

روش تحلیلی برای تخمین تغییر شکل های خزشی جدار تونل های دایروی

احمد فهیمی فر (استاد)

فرشاد منشی زاده تهرانی (کارشناس ارشد)
دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تغییر شکل های ایجاد شده در هنگام حفاری تونل ها به میزان پیشروی تونل، خواص رئولوژیکی توده سنگ اطراف تونل و زمان نصب سیستم نگه داری وابسته است. در این نوشتار تحلیل تونل ها با مقطع دایره و برای رفتار خزشی تحت شرایط هیدرواستاتیک تنش ها بررسی شده است. با استفاده از معیار تسلیم موهر کولمب در صورت تسلیم شدن توده سنگ اطراف تونل در این شرایط، به منظور پیش بینی تغییر شکل های خزشی مدل تحلیلی جدیدی به دست آمده است. روابط جدید برای یک تونل تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حاصل از آن با تحلیل عددی نرم افزار FLAC مقایسه شد. نتایج حاصله نشان می دهد که مدل یاد شده از صحت و دقت بالایی برخوردار است.

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

واژگان کلیدی: مدل برگر، تونل های دایروی، خزش.

مقدمه

مطالعه موردی بر روی چند تونل ابرابندی شده نشان می دهد که از کل تغییر مکان ایجاد شده در دیواره تونل، دست کم ۵۰ درصد آن تغییر مکان وابسته به زمان است.^[۱] به همین منظور، با در نظر گرفتن اثر سینه کار بر تغییر مکان های اطراف تونل و نیز با استفاده از مدل خزشی کلون اصلاح شده برای بیان رفتار وابسته به زمان توده، روش حل بسته یی برای تغییر مکان های تابع زمان تونل های دایره یی 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 می آید:^[۸]

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

$$\sigma_\theta = \left(1 + \lambda \frac{R^2}{r^2}\right) \sigma_0 \quad (3)$$

که در آن R شعاع تونل، r فاصله شعاعی از مرکز تونل و در امتداد شعاع تونل، و σ_0 مقدار تنش اولیه است. چنانچه تنش ها به حد تسلیم برسند، مقادیر تنش های شعاعی و مماسی برای جدار تونل در لحظه تسلیم، مطابق رابطه ۴ محاسبه می شود:^[۸]

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_0 (1 - \lambda_e) \\ \sigma_\theta = \sigma_0 (1 + \lambda_e) \end{cases} \quad (4)$$

λ_e مقداری خاص از پارامتر λ است که اثر پیشروی سینه کار را لحاظ می کند و به ازای $\lambda > \lambda_e$ ناحیه خمیری اطراف تونل تشکیل می شود. این ناحیه به شکل

در حین حفاری تونل، بر میزان جابه جایی دیواره تونل و فشار وارده بر سیستم نگه داری افزوده خواهد شد. دو دلیل مهم می توان برای این امر برشمرد: یکی به علت پیشروی سینه کار تونل و دیگری به دلیل خواص وابسته به زمان محیط اطراف تونل؛ در تحلیل ها می بایست سهم هر یک از این دو پدیده از یکدیگر تفکیک شود.

برای «مقاطع نزدیک به سینه کار» - مقطعی که فاصله ی طولی شان از سینه کار کم تر از دو تا سه برابر قطر تونل است - جابه جایی رخ داده در دیواره تونل عمده تاً ناشی از اثر پیشروی سینه کار خواهد بود. مؤلفین مختلف به کمک توابع متفاوت، به بیان ارتباط تجربی میان فاصله ی مقطع از سینه کار با جابه جایی رخ داده در دیواره تونل پرداخته اند.^[۱،۲] رابطه ی ۱، نمونه یی از این توابع است:^[۳]

$$\lambda(x) = 0.28 + 0.72 \left[1 - \left(\frac{0.84R}{0.84R + x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

در این رابطه λ پارامتر لحاظ کننده ی اثر پیشروی تونل، x فاصله ی مقطع مورد بررسی از سینه کار و R شعاع تونل است. برای «مقاطع دور از سینه کار» - مقطعی که فاصله ی بیشتری از فاصله ی ذکر شده از سینه کار دارند ($\lambda = 1$) - جابه جایی های ایجاد شده در دیواره بر اثر رفتار وابسته به زمان توده است (اثر خزش). پدیده ی خزش توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است و در این رابطه مدل های متعددی پیشنهاد شده است.^[۴-۶]

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

دایره‌یی به شعاع r_p در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که از معیار موهر-کولمب برای تشخیص تسلیم توده زمین استفاده شود:^[۸]

$$\sigma_\theta = K_P \sigma_r + \sigma_C \quad (5)$$

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

$$K_P = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (6)$$

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

$$\lambda_e = \frac{1}{K_P + 1} \left(K_P - 1 + \frac{\sigma_C}{\sigma_e} \right) \quad (7)$$

طبیعی است که مدل کلون اصلاح شده 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 کلون 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 ایزابندی تونل‌ها، چنانچه تونل فاقد سیستم نگه‌داری باشد بر مقدار کرنش خزشی در گذشت زمان افزوده می‌شود (مانند مغاره‌های 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 ایزابندی در یک تونل تحقیقاتی، مدل ارائه‌شده مورد بررسی قرار گرفته است.

کاربرد مدل برگر برای پیش‌بینی تغییر شکل‌های تابع

زمان تونل در صورت خمیری شدن 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 خمیری-کشسانی دارد؛
۲. نسبت تنش‌های افقی به تنش‌های قائم برابر واحد است ($K = 1$)؛
۳. از وزن توده‌ی سست شده در سقف تونل صرف‌نظر می‌شود؛
۴. شرایط تقارن محوری^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 ایجاد شده 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 خمیری-کشسانی کامل در نظر گرفته شده است. رفتار خمیری کامل خود بیان‌گر ثابت ماندن کرنش حجمی است. براساس آزمایشات تک‌محوری و سه‌محوری انجام شده 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 تعریف کردن 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 $\lambda = 1$).

برای سایر مقاطعی که فاصله‌شان کم‌تر از چهار برابر شعاع تونل از سینه کار است λ کوچک‌تر از ۱ خواهد بود ($\lambda < 1$). هنگامی که $\lambda < \lambda_e$ هیچ منطقه‌یی از دیواره‌ی تونل تسلیم نخواهد شد و لذا تحلیل کشسان است.^[۱۰] اما زمانی که $\lambda < \lambda_e$ می‌شود، فرض می‌شود زمین جدار تونل در مقطع مورد بررسی مطابق معیار موهر-کولمب تسلیم شود. تنش شعاعی در جدار تونل با استفاده از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = (1 - \lambda)\sigma_e$$

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

$$\sigma_\lambda = \sigma_\theta = K_P \sigma_r + \sigma_C = K_P (1 - \lambda)\sigma_e + \sigma_C$$

برای تنش‌های میانگین نیز در این حالت می‌توان نوشت:

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_\lambda + \sigma_r}{2} = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} = \frac{(K_P + 1)(1 - \lambda)\sigma_e + \sigma_C}{2}$$

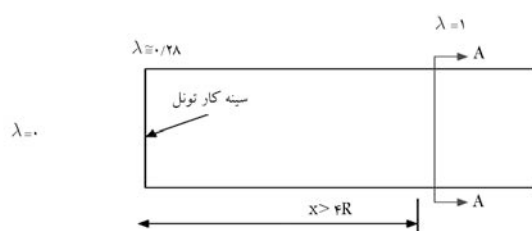
همچنین برای تنش‌های انحرافی می‌توان نوشت:

$$\sigma_\lambda^{dev} = \sigma_\lambda - \sigma_{mean} = \frac{(K_P - 1)(1 - \lambda)\sigma_e + \sigma_C}{2} \quad (8)$$

$$\sigma_r^{dev} = \sigma_r - \sigma_{mean} = -\frac{(K_P - 1)(1 - \lambda)\sigma_e + \sigma_C}{2} \quad (9)$$

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

$$G = \eta_1 \frac{d}{dt} + G_1 \quad (10)$$



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

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 رابطه $\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1^{dev}}{2G}$ می توان نوشت:

$$\varepsilon_1 = \frac{(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_C}{2\eta_2 \frac{d}{dt}} + \frac{K_p(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_C}{2G_2} \quad (16)$$

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

$$\varepsilon_2 = -\frac{(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_C}{2\eta_2 \frac{d}{dt}} - \frac{K_p(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_C}{2G_2} \quad (17)$$

شرایط اولیه یعنی کرنش در لحظه شروع ($t = 0$) برای عنصر ماکسول به صورت رابطه ۱۸ در نظر گرفته شده است:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(0) = \frac{(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_C}{2G_2} \\ \varepsilon_2(0) = -\frac{(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_C}{2G_2} \end{cases} \quad (18)$$

در عنصر ماکسول، برای کرنش اصلی بزرگتر با حل معادله دیفرانسیل ۱۶ و با در نظر گرفتن شرایط اولیه مطابق رابطه ۱۸، برای این عنصر می توان نوشت:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \frac{(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_C}{2G_2} + \frac{[(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_C]t}{2\eta_2} \quad (19)$$

همچنین با حل معادله دیفرانسیل ۱۷ و با اعمال شرایط اولیه مطابق رابطه ۱۸ مقدار کرنش شعاعی به دست آمده عبارت است از:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_r = -\frac{(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_C}{2G_2} - \frac{[(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_C]t}{2\eta_2} \quad (20)$$

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

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \left[\frac{1}{2G_2} + \frac{t}{2\eta_2} + \frac{1}{2G_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \right] \quad (21)$$

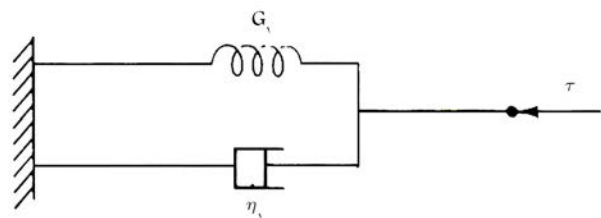
در همین شرایط، کرنش شعاعی در عنصر بزرگتر برای تونل چنین بیان می شود (جمع روابط ۱۴ و ۲۰):

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_r = -\left[\frac{1}{2G_2} + \frac{t}{2\eta_2} + \frac{1}{2G_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \right] \quad (22)$$

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

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

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 مکان های



شکل ۲. عنصر کلونین.

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

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

همچنین کرنش اصلی کوچکتر در این عنصر چنین بیان می شود:

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

اگر شرایط اولیه یعنی کرنش در لحظه شروع ($t=0$)، برای عنصر کلونین (مبداء زمان می تواند شروع توقف در حفاری باشد) عبارت باشد از:

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

با انتگرال گیری نسبت به زمان از رابطه ۱۱ و لحاظ کردن شرایط اولیه می توان نوشت:

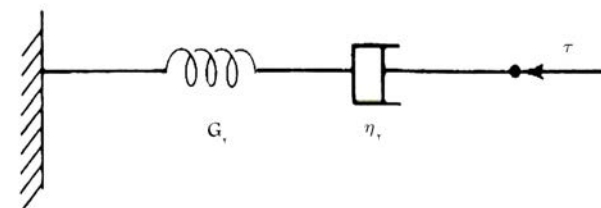
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \frac{(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_C}{2G_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (13)$$

برای کرنش شعاعی نیز با انتگرال گیری از رابطه ۱۲ می توان نوشت:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_r = -\frac{(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_C}{2G_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right] \quad (14)$$

برای عنصر ماکسول (شکل ۳)، رابطه دیفرانسیلی مدول برشی عبارت است از: [۱۱]

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



شکل ۳. عنصر ماکسول.

خزشی در جدار تونل طبق رابطه ی ۲۴ به دست می آید:

از سوی دیگر میزان جابه جایی دیواره ی تونل در انتهای توقف حفاری ها (U_C)، از همان رابطه به صورت زیر محاسبه می شود:

$$U_C(t) = - \left\{ \left[\frac{(K_p - 1)(1 - \lambda^*)\sigma_0 + \sigma_c}{2R^{K_p}(K_p - 1)} \right] (R^{K_p} - r_P^{K_p}) + \frac{\lambda^*\sigma_0 R^r}{r_P} \right\} \left\{ \frac{1}{G_r} + \frac{t}{\eta_r} + \frac{1}{G_v} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_v t}{\eta_v}\right) \right] \right\}$$

بدیهی است اختلاف میان این دو جابه جایی، تنها به علت خزش به وجود آمده در دیواره ی تونل است.

$$\begin{cases} U_r = - \left\{ \left[\frac{(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_c}{2R^{K_p}(K_p - 1)} \right] (R^{K_p} - r_P^{K_p}) + \frac{\lambda\sigma_0 R^r}{r_P} \right\} \\ \left\{ \frac{1}{G_r} + \frac{t}{\eta_r} + \frac{1}{G_v} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_v t}{\eta_v}\right) \right] \right\} \\ r_P/R = \left[\frac{\sigma_0 (K_p - 1) + \sigma_c}{(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_c} \right]^{1/(K_p - 1)} \end{cases} \quad (24)$$

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

$$C(t) = 2[U_r(t) - U_0] \quad (25)$$

که در آن $C(t)$ همگرایی وابسته به زمان تونل، $U_r(t)$ میزان جابه جایی یک نقطه روی جدار تونل در طی زمان t ، و U_0 میزان جابه جایی رخ داده در دیواره ی تونل در زمان شروع همگرایی است. بدیهی است به مرور زمان، به علت وقوع پدیده ی خزش بر میزان همگرایی افزوده خواهد شد. میزان همگرایی با استفاده از روابط ۲۴ و ۲۵ به دست می آید:

$$C(t) = - \left\{ \left[\frac{(K_p - 1)(1 - \lambda)\sigma_0 + \sigma_c}{2R^{K_p}(K_p - 1)} \right] (R^{K_p} - r_P^{K_p}) + \frac{\lambda\sigma_0 R^r}{r_P} \right\} \left\{ \frac{t}{\eta_r} + \frac{1}{G_v} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_v t}{\eta_v}\right) \right] \right\} \quad (26)$$

به منظور استفاده از روابط به دست آمده، مقطعی در نظر گرفته می شود که نزدیک به سینه کار است ($\lambda = \lambda^*$). λ^* پارامتر لحاظ کننده ی اثر سینه کار در این حالت است. فرض بر آن است که در این مقطع دیواره تسلیم شده است ($\lambda^* > \lambda_c$). در این شرایط حفاری تونل برای مدتی متوقف می شود و ضریب λ^* ثابت می ماند؛ در این حالت رهاسازی تنش غیرممکن فرض شده است (شکل ۴).

میزان جابه جایی دیواره ی تونل در ابتدای توقف حفاری های (U_B) از رابطه ی ۲۴ به دست می آید:

$$U_B = - \left\{ \left[\frac{(K_p - 1)(1 - \lambda^*)\sigma_0 + \sigma_c}{2R^{K_p}(K_p - 1)} \right] (R^{K_p} - r_P^{K_p}) + \frac{\lambda^*\sigma_0 R^r}{r_P} \right\} \left(\frac{1}{G_r} \right)$$

تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار FLAC

با استفاده از نرم افزار FLAC (نسخه ی ۴٫۰۰)، و به منظور کنترل صحت مدل تحلیلی به دست آمده مقایسه ی صورت می گیرد. لذا با مدل سازی یک تونل تحقیقاتی به نام Quatre-chemins و کنترل نتایج حاصل از به کارگیری نرم افزار، و نیز مقایسه ی آنها با روابط تحلیلی این تونل صحت نتایج بررسی می شود. عنصر برگر موجود در نرم افزار در تحلیل ویسکوپلاستیک در شکل ۵ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۵ عنصر برگر از سه جزء متفاوت تشکیل شده است: ۱. عنصر کلونین؛ ۲. عنصر ماکسول؛ ۳. عنصر خمیری موهردکولمب. در نرم افزار Flac که روش کار آن مبتنی بر روش تفاضلات محدود است، برای کرنش انحرافی کل در عنصر برگر می توان نوشت: [۹]

$$\Delta e_{ij} = \Delta e_{ij}^K + \Delta e_{ij}^M + \Delta e_{ij}^P \quad (27)$$

که در آن Δe_{ij}^K جزء کرنشی عنصر کلونین، Δe_{ij}^M جزء کرنشی عنصر ماکسول، و Δe_{ij}^P جزء کرنشی خمیری موهردکولمب است. برای عنصر کلونین ارتباط تنش با کرنش در هر گام زمانی چنین بیان می شود:

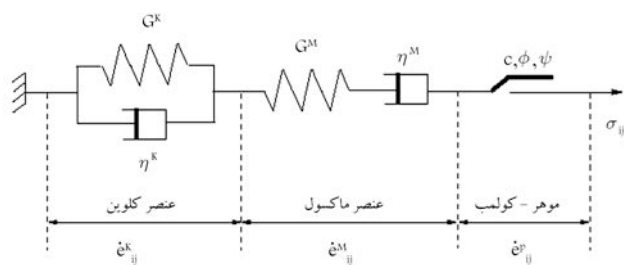
$$\overline{S}_{ij} \cdot \Delta t = 2\eta^K \Delta e_{ij}^K + 2G^K \overline{e}_{ij}^K \cdot \Delta t \quad (28)$$

که در آن \overline{S}_{ij} میانگین تنش انحرافی، Δt گام زمانی η^K ، ویسکوزیته (گرانروی) G^K ، مدول برشی عنصر کلونین \overline{e}_{ij}^K و کرنش انحرافی میانگین عنصر کلونین است. مقدار \overline{S}_{ij} (میانگین تنش انحرافی) از رابطه ی ۲۹ به دست می آید:

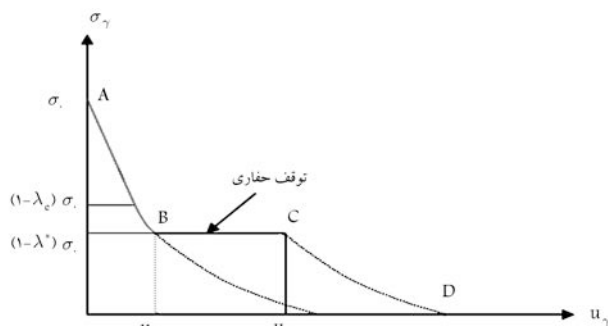
$$\overline{S}_{ij} = \frac{S_{ij}^N + S_{ij}^O}{2} \quad (29)$$

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 (رابطه ی ۳۰):

$$\overline{e}_{ij} = \frac{e_{ij}^N + e_{ij}^O}{2} \quad (30)$$



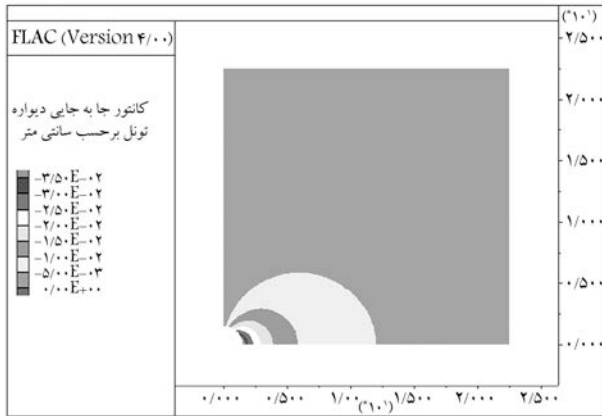
شکل ۵. عنصر برگر در نرم افزار Flac.



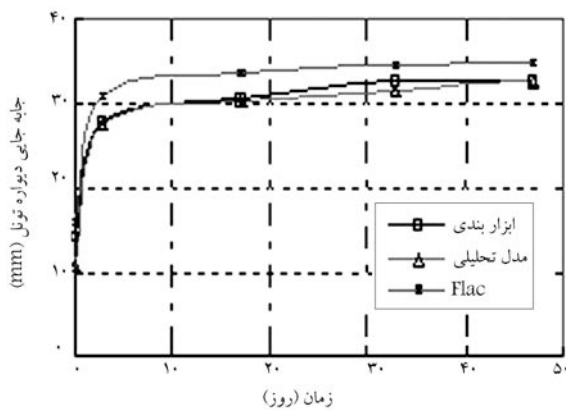
شکل ۴. منحنی مشخصه زمین و عکس العمل حائل برای مقطعی با فاصله ی کم تر از چهار برابر شعاع از سینه کار.

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.

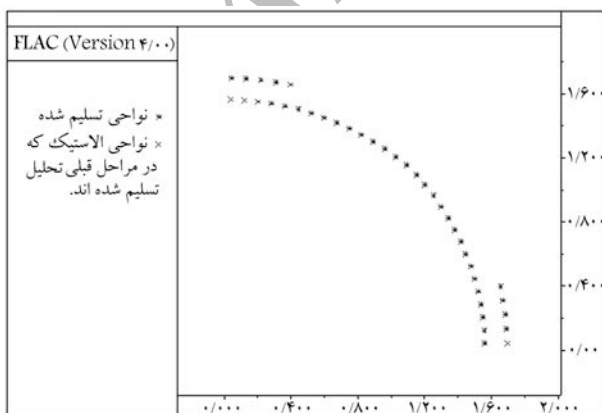
مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی و نتایج مدل‌سازی عددی به همراه نتایج ابزاربندی تونل مذکور در شکل ۷ نشان داده شده است. به‌عنوان مثال دیگر، مقطعی نزدیک‌تر به سینه کار از همان تونل در نظر گرفته می‌شود. در حالتی



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.

در عنصر ماکسول ارتباط تنش با کرنش عبارت است از:

$$\Delta \epsilon_{ij}^M = \frac{\Delta S_{ij}}{\gamma G^M} + \frac{\overline{S_{ij}}}{\gamma \eta^M} \Delta t \quad (31)$$

در این رابطه G^M مدول برشی و η^M گران‌روی عنصر ماکسول است.^[۹] اما برای جزء کرنشی خمیری موهر-کولمب 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 نظر گرفتن قانون جریان غیر مرتبط می‌توان برای جزء کرنشی خمیری موهر-کولمب نوشت:

$$\Delta \epsilon_i^P = \lambda^* \frac{\partial g^*}{\partial \sigma_i} \quad i = 1, 3 \quad (32)$$

که در آن $\Delta \epsilon_i^P$ کرنش انحرافی خمیری λ^* کمیت اسکالر مثبت، g^* تابع پتانسیل و اندیس i مقدار کمیت در دستگاه مختصات (در سه راستای عمود بر هم) است. چنان‌که مشاهده شد روابط به‌کار رفته در نرم‌افزار صریح (روش حل بسته) نبوده و قادر به محاسبه‌ی کرنش در حالت تحلیل ویسکوپلاستیک در هر گام 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 اندازه‌گیری 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 سینه کار دور است. پارامترهای خزشی که به‌ازای آنها مدل تحلیلی ویسکوپلاستیک پیشنهادی با نتایج ابزاربندی تونل برای این مقطع تطابق مناسب برقرار کند (با بهره‌گیری از نرم‌افزار Excel و برازش رابطه‌ی ۲۴ با نتایج ابزاربندی)، در جدول ۲ آورده شده است. یادآور می‌شود که G_2 انتخابی نیست و از روی مقدار مدول کشسانی و نسبت پواسون محاسبه می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن نتایج ابزاربندی این تونل و با انجام حساسیت‌سنجی، بهترین مقادیر برای

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

σ_c (MPa)	C (MPa)	φ (Deg.)	ν	E (MPa)
۲	۰٫۵	۳۰	۰٫۴	۳۶۰

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

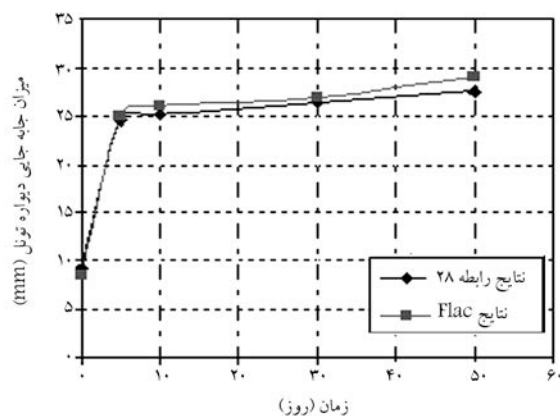
η_2 (MPa-Day)	η_1 (MPa-Day)	G_2 (MPa)	G_1 (MPa)
۲۰۰۰۰	۱۰۰	۱۲۸٫۵۷	۷۸

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 ناحیه اولیه و ثانویه 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 تسلیم شدن 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 (به کمک نرم‌افزار FLAC) و نتایج ابزار بندی تونل، مقایسه شد. بدیهی است روابط تحلیلی به دست آمده به خوبی برای تحلیل اولیه‌ی تونل‌های دایره‌ی قابل استفاده است. برای تحلیل‌های دقیق‌تر می‌توان از روش‌های عددی (نظیر روشی که در مثال متن نوشتار به آن اشاره شد) بهره گرفت.



شکل ۹. مقایسه‌ی جابه‌جایی دیواره تونل نسبت به زمان.

که تأثیر پذیری از سینه کار (λ) برابر 0.85° است، حفاری‌ها برای مدتی متوقف شد. در این مثال، مطابق رابطه‌ی ۷ برای مشخصات مکانیکی داده شده برای توده سنگ $\lambda_e = 0.77^\circ$ به دست می‌آید. بدیهی است قسمتی از دیواره‌ی تونل تسلیم می‌شود (شکل ۸).

پانویس

1. axisymmetry

منابع

- Hoek, E. "Practical rock engineering", Internet reference: www.rocksience.com (2000).
- Panet, M. "Le calcul des tunnels par la methode convergence-confinement", Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees (1995).
- 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).
- Cristescu, N.D. "Rock rheology", 1st Eds., Kluwer Academic Publishers (1989).
- Ladanyi, B. "Time dependent response of rock around tunnel", J.A. Hudson Ed., *Comprehensive Rock Engineering*, **2**, pp. 77-112 (1993).
- Cristescu, N.D. and Hunsche, U. *Time Effect in Rock Mechanics*, 1st Ed., Wiley, New York (1998).
- 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).
- 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).
- Itasca, Manual of Flac code (2002).
- 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).
- Goodman, R.E., *Introduction to Rock Mechanics*, 4th Eds., Wiley, New York (1989).