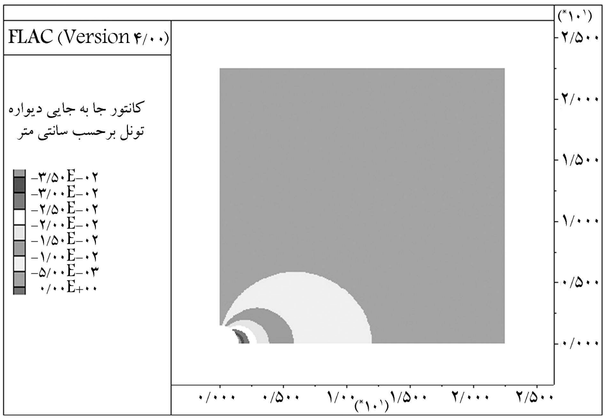
مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی و نتایج مدل‌سازی عددی به همراه نتایج ابزاربندی تونل مذکور در شکل ۷ نشان داده شده است. به‌عنوان مثال دیگر، مقطعی نزدیک‌تر به سینه کار از همان تونل در نظرگرفته می‌شود. در حالتی

جدول ۱. مشخصات مکانیکی توده سنگ تونل Quatre chemins.[۸]

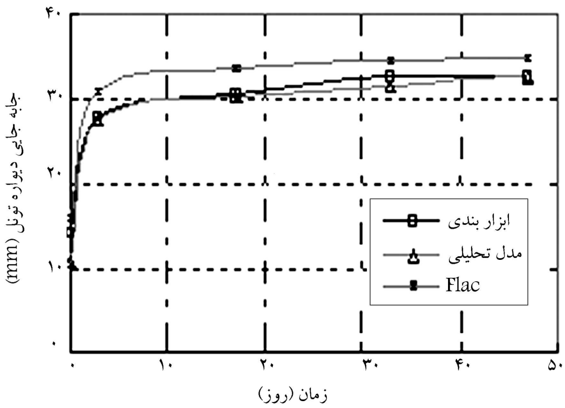
E(MPa)	υ	φ (Deg.)	C (MPa)	σ_c (MPa)
۳۶۰	۰/۴	۳۰	۰/۵	۲

جدول ۲. پارامترهای مدل زمانی ورودی به نرم‌افزار برای تحلیل وابسته به زمان.

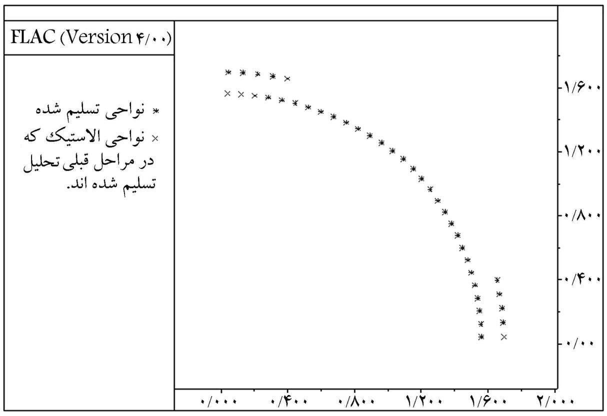
$G_۱$ (MPa)	$G_۲$ (MPa)	$\eta_۱$ (MPa-Day)	$\eta_۲$ (MPa-Day)
۷۸	۱۲۸/۵۷	۱۰۰	۲۰۰۰۰



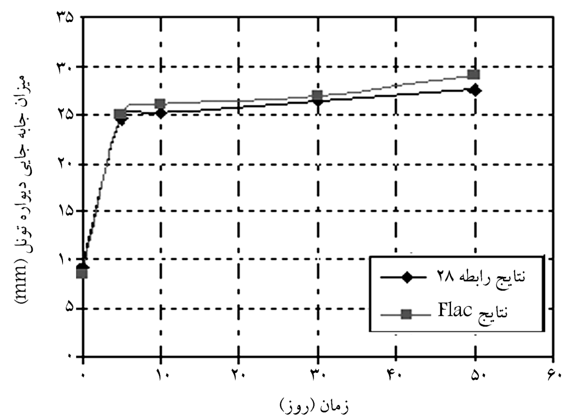
شکل ۶. جابه‌جایی دیواره‌ی تونل بعد از ۵۰ روز (بزرگ‌ترین جابه‌جایی در دیواره ۳/۵ سانتی‌متر).



شکل ۷. مقایسه‌ی جابه‌جایی دیواره‌ی تونل نسبت به زمان.



شکل ۸. نمایش مناطق تسلیم‌شده در اطراف تونل.



شکل ۹. مقایسه‌ی جابه‌جایی دیواره تونل نسبت به زمان.

که تأثیرپذیری از سینه کار (λ) برابر ۰٫۸۵ است، حفاری‌ها برای مدتی متوقف شد. در این مثال، مطابق رابطه‌ی ۷ برای مشخصات مکانیکی داده شده برای توده سنگ $\lambda_e =$ ۰/۷۷ به دست می‌آید. بدیهی است قسمتی از دیواره‌ی تونل تسلیم می‌شود (شکل ۸).

همچنین نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی و نتایج تحلیل عددی تونل مورد بحث در شکل ۹ با هم مقایسه شده‌اند.

نتیجه‌گیری

با استفاده از عنصر برگر که عنصری کامل برای بیان خزش در دو ناحیه‌ی اولیه و ثانویه‌ی خزش است، برای تونل‌ها در شرایطی که تنش هیدرواستاتیک برقرار است، مدل خزشی جدیدی به دست آمد. این مدل قادر است تغییر شکل‌های خزشی توده‌ی جدار تونل را در صورت تسلیم‌شدن توده در هنگام توقف در حفاری، و نیز میزان جابه‌جایی‌های دیواره‌ی تونل در درازمدت را برای مقاطع مختلف تونل پیش‌بینی کند.

نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی با نتایج تحلیل عددی (به‌کمک نرم‌افزار FLAC) و نتایج ابزاربندی تونل، مقایسه شد. بدیهی است روابط تحلیلی به دست آمده به‌خوبی برای تحلیل اولیه‌ی تونل‌های دایره‌یی قابل استفاده است. برای تحلیل‌های دقیق‌تر می‌توان از روش‌های عددی (نظیر روشی که در مثال متن نوشتار به آن اشاره شد) بهره گرفت.

پانوشت

1. axisymmetry

منابع

1. Hoek, E. "Practical rock engineering", Internet reference: www.rocscience.com (2000).

2. Panet, M. "Le calcul des tunnels par la methode convergence-confinement", Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees (1995).

3. Panet, M. and Guenot, A. "Analysis of convergence behind the face of a tunnel", *Proceedings of the 3rd international symposium*, Brighton, England, pp. 197-204 (1982).

4. Cristescu, N.D. "Rock rheology", 1st Eds., Kluwer Academic Publishers (1989).

5. Ladanyi, B. "Time dependent response of rock around tunnel", J.A. Hudson Ed., *Comprehensive Rock Engineering,* **2**, pp. 77-112 (1993).

6. Cristescu, N.D. and Hunsche, U. *Time Effect in Rock Mechanics,* 1st Ed., Wiley, New York (1998).

7. Kontogianni, V.; Psimoulis, P. and Stiros, S. "What is the contribution of time-dependent deformation in tunnel convergence?", *Engineering Geology*, **82**, pp. 264-267 (2005).

8. Sulem, J.; Panet, M. and Guenot, A. "An analytical solution for time-dependent displacements in circular tunnel", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts,* **24**(3), pp. 155-164 (1987).

9. Itasca, Manual of Flac code (2002).

10. Fahimifar, A. and Monshizadeh Tehrani, F. "An elastic viscose solution for estimating displacements of circular tunnels in hydrostatic stress field", 5th Asian Rock Mechanics Symposium, Tehran, pp. 697-702 (2008).

11. Goodman, R.E., *Introduction to Rock Mechanics,* 4th Eds., Wiley, New York (1989).