

یادداشت پژوهشی

معرفی یک مدل رفتاری الاستوویسکوپلاستیک برای پیش‌بینی رفتار خزشی جدار تونل‌های دایره‌ای و مقایسه با مدل‌های موجود

احمد فهیمی فر*، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
احسان پاک‌نیت، دانش‌آموخته کاشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

E-mail: fahim@aut.ac.ir

دریافت: ۱۳۸۹/۰۷/۰۶ - پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۱۷

چکیده

عدم شناخت صحیح رفتار خزشی سنگ‌ها و استفاده از مدل‌های رفتاری نامناسب در تحلیل و طراحی تونل‌ها ممکن است منجر به خسارت‌های جبران‌ناپذیری گردد. خوشبختانه در سال‌های اخیر بررسی رفتار تابع زمان سنگ‌ها مورد توجه قرار گرفته و حتی در بسیاری نرم‌افزارهای پرکاربرد از جمله نرم‌افزار FLAC نیز به این موضوع پرداخته شده است. در این مقاله، مدل‌های رفتاری تابع زمان ماکسول، کلوین-وویت، برگر و CVISC معرفی و پس از اعمال این مدل بر روی یک تونل دایره‌ای در شرایط هیدرواستاتیک در برنامه تفاضل محدود FLAC، نتایج تحلیل‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در ادامه به منظور رفع نقص‌های مدل‌های نام برده، مدل تابع زمانی پیشنهاد و صحت عملکرد آن از طریق مقایسه آن با مدل‌های مذکور ارزیابی شد. مهم‌ترین ویژگی مدل رفتاری ارائه شده، توانایی مدل کردن هر سه مرحله خزش توده سنگ است که در تنش‌های بالا و اعماق زیاد رخ می‌دهد. همچنین این مدل، نرم‌شوندگی رفتار تنش-کرنش سنگ را از طریق تقلیل پارامترهای مکانیکی سنگ در رویارویی با مرحله سوم خزش بیان می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مدل تابع زمان، خزش، روش تفاضل محدود، تونل

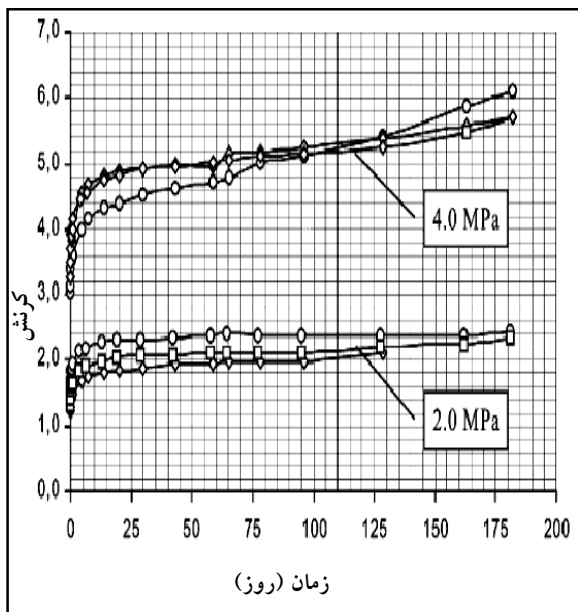
۱- مقدمه

مقرون به صرفه و اقتصادی باشد. حتی بسیاری نرم‌افزارهای پرکاربرد مهندسی نیز در زمینه تحلیل و طراحی تونل و فضا‌های زیرزمینی با این فرض همراه شده و مدل‌های رفتاری خزشی به‌منظور در نظر گرفتن تغییرشکل‌های وابسته به زمان در آنها گنجانده شده است. یکی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای نام برده، برنامه تفاضل محدود FLAC است که در میان جامعه مهندسان معدن و ژئوتکنیک از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است و امروزه بسیاری از متخصصان در تحلیل و طراحی فضا‌های زیرزمینی از این نرم‌افزار استفاده می‌کنند. در این مقاله، مهم‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های

در میان پیش‌بینی‌ها و بررسی‌های متعددی که در فرآیند احداث تونل‌ها و فضا‌های زیرزمینی صورت می‌پذیرد، در بسیاری اوقات، تحلیل‌های خزشی نادیده گرفته می‌شوند، درحالی‌که تغییرشکل‌های وابسته به زمان سنگ‌ها یکی از مهم‌ترین عللی است که در طول زمان، استفاده از تونل‌ها را غیرممکن می‌سازد [Hoek and Marinos, 2000]. با توجه به هزینه‌های فراگیری که در فرآیند اجرای یک تونل پرداخت می‌شود، به نظر می‌رسد استفاده از مدل‌های رفتاری تابع زمان در تحلیل و طراحی تونل‌ها به منظور پیشگیری از خرابی‌های احتمالی در طول زمان، بسیار

تقریباً ثابتی داشته و با گذشت ۱۸۵ روز همچنان کرنش در حدود ۲/۵ درصد ثابت می ماند (به این مرحله در نمودار خزش در اصطلاح، حالت پایدار گفته می شود).

در حالی که برای بارگذاری در سطح تنش بالاتر (سطح تنش ۴ مگاپاسکال) ابتدا کرنش ها با نرخ کاهنده افزایش یافته (در مدت ۲۵ روز از کرنش ۰/۰۰۳ به کرنشی در حدود ۰/۰۰۵ می رسند = مرحله اول خزش) و پس از آن با نرخ ثابت به روند افزایشی خود ادامه می دهند (مرحله دوم خزش) و در نهایت پس از ۱۸۵ روز کرنش به ۰/۰۰۶ می رسد.



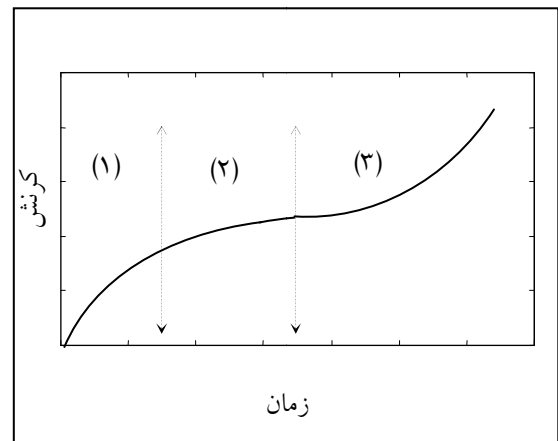
شکل ۲. نمودار خزش در آزمایش تک محوری برای سطوح مختلف تنش [Tomanovic, 2006]

باربرداری: تومانوویچ در ترسیم نمودارهای باربرداری (شکل ۳)، نمودارها را به گونه ای تنظیم کرده است که بر بررسی مقدار برگشت پذیری کرنش ها تأکید بیشتری باشد. از این رو نمودار باربرداری را به صورت جداگانه ترسیم کرده و مبدأ نمودار را برای هر دو محور افق (زمان) و قائم (کرنش)، بر روی عدد صفر تنظیم کرده است (در واقع مبدأ نمودارهای باربرداری در شکل ۳، نقاط انتهایی نمودارهای بارگذاری در شکل ۲ هستند). در این مرحله نمونه هایی که در مدت زمان ۱۸۵ روز تا سطح تنش ۲ مگاپاسکال بارگذاری شده بودند، به صورت کلی و

خزشی موجود در این برنامه و مدل تابع زمان پیشنهادی، مورد ارزیابی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

۲- سازوکار پدیده خزش

سازوکار خزش شامل سه مرحله است که در شکل (۱) نمایش داده شده اند. معمولاً در سطح تنش های پایین، سازوکارهای خزشی از نوع ویسکوالاستیک اند (مرحله اول خزش)، و کرنش ها به کلی قابل بازگشت هستند [Terzaghi, 1946].



شکل ۱. نمودار خزش مصالح سنگی [Terzaghi, 1946]

اما در سطح تنش های بالاتر، علاوه بر کرنش های برگشت پذیر قسمتی از تغییر شکل ها از نوع ویسکوپلاستیک بوده (مرحله دوم خزش) و در آزمایش های باربرداری به صورت برگشت ناپذیر عمل می کنند [Tomanovic, 2006].

به منظور داشتن درک صحیح از این موضوع، تومانوویچ در سال ۲۰۰۶ بر روی ۶ نمونه دست نخورده سنگ مارن، آزمایش های تک محوری متعددی انجام داده است که در زیر به قسمتی از نتایج این آزمایش ها اشاره می شود:

بارگذاری: همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، سه نمونه از نمونه ها تا سطح تنش ۴ مگاپاسکال و سه نمونه دیگر تا سطح تنش ۲ مگاپاسکال بارگذاری شده اند. برای نمونه هایی که تا سطح تنش ۲ مگاپاسکال بارگذاری شده اند (نمودارهای پایین)، کرنش ها در ابتدا در مدت زمانی در حدود ۱۵ روز با نرخ کاهنده افزایش می یابند (کرنش از ۰/۰۰۱ به حدود ۰/۰۰۲۵ می رسد = مرحله اول خزش) و پس از آن با گذشت زمان، مقدار

بنابراین در بررسی رفتار خزشی سنگ‌ها، مدل‌های ویسکوالاستیک، چندان مناسب نبوده و لازم است از مدل‌های ویسکوپلاستیک استفاده شود. با این وجود هنوز در تحلیل بسیاری از تونل‌ها، از مدل‌های ویسکوالاستیک استفاده می‌شود.

۳- معرفی مدل‌های تابع زمان ویسکوالاستیک

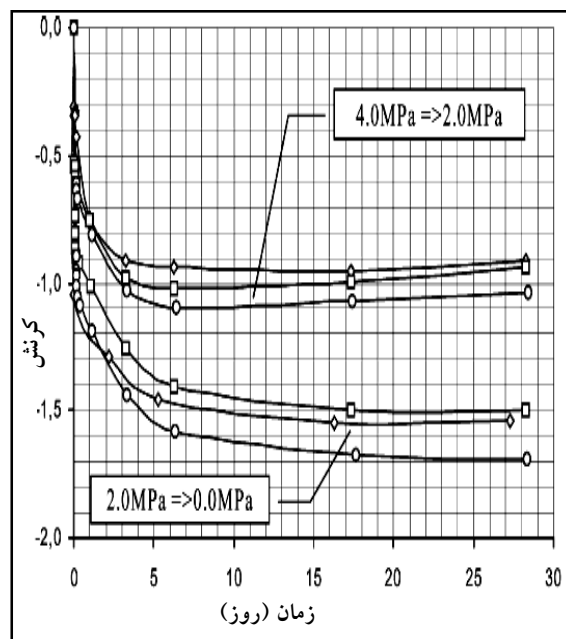
همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده، مدل ماکسول از یک فنر الاستیک تشکیل شده که با یک ویسکوز سری شده است. فنر الاستیک رفتار آنی سنگ را مدل کرده و ویسکوز تأثیر عامل زمان را در نمایش رفتار خزشی مصالح نشان می‌دهد. این مدل یک مدل رفتاری ویسکوالاستیک است و تنها کرنش‌های برشی برگشت‌پذیر را نشان می‌دهد.

مدل کلونین-وویت از یک فنر الاستیک تشکیل شده که با یک المان کلونین (فنر موازی با ویسکوز) سری شده است. فنر الاستیک رفتار آنی سنگ را مدل کرده و المان کلونین منجر به وجود آمدن مرحله اول خزش (افزایش کرنش توأم با کاهش نرخ) می‌شود. این مدل هم یک مدل رفتاری ویسکوالاستیک است و تنها کرنش‌های برشی برگشت‌پذیر را مدل می‌کند. مدل برگر از سری شدن المان ماکسول با المان کلونین تشکیل شده است. فنر الاستیک المان ماکسول رفتار آنی سنگ را مدل کرده و المان کلونین منجر ایجاد مرحله اول خزش (افزایش کرنش توأم با کاهش نرخ) می‌شود.

ویسکوز المان ماکسول هم منجر به ایجاد مرحله دوم خزش (افزایش کرنش‌ها با نرخ ثابت) می‌شود. این مدل هم یک مدل رفتاری ویسکوالاستیک است و تنها کرنش‌های برشی برگشت‌پذیر را مدل می‌کند. روابط ارائه شده برای هر یک از مدل‌ها محصول آزمایش خزش تک‌محوری بر روی نمونه‌های سنگی است که کرنش محوری وابسته به زمان را برای هر یک از این مدل‌ها در غالب روابط ارائه شده در جدول ۱ بیان می‌کند. که در این جدول K مدول بالک، G^M مدول برشی المان ماکسول، η^M ویسکوزیته المان ماکسول، G^K مدول برشی المان کلونین و η^K ویسکوزیته المان کلونین است.

نمونه‌هایی که در همین مدت زمان تا سطح تنش ۴ مگاپاسکال بارگذاری شده بودند، به صورت جزئی باربرداری می‌شوند (در مدت زمان ۳۰ روز).

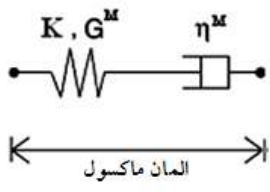
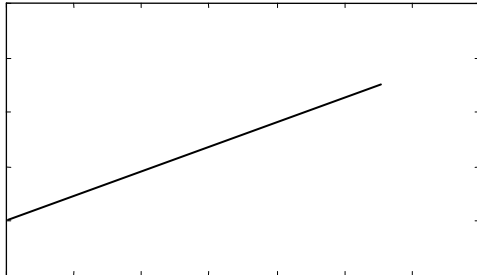
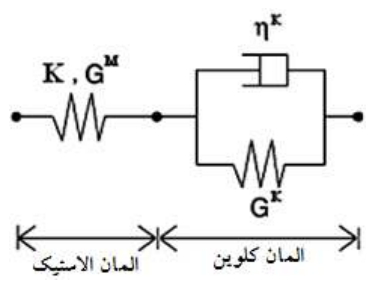
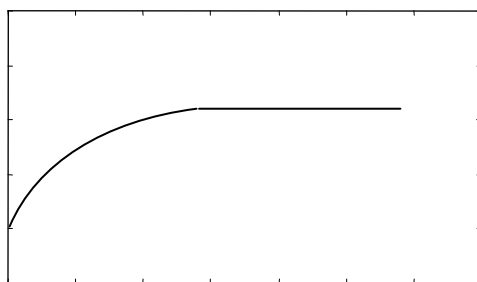
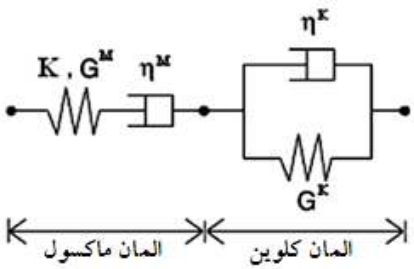
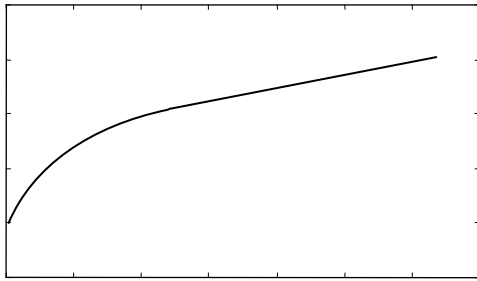
همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در نمونه کامل باربرداری شده (سطح تنش از ۲ مگاپاسکال به صفر رسیده است)، تنها کرنشی برابر با ۰/۰۰۱۵ برگشت‌پذیر بوده است. در واقع از حدود کرنشی معادل ۰/۰۰۲۵ که در مرحله‌ی بارگذاری ایجاد شده بود (شکل ۲)، آن برگشت‌پذیر و بقیه برگشت‌ناپذیر بوده است.



شکل ۳. نمودار خزش در آزمایش تک محوری برای باربرداری کلی و جزئی [Tomanovic, 2006]

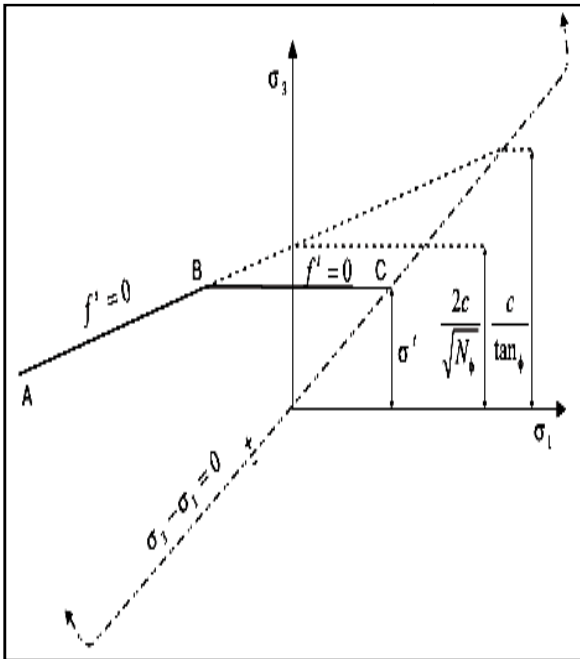
این واقعیت برای نمونه‌هایی که بخشی از تنش‌ها باربرداری شده (سطح تنش از ۴ مگاپاسکال به ۲ مگاپاسکال رسیده است) نیز صادق است. برای این حالت، از حدود ۰/۰۰۰۶ کرنش که در مرحله بارگذاری (شکل ۲) به دست آمده است، حدوداً ۰/۰۰۱ برگشت‌پذیر و بقیه برگشت‌ناپذیر است (شکل ۳). برگشت‌ناپذیری کرنش‌ها در بسیاری مدل‌های رفتاری تابع‌زمان نادیده گرفته شده است و این مدل‌ها کرنش‌های خزشی مرحله دوم را به کلی برگشت‌پذیر محسوب می‌کنند.

جدول ۱. مدل‌های تابع زمان ویسکوالاستیک [Goodman, 1989]

 <p>مدل تابع زمان ماکسول</p>	<p>کرنش</p>  <p>زمان</p>
 <p>مدل تابع زمان کلوین-وویت</p>	<p>کرنش</p>  <p>زمان</p>
 <p>مدل تابع زمان برگر</p>	<p>کرنش</p>  <p>زمان</p>

قابل ذکر است که رابطه تابع تسلیم در بسیاری منابع به صورت $\sigma_1 - \sigma_3 N\phi - 2c\sqrt{N\phi}$ از برنامه FLAC آمده شده است، اما در برنامه FLAC آنجا که تنش‌ها خود منفی هستند، طرفین رابطه در یک منفی ضرب شده است و بنابراین ترم $2c\sqrt{N\phi}$ در رابطه تابع تسلیم، علامت مثبت نوشته شده است. از نقطه B تا نقطه C تابع تسلیم کشش به صورت زیر تعریف شده است [Itasca]:

$$f' = \sigma' - \sigma_3 \quad (2)$$



شکل ۵. معیار گسیختگی مدل CVISC بر پایه مدل

موهر-کولمب [Itasca]

که زاویه اصطکاک، c چسبندگی، و σ' مقاومت کششی است و $N\phi$ برابر است با:

$$N\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

تابع پتانسیل برش g^s متناظر با قانون جریان غیروابسته بوده و به شکل زیر بیان می‌شود:

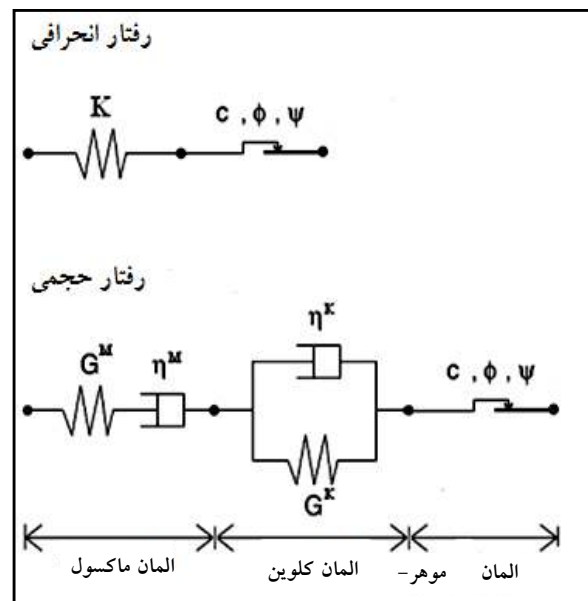
$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N\psi + 2c\sqrt{N\psi} \quad (4)$$

که ψ زاویه اتساع بوده و $N\psi$ برابر است با:

$$N\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (5)$$

۴- مدل برگر با سطح تسلیم موهر-کولمب

این مدل که در برنامه تفاضل محدود FLAC به مدل ویسکوپلاستیک CVISC معروف است، از پرکاربردترین مدل‌های رفتاری تابع زمان است [Barla, 2007]. مدل برگر با سطح تسلیم موهر-کولمب شامل یک المان برگر بوده (رفتار ویسکوالاستیک) که با یک لغزنده پلاستیک به صورت سری ترکیب شده است (شکل ۴). المان برگر در این مدل خزش مرحله اول و دوم را نشان می‌دهد، و لغزنده ویسکوپلاستیک با قابلیت نمایش کرنش‌های پلاستیک آنی مقادیر کرنش بیشتری را در مقایسه با مدل رفتاری برگر نمایش می‌دهند [Itasca].



شکل ۴. شکل شماتیک مدل تابع زمان CVISC [Barla, 2007]

۴-۱- توابع تسلیم و پتانسیل

در این مدل معیار گسیختگی در صفحه (σ_3, σ_1) به صورتی که در شکل (۵) نشان داده شده، نمایش داده می‌شود. لازم به توضیح است که در برنامه FLAC، تنش‌های فشاری، منفی فرض شده‌اند، از این رو نامساوی $\sigma_3 \geq \sigma_1$ بین تنش‌های اصلی برقرار است. پوش گسیختگی که از نقطه A تا نقطه B به وسیله تابع تسلیم موهر-کولمب تعریف شده است، به صورت زیر بیان شده است [Itasca]:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N\phi + 2c\sqrt{N\phi} \quad (1)$$

قرار دارد که این میزان تنش معادل عمقی برابر با ۴۰۰ متر است. پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ در جدول (۲) آورده شده است.

۱-۵- مطالعه عددی مدل‌ها به روش تفاضل محدود

به منظور مطالعه عددی مدل‌های تابع زمان ماکسول، کلونین-وویت، برگر و CVISC به روش تفاضل محدود از برنامه FLAC 2D استفاده شده است.

جدول ۲. پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ
[Sterpi and Gioda, 2007]

$K (MPa)$		۱۴۷۰
$G^M (MPa)$		۶۷۸
$\eta^M (MPa \cdot day)$		۳۲۱۵۵۵
$G^K (MPa)$		۵۸۴۸
$\eta^K (MPa \cdot day)$		۴۹۴۷۰
$c_{lim} (MPa)$	مقدار ماکزیمم	۱/۱۶
	مقدار ماندگار	۰/۰
$\phi_{lim} (^\circ)$	مقدار ماکزیمم	۳۲/۳
	مقدار ماندگار	۲۰
$\psi_{lim} (^\circ)$	مقدار ماکزیمم	۱۴
	مقدار ماندگار	۰/۰
$\eta_{lim}^{vp} (MPa \cdot day)$	مقدار ماکزیمم	۷۰۶
	مقدار ماندگار	۳۵۳

۲-۵- پیاده‌سازی هندسه مورد نظر در برنامه FLAC
به منظور پیاده کردن هندسه تونل مورد نظر در برنامه FLAC 2D به دلیل هیدرواستاتیک بودن شرایط، تنها یک چهارم هندسه تونل دایره‌ای و فضای توده‌سنگ اطراف، در برنامه مدل شده است. برای این منظور تعداد ۱۰۰۰۰ المان انتخاب و یک چهارم دهانه تونل در فضایی متشکل از ۱۳ المان مطابق شکل (۶) پیاده شده است.

قانون جریان وابسته برای گسیختگی کششی از تابع پتانسیل g^t با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$g^t = -\sigma_3 \quad (6)$$

قوانین جریان برای گسیختگی برشی و گسیختگی ناشی از کشش به ترتیب برابر است با:

$$\Delta e_i^p = \lambda^s \frac{\partial g^s}{\partial \sigma_i} \quad (7)$$

$$\Delta e_i^p = \lambda^t \frac{\partial g^t}{\partial \sigma_i} \quad (8)$$

۲-۴- نرخ رشد پلاستیک

مقادیر نرخ رشد پلاستیک برای گسیختگی برشی و کششی هم به ترتیب برابرند با:

$$\lambda^s = \frac{f^s}{(\alpha_1 - \alpha_2 N \psi) - (\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (9)$$

$$\lambda^t = \frac{f^t}{\alpha_1} \quad (10)$$

که مقادیر α_1 و α_2 به ترتیب برابرند با:

$$\alpha_1 = K + \frac{2}{3a} \quad (11)$$

$$\alpha_2 = K - \frac{1}{3a}$$

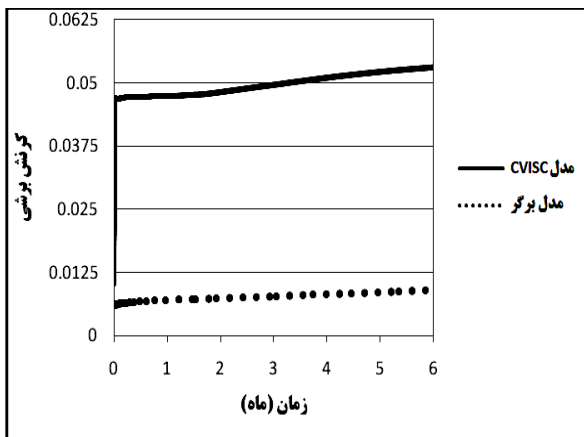
که مقدار a برابر است با:

$$a = \frac{1}{2G^M} + \frac{\Delta t}{4} \left(\frac{1}{\eta^M} + \frac{1}{A\eta^K} \right) \quad (12)$$

۵- ارزیابی رفتار خزشی مدل‌های رفتاری

به منظور ارزیابی مدل‌های تابع‌زمان مذکور، تونلی دایره‌ای در شرایط هیدرواستاتیک بررسی می‌شود. (لازم به ذکر است، کلیه مشخصات این تونل و توده‌سنگ مذکور از اطلاعات مندرج در مقاله استرپی و جیودا [Sterpi and Gioda, 2007] دریافت گردیده است. این تونل با مقطع دایره‌ای به شعاع ۴/۵ متر در توده‌سنگی از جنس سنگ شیست، همگن و ایزوتروپ حفاری شده است. تونل مذکور در معرض تنش همسان $\sigma_0 = 10MPa$

شکل ۸ نمودار خزش را برای دو مدل رفتاری برگر و CVISC نشان می‌دهد. دو نمودار تقریباً با یکدیگر موازی هستند و این به علت کرنش‌های پلاستیک آنی است که مدل رفتاری CVISC نشان می‌دهد (ناشی از لغزنده پلاستیک) و این اختلاف تا پایان دوره ۶ ماهه حفظ می‌شود. با این وجود مدل رفتاری CVISC هم به دلیل عدم نمایش کرنش‌های برشی پلاستیک خزشی، مدل چندان مناسبی برای تحلیل‌های خزشی نیست.

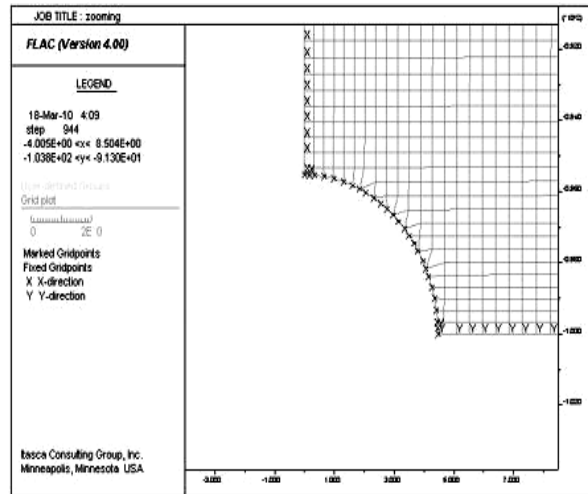


شکل ۸. نمودار خزش ۶ ماهه

به منظور رفع این نقیصه، مدل رفتاری ارایه شد تا بتواند تا حد امکان ایراد وارد بر مدل رفتاری CVISC را رفع کرده و رفتار پلاستیک خزشی سنگ را به شکل مطلوبی مدل کند.

۶- ارایه مدل رفتاری پیشنهادی

شکل ۹ مدل رئولوژیک ارایه شده را نمایش می‌دهد، در این مدل به منظور شبیه‌سازی رفتار ویسکوالاستیک از مدل رفتاری برگر استفاده شده است، المان برگر مراحل اول و دوم خزش را با رفتار الاستیک مدل می‌کند. به منظور در نظر گرفتن کرنش‌های برگشت‌ناپذیر در مرحله دوم خزش و البته امکان نمایش مرحله سوم خزش، المان ویسکوپلاستیک به‌صورتی که در شکل (۹- الف) نمایش داده شده، مورد استفاده قرار گرفته است. المان ویسکو- پلاستیک شامل یک جسم ویسکوز است که با لغزنده پلاستیکی موازی شده است که پوش حد ویسکو-پلاستیک موهروکولمب $(F^{vp}(\sigma) = 0)$ را نشان می‌دهد. تنش ثابت خیلی زیاد تا سرحد $F^{vp}(\sigma)$ تا زمانی که پارامترها (C, ϕ, ψ, η) ثابت هستند، خزش ثانویه را القا می‌کند. نرخ کرنش وابسته به

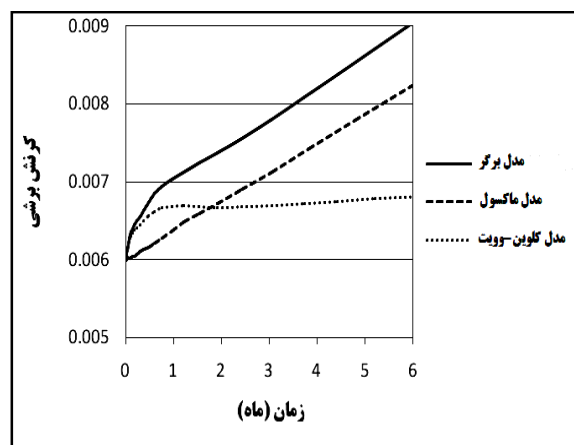


شکل ۶. مش‌بندی هندسه تونل مورد استفاده

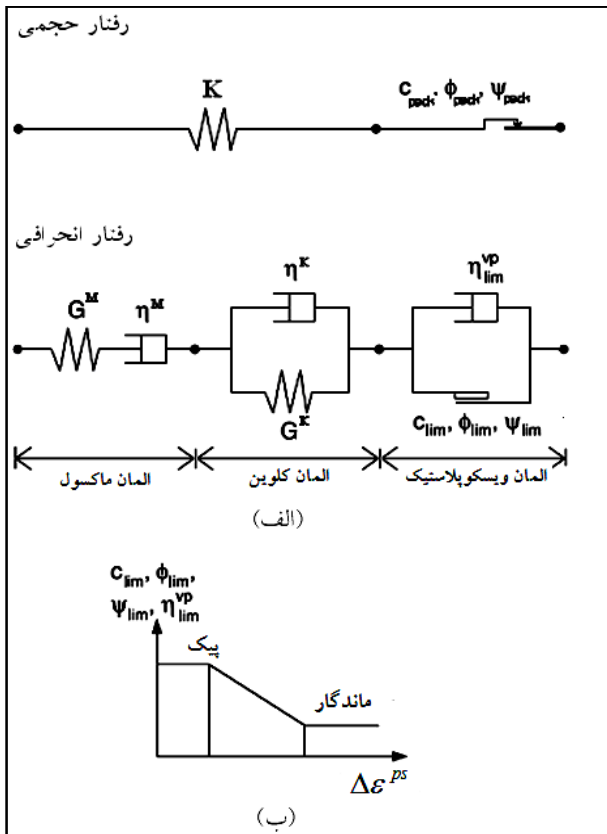
پس از پیاده‌سازی مدل‌های مذکور در هندسه فوق، یک تحلیل خزشی ۶ ماهه انجام گرفت.

۵-۳- نمودار خزش در مدت زمان ۶ ماه

همان‌طور که در شکل ۷ نمایش داده شده است، حدوداً پس از ۱ ماه نمودار خزش دو مدل برگر و کلونین- وویت، در مرحله اول قرار دارد. با این تفاوت که نمودار خزش مدل برگر به علت وجود ویسکوز المان ماکسول و تأثیر عامل زمان، مقادیر کرنش بیشتری را نشان داده و پس از این مدت، مرحله دوم خزش آغاز می‌شود. اما مدل کلونین- وویت پس از خزش مرحله اول مقادیر ثابت کرنش را با گذشت زمان نشان می‌دهد که این مرحله را در نمودار خزش اصطلاحاً حالت پایدار می‌نامند. چنانچه در شکل نشان داده شده، مدل ماکسول از ابتدا مرحله دوم را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمودار خزش ۶ ماهه



شکل ۹. شکل شماتیک مدل رفتاری پیشنهادی

و رابطه حاکم بر المان لغزنده ویسکوپلاستیک:

$$\begin{cases} \dot{e}_{ij}^{vp} = \dot{\lambda} \cdot \frac{\partial g}{\partial \sigma_i} - \frac{1}{3} \dot{e}_{vol}^{vp} \cdot \delta_{ij} \\ \dot{e}_{vol}^{vp} = \dot{\lambda}^* \left[\frac{\partial g}{\partial \sigma_{11}} + \frac{\partial g}{\partial \sigma_{22}} + \frac{\partial g}{\partial \sigma_{33}} \right] \end{cases} \quad (17)$$

و رفتار حجمی مدل مطابق الگوی زیر به دست می آید:

$$\dot{\sigma}_0 = K (\dot{e}_{vol} - \dot{e}_{vol}^{vp}) \quad (18)$$

قانون جریان حاکم به صورت زیر بیان شده است:

$$\dot{e}^{vp} = \dot{\lambda} \cdot \frac{\partial g}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma^{vp}} \quad (19)$$

و در نهایت با داشتن توابع تسلیم و پتانسیل موهرکولمب، نرخ رشد پلاستیک به صورت زیر بیان می شود:

$$\dot{\lambda}^* = \frac{3}{2\eta^{vp} (3 - \sin \varphi_{lim})} * \quad (20)$$

$$[\sigma_1 (1 - \sin \varphi_{lim}) - \sigma_3 (1 + \sin \varphi_{lim}) + 2c_{lim} \cos \varphi_{lim}]$$

مقدار ضریب ویسکوزیته η^{vp} (مربوط به المان ویسکوپلاستیک) است و بخش تنش انحرافی (رابطه ۱۸) را ویسکوز متحمل می شود. در واقع نقش ویسکوز، در این المان اثر زمان است. اگر ضعیف شدن ویسکوز، یا تقلیل حد تنش $F^{vp}(\sigma) = 0$ (ضعیف شدن لغزنده پلاستیک)، با افزایش کرنش ها همراه شوند، نرخ کرنش پلاستیک افزایش می یابد و منجر به مرحله سوم خزش و در نهایت گسیختگی می شود.

در این مدل به منظور شبیه سازی مرحله سوم خزش و واقعیت کاهش پارامترهای مکانیکی توده سنگ در مواجهه با پدیده خزش، از یک تابع خطی که کاهش این مقادیر را در برابر افزایش کرنش های پلاستیک برشی نشان می دهد، استفاده شده است [شکل (۹-ب)]. پارامترهای المان ویسکوپلاستیک (C, ϕ, ψ, η) در واقع تابعی از نمو کرنش های پلاستیک برشی $(\Delta \epsilon^{ps})$ است و این تابع در FLAC با استفاده از قابلیت برنامه نویسی این نرم افزار (زبان برنامه نویسی FISH) نوشته شده است.

در کد نوشته شده تا زمانی که کرنش ها در مرحله الاستیک هستند این تابع فعال نبوده و پارامترهای مذکور، مقادیر اوج خود را دارا هستند، اما با افزایش کرنش ها و وارد شدن آنها به مرحله پلاستیک، مقادیر آنها شروع به تقلیل می کنند.

در این مدل رابطه زیر بین مقادیر نرخ کرنش های المان ها برقرار است.

$$\dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^K + \dot{e}_{ij}^M + \dot{e}_{ij}^{vp} \quad (13)$$

رابطه حاکم بر المان ماکسول به صورت زیر بیان شده است [Goodman, 1989]:

$$\dot{e}_{ij}^M = \frac{\dot{S}_{ij}}{2G^M} + \frac{S_{ij}}{2\eta^M} \quad (14)$$

و رابطه حاکم بر المان کلوین به صورت زیر بیان شده است [Goodman, 1989]:

$$S_{ij} = 2G^K \cdot e_{ij}^K + 2\eta^K \cdot \dot{e}_{ij}^K \quad (15)$$

رابطه ویسکوز المان ویسکوپلاستیک به صورت زیر است:

$$S_{ij}^{vp} = \eta^{vp} \cdot \dot{e}_{ij}^{vp} \quad (16)$$

کلونین- وویت به علت نمایش هر دو مرحله نخست خزش، مدل مناسب‌تری است.

مدل رفتاری CVISC در مقایسه با مدل برگر، به علت نمایش کرنش‌های پلاستیک آنی رفتار خزشی سنگ را به شکل واقعی‌تری مدل می‌کند. بنابراین مدل‌های رفتاری ویسکوپلاستیک به علت ناتوانی در نمایش کرنش‌های برگشت‌ناپذیر، مدل‌های مناسبی برای نمایش رفتار خزشی سنگ‌ها نیستند.

به‌منظور رفع نقایص موجود، مدل رفتاری تابع زمانی پیشنهاد شد تا در حد امکان نارسایی‌های مذکور را برطرف سازد. این مدل توانایی نمایش تقلیل پارامترهای مکانیکی سنگ را با گذشت زمان داشته و مرحله سوم خزش را مدل می‌کند. افزون بر این بخش برگشت‌ناپذیر کرنش‌ها را در مرحله دوم خزش، مدل می‌کند.

۹- مراجع

- Barla, G., Bonini, M. and Debernardi, D. (2007) "Modelling of tunnels in squeezing", Rock 3rd Iranian Rock Mechanics Conference, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
- Goodman, R. E. (1989) "Rock mechanics", New York, Wiley, pp. 202-210.
- Hoek, E. and Marinos, P. (2000) "Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses". Tunnels and Tunneling International, pp. 45-51: part one; pp. 33-36: part two.
- ITASCA – FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua. Ver. 4.307, User's manual.
- Sterpi, D. and Gioda, G. (2007) "Visco - plastic behaviour around advancing tunnels in squeezing rock", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 42, Number 2, pp. 319-339.
- Terzaghi, K. (1946) "Rock defects and loads in tunnel supports, rock tunneling with steel supports". R. V. Proctor and T. L. White eds., The Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, Ohio, pp. 17-99.
- Tomanovic, Z. (2006) "Rheological model of soft rock creep based on the tests on marl", Mech Time-Depend Mater., vol., 10. pp. 135-154.

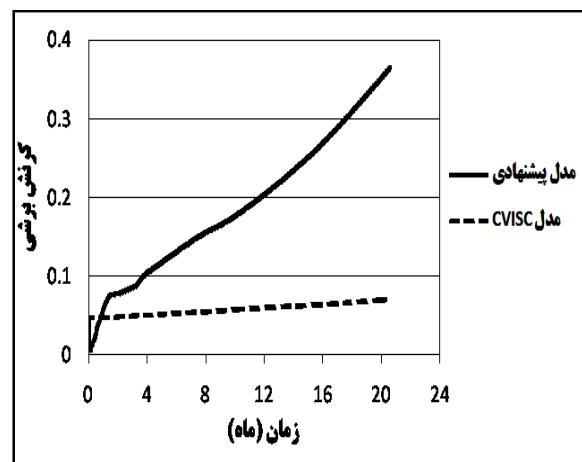
و مقادیر نرخ کرنش ویسکوپلاستیک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\epsilon}_1^{vp} = (1 - \sin \psi_{lim}) * \dot{\lambda}^s \quad (21)$$

$$\dot{\epsilon}_3^{vp} = -(1 + \sin \psi_{lim}) * \dot{\lambda}^s \quad (22)$$

۷- مقایسه دو مدل CVISC و مدل پیشنهادی

به‌منظور بررسی صحت عملکرد مدل، مدل مذکور بر روی تونل دایره‌ای معرفی شده، پیاده و نتایج به صورت شکل (۱۰) ارایه شده است:



شکل ۱۰. نمودار خزش ۲ ساله دیواره تونل، مدل رفتاری CVISC و مدل رفتاری پیشنهادی

نتایج حاصل از تحلیل خزشی ۲ ساله تونل مذکور، چنین نتیجه می‌دهد که مدل پیشنهادی، قابلیت نمایش مرحله سوم خزش را دارد. علاوه بر این کرنش‌های خزشی پلاستیک را با گذشت زمان نشان می‌دهد، درحالی که مدل CVISC تنها کرنش‌های پلاستیک آنی را نشان می‌دهد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، چهار مدل رفتاری ماکسول، کلونین- وویت، برگر و CVISC به وسیله یک مثال عددی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. از مقایسه این چهار مدل پرکاربرد می‌توان چنین نتیجه گرفت که: مدل رفتاری برگر در مقایسه با دو مدل رفتاری ماکسول و