

ارزیابی کرنش‌های تورمی در تونل به روش تحلیلی

احمد فهیمی‌فر^{۱*}؛ داوود پارساپور^۲

چکیده

در این مقاله کرنش‌های تورمی در زمین اطراف تونل براساس مدل ریاضی تعمیم یافته‌اند و به صورت تابعی از زمان و تنش در توده سنگ تعیین شده‌اند. با توجه به نمودارهای توسعه‌ی کرنش‌های تورمی- زمان از روی نتایج آزمایشگاهی گذشته، مدل ریاضی مناسبی برای این کرنش‌ها در نظر گرفته شده است. این کرنش‌ها باعث همگرایی و کاهش سطح مفید تونل می‌شوند. در این روش تحلیلی، کرنش‌های تورمی در زمان‌های معین، از شروع حفاری تا پس از نصب حائل، برای نقاط روی جداره‌ی تونل محاسبه شده و با کرنش‌های ناشی از بارگذاری جمع شده‌اند و سپس با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند که نتایج قابل قبولی حاصل بدست آمده است.

با این روش تحلیل می‌توان حداکثر تاخیر ممکن در نصب حائل را با در نظر گرفتن زمان خود ایستایی زمین اطراف تونل به طوری در نظر گرفت که حداکثر رهاسازی تنش در زمین و تا حد امکان، حداقل تنش‌ها در حائل ایجاد شود. از دیگر قابلیت‌های این روش تحلیل، بررسی اثر شکل مقطع در میزان کرنش‌های تورمی و نیز اثر حائل‌های انعطاف‌پذیر در تنش‌های ایجاد شده در حائل تونل در سنگ‌های تورمی است.

کلمات کلیدی

روش تحلیلی، کرنش‌های تورمی، همگرایی تونل، حائل، زمان خود ایستایی.

Evaluation of Swelling Strain in the Tunnel by Analytical Method

A. Fahimifar; D. Parsapour

ABSTRACT

In this project, swelling strain and stress caused by tunnel excavation is determined. Two main parts of the performed analysis is mentioned here. First, swelling differential equation is solved by analytical method and the swelling quantities related to tunnel environment is calculated. Then in the second part, the amount of stresses of the tunnel environment caused by tunnel excavation is evaluated. Calculations of this part are processed by a finite element method that use isoperimetric element to model the tunnel. MATLAB code is used to process numerical model of the second part.

KEYWORDS

Analytical method, Swelling Strain, Tunnel converging, Support, Stand-up time.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۱/۸

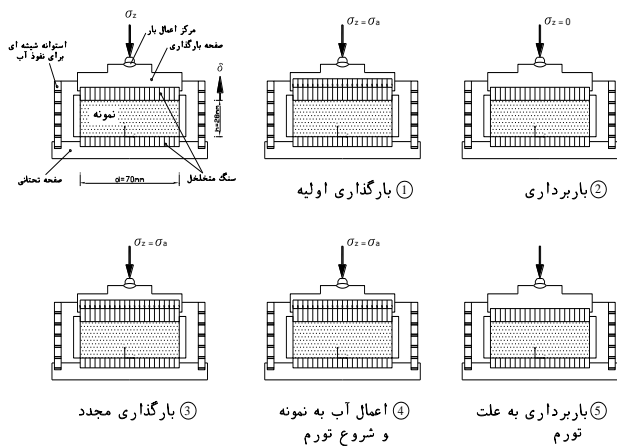
تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۹/۹

*نویسنده مسئول و استاد دانشکده‌ی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ fahim@aut.ac.ir؛ تلفن: ۰۲۱-۶۴۵۴۳۰۱۱

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ parsa@aut.ac.ir

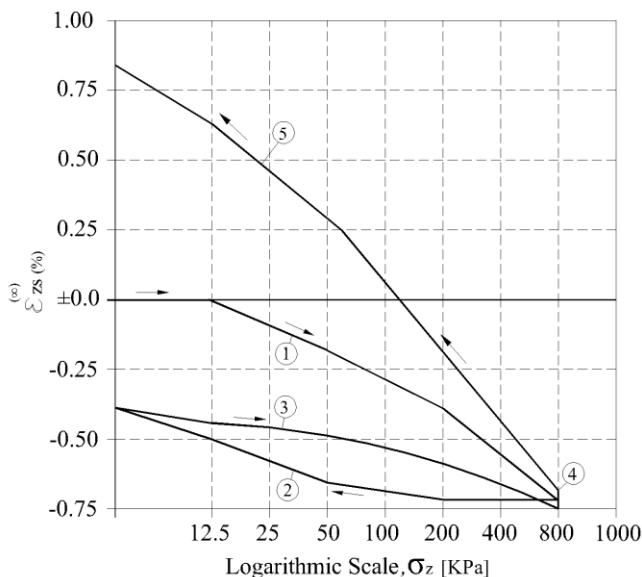
شیمیایی در حضور آب است که به طور معمول با آزاد شدن تنش همراه است. تعریف ساده‌شده‌ی ISRM از این پدیده عبارت است از: "افزایش حجم وابسته به زمان زمین که در

۱- مقدمه
به طور عموم تورم سنگ نتیجه نوعی واکنش فیزیکی



شکل (۱): دستگاه و مراحل انجام آزمایش تورم توسط هودر و امبرگ

نتایج آزمایش‌های هودر و امبرگ در شکل (۲) نشان داده شده است [۲]. این شکل وابستگی کرنش‌های تورمی را به تنش نشان می‌دهد.



شکل (۲): نتایج آزمایش تورم توسط هودر و امبرگ [۲]

گروپ نتایج آزمایش‌های تورمی هودر و امبرگ را به صورت یک رابطه‌ی ریاضی بیان نمود که به صورت رابطه‌ی (۱) بیان شده است [۶]:

$$\epsilon_{zs}^{\infty} = K_q \cdot \log(\sigma_z / \sigma_0) \quad (1)$$

که در آن ϵ_{zs}^{∞} ، K_q ، σ_z و σ_0 به ترتیب کرنش تورمی، ضریب تغییرشکل تورمی (بدون بعد)، تنش قائم روی نمونه و تنش اعمالی به نمونه که به ازای آن کرنش تورمی رخ خواهد داد، هستند. شکل (۳) رابطه‌ی (۱) را در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد [۴].

نهایت منجر به تغییر مکان داخلی در محیط تونل می‌شود. در نتیجه‌ی این فرآیند، توده سنگ با گذشت زمان افزایش حجم می‌یابد. زمین‌های تورمی از مشکلات اساسی در تونل‌ها به هنگام تونل‌زنی هستند. در این حالت، زمین اطراف تونل در طی زمان فشارهای فزاینده‌ای را به سیستم حائل وارد می‌کند و تحلیل، طراحی و پایداری تونل در این زمین‌ها با پیچیدگی همراه خواهد شد. شناخت کم از این زمین‌ها و در نظر نگرفتن شرایط لازم برای سیستم حائل تونل که بتواند با شرایط این زمین‌ها سازگار باشد، منجر به خرابی و شکست سیستم حائل تونل پس از اجرا می‌شود. این موضوع استفاده از تونل را با مشکل روبرو ساخته و علاوه بر از دست دادن زمان و صرف هزینه‌های چندباره، لازم است تونل دوباره تعریض شود تا امکان استفاده از آن فراهم گردد.

تورم، باعث حرکت سنگ به داخل تونل می‌شود که این حرکت در محیط تونل با گذشت زمان ایجاد می‌شود. افزایش سرعت حرکت و بزرگی تغییر مکان‌ها اغلب در سطح تونل متغیر بوده و وابسته به جنس زمین، وضعیت تنش‌های اصلی (موقعیت قرارگیری و زاویه آنها نسبت به افق) و شکل تونل است. نوع مشخصی از سنگ‌ها، به خصوص آن‌هایی که شامل مواد معدنی رسی و آئیدریت هستند، درحالتی که درصد رطوبت آن‌ها تغییر می‌کند، تغییر حجم می‌دهند. مثال‌هایی از چنین سنگ‌ها می‌تواند شامل انواع شیل و سنگ‌هایی که ترکیبات آئیدریت و رس دارند، باشد. اگر جلوی این تغییرشکل‌ها گرفته شود، ممکن است فشارهای تورمی بالایی به وجود آید. تنش‌هایی که در اثر جلوگیری از تغییرشکل تورمی در حائل ایجاد می‌شوند را فشار تورمی گویند. این فشار در اثر جلوگیری از تغییرشکل تورمی تا ۱۰ برابر ممکن است زیاد شود.

۲- اثر تنش در تغییر شکل‌های تورمی

افزایش حجم در زمین‌های تورمی تابعی از وضعیت تنش حاکم در توده سنگ است. بنابراین در یک سطح تنش فشاری خاص، دیگر تورمی رخ نخواهد داد؛ که این سطح تنش با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی در هر زمین متفاوت خواهد بود [۱]. وابستگی تورم به تنش را هودر و امبرگ در آزمایش‌هایی بر روی سنگ‌های مارنی و رسی اثبات نموده‌اند. مراحل انجام این آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است [۲]، [۳].

$$\frac{d\varepsilon_{zs}(t)}{dt} = \frac{\varphi(\sigma, \varepsilon_{zs})}{\eta_q} = \frac{\varepsilon_{zs}(\infty) - \varepsilon_{zs}(t)}{\eta_q} \quad ; \quad (3)$$

$$\varphi(\sigma, \varepsilon_{zs}) = \varepsilon_{zs}(\infty) - \varepsilon_{zs}(t)$$

برای حل معادله‌ی فوق از روش حل معادله‌ی دیفرانسیل دو متغیره‌ی برنولی استفاده شده است که نتیجه‌ی آن عبارت است از:

$$\varepsilon_{zs}(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_{zs}(\sigma_z(t), \varepsilon_{zs}(t)) dt = \int_0^t \frac{\varphi(\sigma, \varepsilon_{zs})}{\eta_q} dt \quad (4)$$

$$\varepsilon_{zs}(t) = \varepsilon_{zs}(\infty) + a \cdot e^{(-t/\eta_q)} \quad (5)$$

شرایط مرزی به صورت رابطه‌ی (۶) خواهد بود:

$$\begin{cases} t = 0 \\ \varepsilon_{zs}(t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

با اعمال شرایط مرزی فوق، عامل a محاسبه می‌شود:

$$a = -\varepsilon_{zs}(\infty) \quad (7)$$

بنابراین رابطه‌ی نهایی کرنش‌های تورمی براساس زمان و

تنش به صورت رابطه‌ی (۸) بیان خواهد شد:

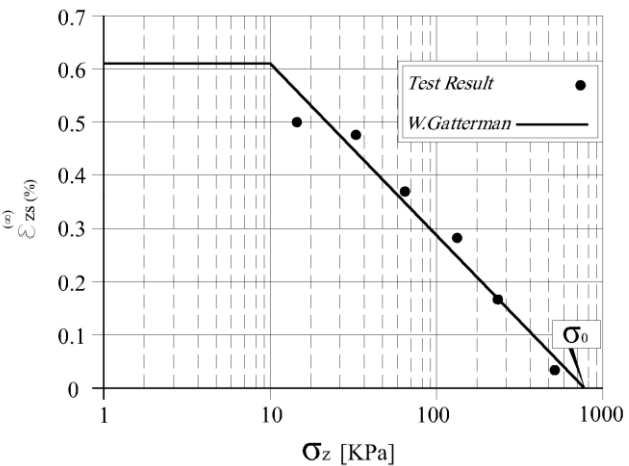
$$\varepsilon_{zs}(t) = \left(1 - e^{(-t/\eta_q)}\right) \cdot K_q \cdot \log(\sigma_z / \sigma_0) \quad (8)$$

که در آن σ_z ، K_q ، t ، $\varepsilon_{zs}(t)$ ، σ_0 و η_q به ترتیب کرنش تورمی در جهت اصلی، زمان، ضریب تغییرشکل تورمی (بدون بعد)، تنش قائم روی نمونه، تنش اعمالی به نمونه که به ازای آن کرنش تورمی رخ خواهد داد و مدول زمانی تورم بر حسب واحد زمان است.

با به دست آوردن عامل‌های K_q ، η_q و σ_0 می‌توان مقادیر کرنش‌های تورمی را در هر سطح تنش و در هر بازه‌ی زمانی دلخواه محاسبه نمود. میزان تنش در توده سنگ را می‌توان از تحلیل اطراف تونل با روش‌های عددی موجود مانند روش اجزای محدود یا روش‌های حل بسته محاسبه نمود و ضریب تغییر شکل تورمی و پتانسیل تورم از طریق روش‌های آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. در اینجا برای تحلیل تورم برنامه‌ی کامپیوتری در محیط مطلب تهیه شده است که نتایج آن در بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد.

۴- بررسی نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی

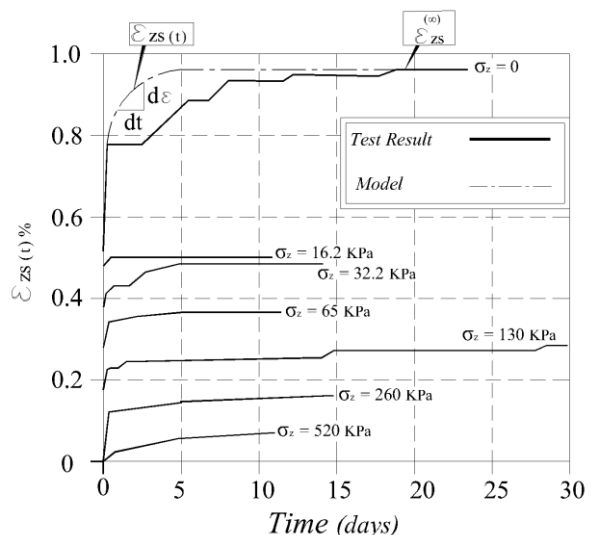
آزمایش‌های هودر و امبرگ که بر روی سنگ‌های تورمی انجام شد، کرنش‌های تورمی را به صورت تابعی از زمان و تنش نشان می‌دهند که در این مقاله از این آزمایش‌ها به عنوان مطالعه‌ی موردی استفاده شده است. برای این مقایسه باید ابتدا



شکل (۳): مدل ریاضی کرنش تورمی براساس تنش قائم در مقیاس لگاریتمی [۵]، [۶]

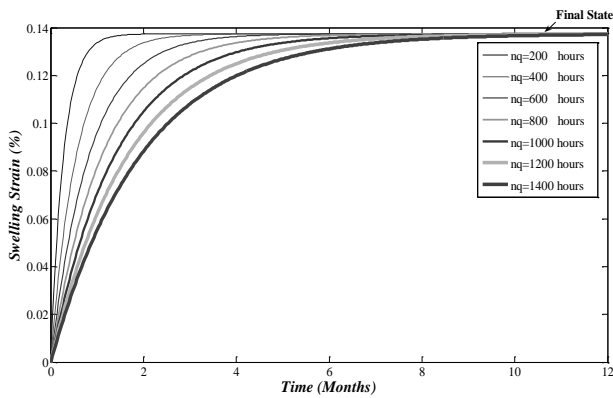
۳- تعمیم مدل رفتاری سنگ‌های تورمی بر اساس زمان و تنش

معادلات ساختاری که در بخش قبل بیان شده‌اند محدود به مقدار کرنش‌های تورمی در وضعیت نهایی و پایداری کرنش‌ها ($t = \infty$) هستند که تعیین مقادیر آن‌ها در طی زمان ممکن نیست. بدین منظور با توجه به نتایج آزمایش و روند پیشرفت کرنش‌های تورمی در طی زمان و همچنین با توجه به ثابت شدن مقدار این کرنش‌ها پس از مدت زمان طولانی، می‌توان از روابط تحلیلی و ریاضی و با استفاده از مقدار نهایی کرنش‌های تورمی رابطه‌ی ریاضی کرنش تورمی را به صورتی که در ادامه آمده است بیان نمود. جزئیات کار در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): مدل ریاضی کرنش‌های تورمی- زمان

$$\frac{d\varepsilon_{zs}(t)}{dt} = \frac{\varepsilon_{zs}(\infty) - \varepsilon_{zs}(t)}{\eta_q} \quad (2)$$



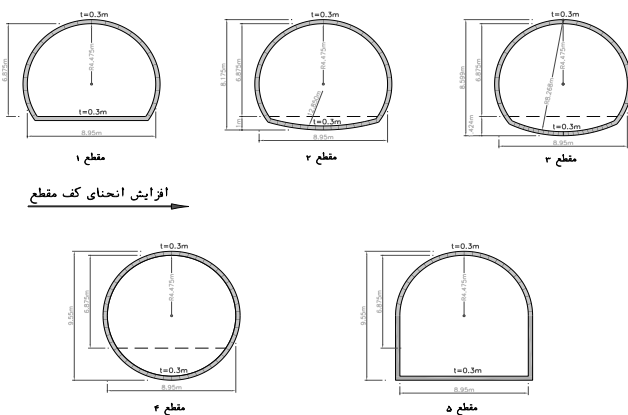
شکل (۶): اثر h_q در میزان کرنش‌های تورمی

اغلب h_q به میزان رطوبت زمین (درجه‌ی اشباع)، جنس کانی‌های سنگ، توزیع درزه‌ها و نفوذپذیری توده بستگی دارد. درجه‌ی اشباع بالا، نفوذپذیری بالا و کانی سنگ‌ها با پتانسیل تورمی بالا مانند شیل‌ها باعث کاهش h_q و نیز کاهش زمان لازم برای رسیدن به حداکثر کرنش تورمی می‌شود [۵].

۶- اثر شکل مقطع تونل در میزان تغییرشکل‌های

تورمی

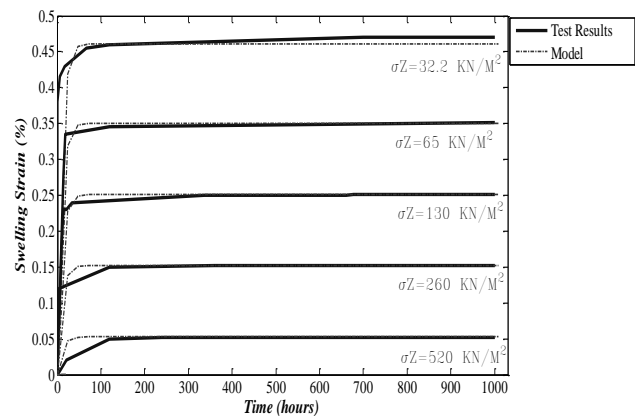
برای بررسی اثر شکل مقطع در تغییر شکل‌های تورمی، پنج تونل با مقاطع مختلف و رایج در نظر گرفته شده است. این مقاطع در شکل (۷) آورده شده‌اند. همه‌ی مشخصات مدل‌ها از جمله ضخامت روباره یکسان است و تنها تفاوت آن‌ها در هندسه‌ی مقطع تونل است. برای تحلیل تنش‌ها از روش عددی المان‌های محدود با استفاده از المان‌های ایزوپارامتریک $Q4$ با فرض شرایط کرنش مسطح استفاده شده است. برای انجام تحلیل عددی و همچنین حل روابط تغییرشکل‌های تورمی از قابلیت کدنویسی نرم‌افزار مطلب استفاده شده است. گفتنی است که برای مش‌بندی و همچنین شماره‌گذاری المان‌ها و گره‌ها در همه‌ی مدل‌ها از قابلیت مش‌بندی خودکار نرم‌افزار انسیس استفاده شده است.



شکل (۷): مقاطع انتخابی تونل برای بررسی اثر شکل مقطع بر میزان

تورم

مقدار h_q برای نمونه‌ی مورد آزمایش محاسبه شود. برای این‌کار از ۲ سری آزمایش برای تعیین h_q استفاده شده و سپس با تعیین این مقدار، مدل تحلیلی با سایر آزمایش‌ها مقایسه خواهد شد. با روش سعی و خطا مقدار h_q برای نمونه‌ی مورد آزمایش برابر با ۱۰ ساعت بدست آمد. با استفاده از این مقدار و رابطه‌ی (۸)، مقادیر کرنش‌های تورمی در سطوح تنش متفاوت محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. این مقایسه در شکل (۵) آورده شده است.



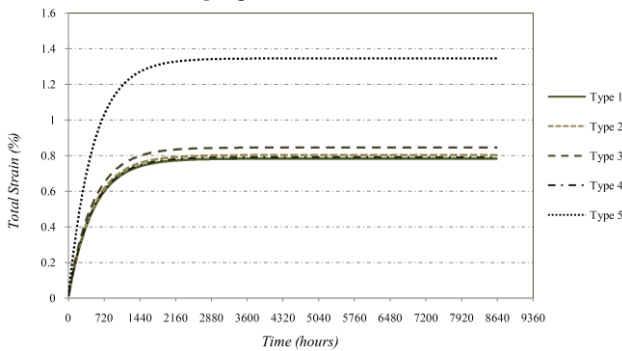
شکل (۵): مقایسه‌ی مدل تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی

همان‌طور که دیده می‌شود نتایج قابل قبولی بدست آمده است و به‌طور میانگین خطا کمتر از ۳٪ است. قابل توجه است که در سطوح تنش پایین، خطای مدل رفته رفته زیاد و تا حدود ۵ درصد هم می‌رسد که علت آن اثر کم تنش‌های کوچک در میزان کرنش‌های تورمی است.

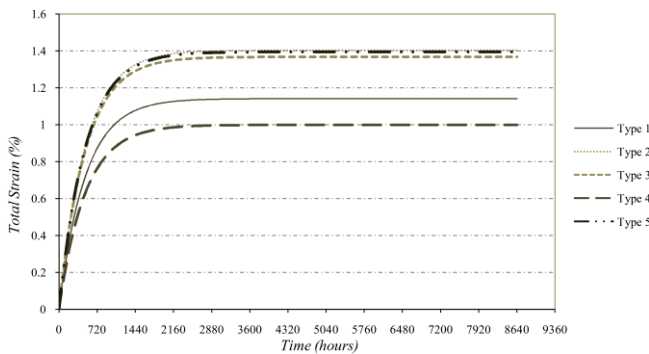
۵- اثر h_q در میزان کرنش‌های تورمی

h_q که همان مدول زمانی کرنش‌های تورمی است، در واقع نشان‌دهنده‌ی نرخ پتانسیل تورمی توده‌سنگ است. اگر $1/h_q$ زیاد باشد، توده‌سنگ در مدت زمان کمتری به کرنش حداکثر خواهد رسید و سرعت رشد کرنش بیشتر خواهد بود و اگر $1/h_q$ کم باشد، توده‌سنگ در مدت زمان طولانی‌تری به کرنش‌های حداکثر خواهد رسید. به‌طور کلی می‌توان گفت که در زمین‌های با $1/h_q$ بالا زمان خود ایستایی تونل پایین بوده و نیاز به نصب سریع حائل موقت (یا دائم) خواهد بود. در شکل (۶) اثر h_q در میزان کرنش‌های تورمی نشان داده شده است.

(مقطع دایره‌ای کامل) از همه کمتر است. به‌طور تقریبی حداکثر کرنش تورمی ۴ ماه پس از حفاری مقطع رخ می‌دهد.



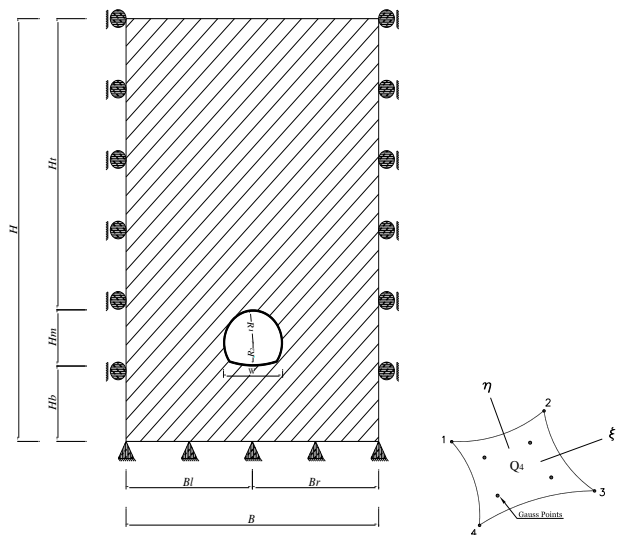
شکل (۱۰): نمودار کرنش افقی کل در برابر زمان در دیواره‌ی تونل



شکل (۱۱): نمودار کرنش قائم کل در برابر زمان در کف تونل

۷- نتیجه‌گیری

با توسعه‌ی مدل گروپ و در نظر گرفتن اثر میزان تنش در آن می‌توان رفتار سنگ‌های تورمی را کامل‌تر پیش‌بینی نمود. از طرفی همگرایی تونل در زمین‌های تورمی همواره از مسائل اساسی و مبهم بوده است. بنابراین با مدل ارائه شده در این مقاله می‌توان این تغییرشکل‌ها را محاسبه و راه‌حل‌های مناسب برای مقابله با آن را انتخاب نمود. میزان تورم در یک زمان ثابت به میزان تنش و پتانسیل تورمی زمین میزبان بستگی دارد که تنش در توده‌سنگ را می‌توان از تحلیل‌های عددی تونل و پتانسیل تورم را از آزمایش‌های تورمی بر روی سنگ میزبان به‌دست آورد. با توجه به اینکه کرنش‌های تورمی با گذشت زمان افزایش می‌یابند بنابراین در زمین‌های با پتانسیل تورمی بالا (K_q) و مدول تورمی (h_q) کم، استفاده از حائل‌های موقت مانند شاتکریت و همچنین حائل‌های چندتکه می‌تواند باعث کاهش تنش‌های تورمی شود. همچنین تاخیر در نصب حائل نهایی (در صورت امکان) می‌تواند منجر به رهاسازی تنش و کم شدن نیروهای ایجاد شده در حائل شود. با توجه به نتایج تحلیل تونل‌ها با مقاطع مختلف می‌توان گفت که استفاده از قوس‌ها با انحنای بیشتر در کف تونل می‌تواند نقش بسزایی در کاهش کرنش‌های تورمی و تنش‌های ایجاد شده در حائل داشته



شکل (۹): هندسه‌ی مدل مورد استفاده در تحلیل

شکل (۸): المان Q4

جدول (۱): ابعاد هندسی مدل‌ها (متر)

مدل	H	B	H_t (روپاره)	R_1	R_2	W
۱	۵۰	۴۰	۳۰	۴,۴۷۵	-	۸,۹۵۰
۲	۵۰	۴۰	۳۰	۴,۴۷۵	۱۲,۸۵۰	۸,۹۵۰
۳	۵۰	۴۰	۳۰	۴,۴۷۵	۸,۲۶۸	۸,۹۵۰
۴	۵۰	۴۰	۳۰	۴,۴۷۵	۴,۴۷۵	۸,۹۵۰
۵	۵۰	۴۰	۳۰	۴,۴۷۵	-	۸,۹۵۰

جدول (۲): خصوصیات ژئوتکنیکی زمین میزبان

K_q	η_q (hour)	σ_0 (kg/cm ²)	σ_c (kg/cm ²)
۰/۰۰۵	۵۰۰	۴۲/۵	۰/۰۵

نتیجه‌ی بدست آمده از این تحلیل‌ها محاسبه‌ی تنش‌ها و کرنش‌های زمین در اثر تورم است. کرنش‌های تورمی در طی زمان؛ در نقاط جداره و کف تونل محاسبه شده‌اند. کرنش کل برابر با مجموع کرنش‌های الاستیک و کرنش‌های تورمی در نظر گرفته شده است.

$$\{\varepsilon_1^{tot}(t)\} = \{\varepsilon_1^{el}(t)\} + \{\varepsilon_1^q(t)\} \quad (9)$$

که در آن $\varepsilon_1^{tot}(t)$ ، $\varepsilon_1^{el}(t)$ و $\varepsilon_1^q(t)$ به‌ترتیب مجموع کرنش‌های الاستیک و تورمی، کرنش الاستیک و کرنش تورمی هستند.

همان‌طور که در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) دیده می‌شود، کرنش تورمی در کف در همه‌ی مدل‌ها از تورم در جداره بیشتر است. همچنین با توجه به این شکل‌ها کرنش تورمی کف و جداره در مقطع شماره‌ی ۵ (مقطع D شکل) از همه بیشتر و در مقطع ۴

باشد و همچنین بهترین مقطع برای تونل‌زنی در زمین‌های تورمی مقطع دایره‌ای است.

۸- مراجع

- [۴] Wittke-Gattermann, P., (2003), "Dimensioning of Tunnels in Swelling Rock," ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy.
- [۵] Wittke-Gattermann, P., (2003), "Dimensioning of Tunnels in Swelling Rock," ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy.
- [۶] Wittke, w., (1990), "Rock Mechanics, Theory and Applications with Case Histories," Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [۷] Barla, M., (1999), "Tunnels in swelling ground – Simulation of 3D stress paths by triaxial laboratory testing," Ph. D. Thesis, Politecnico di Torino.
- [۲] Huder, J. and Amberg, G. (1970), "Quellung in Mergel, Opalinuston und anydrit", *chweizerische Bauzeitung*. Vol.88, No. 43, pp. 975-980.
- [۳] Madsen, F.T., (1999), "Suggested methods for laboratory testing of swelling rocks," International Journal of Rock and Mining Science, Vol. 26, No. 3, pp. 211-225.