ارزيابي كرنش‌هاي تورمي در تونل به روش تحليلي

احمد فهيمي‌فر[i] *؛ داوود پارساپور[ii]

چكيده

در اين مقاله كرنش‌هاي تورمي در زمين اطراف تونل براساس مدل رياضي تعميم يافته‌اند و به‌صورت تابعي از زمان و تنش در توده‌سنگ تعيين شده‌اند. با توجه به نمودارهاي توسعه‌ي كرنش‌هاي تورمي- زمان از روي نتايج آزمايشگاهي گذشته، مدل رياضي مناسبي براي اين كرنش‌ها در نظر گرفته شده است. اين كرنش‌ها باعث همگرايي و كاهش سطح مفيد تونل مي‌شوند. دراين روش تحليلي، كرنش‌هاي تورمي در زمان‌هاي معين، از شروع حفاري تا پس از نصب حائل، براي نقاط روي جداره‌ي تونل محاسبه شده و با كرنش‌هاي ناشي از بارگذاري جمع شده‌اند و سپس با نتايج آزمايشگاهي مقايسه شده‌اند كه نتايج قابل قبولي حاصل بدست آمده است.

با اين روش تحليل مي‌توان حداكثر تاخير ممكن در نصب حائل را با در نظرگرفتن زمان خود ايستايي زمين اطراف تونل به‌طوري در نظر گرفت كه حداكثر رهاسازي تنش در زمين و تا حد امكان، حداقل تنش‌ها در حائل ايجاد شود. از ديگر قابليت‌هاي اين روش تحليل، بررسي اثر شكل مقطع در ميزان كرنش‌هاي تورمي و نيز اثر حائل‌هاي انعطاف‌پذير در تنش‌هاي ايجاد شده در حائل تونل درسنگ‌هاي تورمي است.

كلمات كليدي

روش تحليلي، كرنش‌هاي تورمي، همگرايي تونل، حائل، زمان خودايستايي.

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.

تاريخ دريافت مقاله:۱۳۸۷/۱۱/۸

تاريخ اصلاحات مقاله:۱۳۸۸/۹/۹

[*i] نويسنده مسئول و استاد دانشكده‌ي عمران، دانشگاه صنعتي اميركبير؛ fahim@aut.ac.ir تلفن: ۰۲۱-٦٤٥٤٣۰۱۱

[ii] دانشجوي دكتري مهندسي ژئوتكنيك ، دانشگاه صنعتي اميركبير؛ parsa@aut.ac.ir

۱- مقدمه

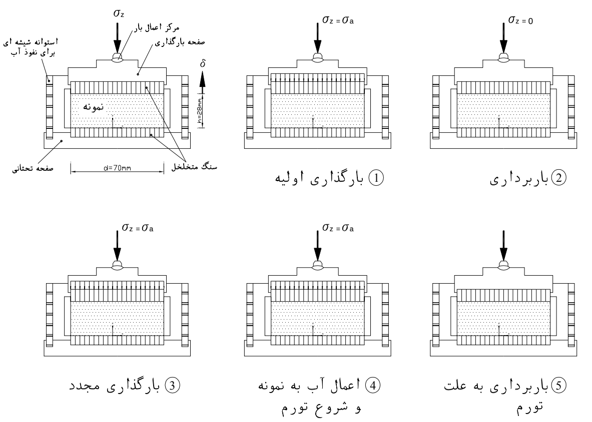
به‌طور عموم تورم سنگ نتيجه نوعي واکنش فيزيکي شيميايي در حضور آب است که به‌طور معمول با آزاد شدن تنش همراه است. تعريف ساده‌شده‌ي ISRM از اين پديده عبارت است از: "افزايش حجم وابسته به زمان زمين که در نهايت منجر به تغيير مکان داخلي در محيط تونل مي‌شود". درنتيجه‌ي اين فرآيند، توده‌سنگ با گذشت زمان افزايش حجم مي‌يابد. زمين‌هاي تورمي از مشکلات اساسي در تونل‌ها به هنگام تونل‌زني هستند. در اين حالت، زمين اطراف تونل در طي زمان فشارهاي فزاينده‌اي را به سيستم حائل وارد مي‌کند و تحليل، طراحي و پايدارسازي تونل در اين زمين‌ها با پيچيدگي همراه خواهد شد. شناخت کم از اين زمين‌ها و در نظر نگرفتن شرايط لازم براي سيستم حائل تونل که بتواند با شرايط اين زمين‌ها سازگار باشد، منجر به خرابي و شکست سيستم حائل تونل پس از اجرا مي‌شود. اين موضوع استفاده از تونل را با مشکل روبرو ساخته و علاوه بر از دست دادن زمان و صرف هزينه‌هاي چندباره، لازم است تونل دوباره تعريض شود تا امکان استفاده از آن فراهم گردد.

تورم، باعث حرکت سنگ به داخل تونل مي‌شود که اين حرکت در محيط تونل با گذشت زمان ايجاد مي‌شود. افزايش سرعت حرکت و بزرگي تغيير مکان‌ها اغلب در سطح تونل متغير بوده و وابسته به جنس زمين، وضعيت تنش‌هاي اصلي (موقعيت قرارگيري و زاويه آنها نسبت به افق) و شکل تونل است. نوع مشخصي از سنگ‌ها، به‌خصوص آن‌هايي که شامل مواد معدني رسي و آنيدريت هستند، درحالتي‌که درصد رطوبت آن‌ها تغيير مي‌کند، تغييرحجم مي‌دهند. مثال‌هايي ازچنين سنگ‌ها مي‌تواند شامل انواع شيل و سنگ‌هايي که ترکيبات آنيدريت و رس دارند، باشد. اگر جلوي اين تغييرشکل‌ها گرفته شود، ممکن است فشارهاي تورمي بالايي به‌وجود آيد. تنش‌هايي که در اثر جلوگيري از تغييرشکل تورمي در حائل ايجاد مي‌شوند را فشار تورمي گويند. اين فشار در اثر جلوگيري از تغييرشکل تورمي تا ۱۰ برابر ممکن است زياد شود.

۲- اثر تنش در تغييرشکل‌هاي تورمي

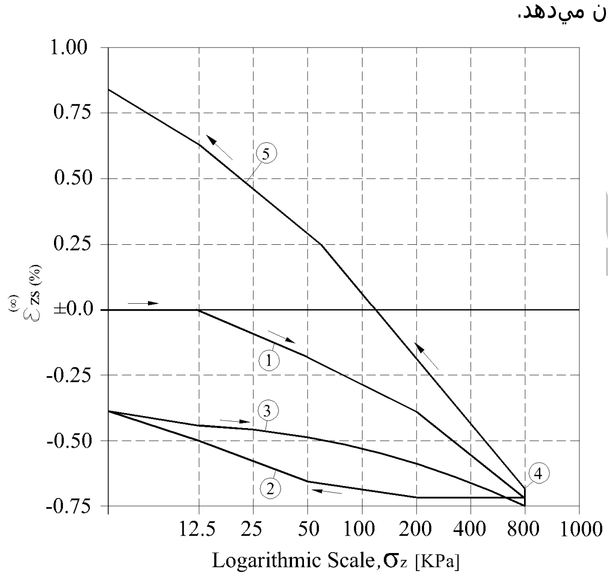
افزايش حجم در زمين‌هاي تورمي تابعي از وضعيت تنش حاکم در توده‌سنگ است. بنابراين در يک سطح تنش فشاري خاص، ديگر تورمي رخ نخواهد داد؛ که اين سطح تنش با توجه به خصوصيات ژئومکانيکي در هر زمين متفاوت خواهد بود[۱].

وابستگي تورم به تنش را هودر و امبرگ در آزمايش‌هايي بر روي سنگ‌هاي مارني و رسي اثبات نموده‌اند. مراحل انجام اين آزمايش در شکل (۱) نشان داده شده است [۲]، [۳].



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

نتايج آزمايش‌هاي هودر و امبرگ در شکل (۲) نشان داده شده است [۲]. اين شکل وابستگي کرنش‌هاي تورمي را به تنش نشان مي‌دهد.



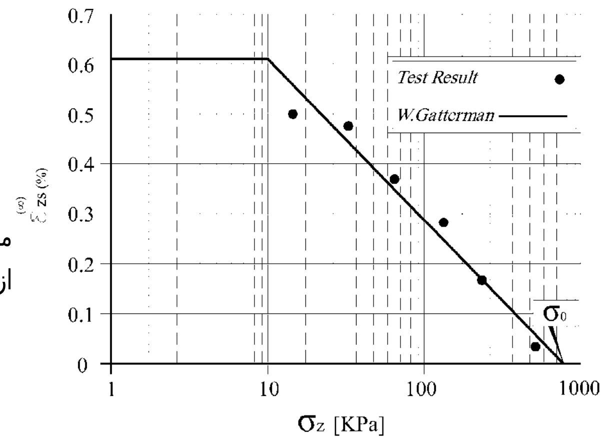
شکل (۲): نتايج آزمايش تورم توسط هودر و امبرگ [۲]

گروب نتايج آزمايش‌هاي تورمي هودر و امبرگ را به‌صورت يک رابطه‌ي رياضي بيان نمود که به‌صورت رابطه‌ي (۱) بيان شده است[۶]:

$$\varepsilon^{\infty}_{zs} = K_q \, . \, log(\sigma_z / \sigma_0) \qquad (۱)$$

که در آن $\varepsilon^{\infty}_{zs}$، K_q، σ_z و σ_0 به‌ترتيب کرنش تورمي، ضريب تغييرشکل تورمي (بدون بعد)، تنش قائم روي نمونه و تنش اعمالي به نمونه که به‌ازاي آن کرنش تورمي رخ نخواهد

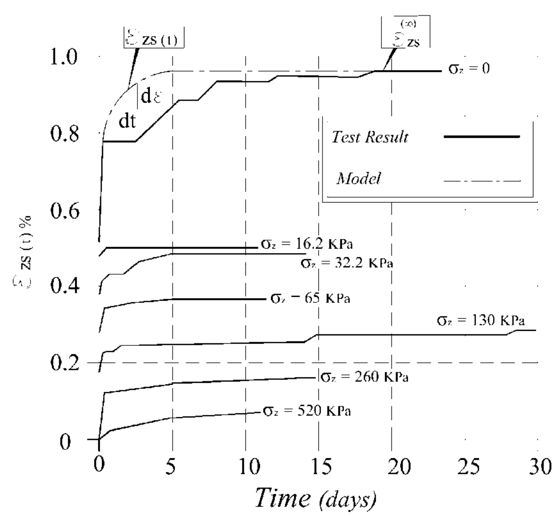
داد، هستند. شکل (۳) رابطه‌ي (۱) را در مقياس لگاريتمي نشان مي‌دهد [۴].



شکل (۳): مدل رياضي کرنش تورمي براساس تنش قائم در مقياس لگاريتمي [۵]، [۶]

۳- تعميم مدل رفتاري سنگ‌هاي تورمي بر اساس زمان و تنش

معادلات ساختاري که در بخش قبل بيان شده‌اند محدود به مقدار کرنش‌هاي تورمي در وضعيت نهايي و پايداري کرنش‌ها $(t=\infty)$ هستند که تعيين مقادير آن‌ها در طي زمان ممکن نيست. بدين منظور با توجه به نتايج آزمايش و روند پيشرفت کرنش‌هاي تورمي در طي زمان و همچنين با توجه به ثابت شدن مقدار اين کرنش‌ها پس از مدت زمان طولاني، مي‌توان از روابط تحليلي و رياضي و با استفاده از مقدار نهايي کرنش‌هاي تورمي رابطه‌ي رياضي کرنش تورمي را به‌صورتي‌که در ادامه آمده است بيان نمود. جزئيات کار در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): مدل رياضي کرنش‌هاي تورمي- زمان

$$\frac{d\varepsilon_{zs}(t)}{dt}=\frac{\varepsilon_{zs}(\infty)-\varepsilon_{zs}(t)}{\eta_q} \qquad (۲)$$

$$\frac{d\varepsilon_{zs}(t)}{dt}=\frac{\varphi(\sigma,\varepsilon_{zs})}{\eta_q}=\frac{\varepsilon_{zs}(\infty)-\varepsilon_{zs}(t)}{\eta_q} \quad ; \qquad (۳)$$

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

براي حل معادله‌ي فوق از روش حل معادله‌ي ديفرانسيل دو متغيره‌ي برنولي استفاده شده است که نتيجه‌ي آن عبارت است از:

$$\varepsilon_{zs}(t)=\int_0^t \dot{\varepsilon}_{zs}(\sigma_z(t),\varepsilon_{zs}(t))\,dt=\int_0^t \frac{\varphi(\sigma,\varepsilon_{zs})}{\eta_q}\,dt \qquad (۴)$$

$$\varepsilon_{zs}(t)=\varepsilon_{zs}(\infty)+a.\,e^{(-t/\eta_q)} \qquad (۵)$$

شرايط مرزي به‌صورت رابطه‌ي (۶) خواهد بود:

$$\begin{cases} t=0 \\ \varepsilon_{zs}(t)=0 \end{cases} \qquad (۶)$$

با اعمال شرايط مرزي فوق، عامل a محاسبه مي‌شود:

$$a=-\varepsilon_{zs}(\infty) \qquad (۷)$$

بنابراين رابطه‌ي نهايي کرنش‌هاي تورمي براساس زمان و تنش به‌صورت رابطه‌ي (۸) بيان خواهد شد:

$$\varepsilon_{zs}(t)=\left(1-e^{(-t/\eta_q)}\right).K_q\,.\,log(\sigma_z/\sigma_0) \qquad (۸)$$

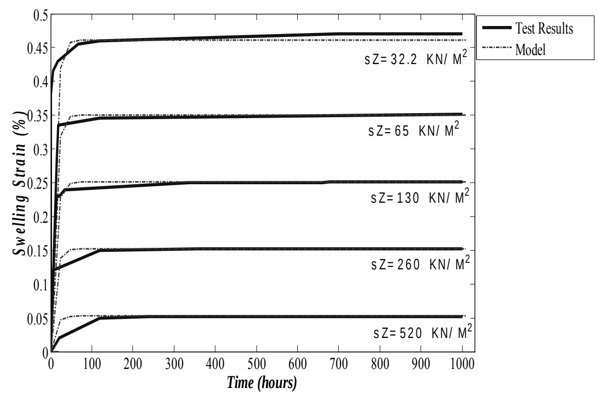
که در آن $\varepsilon_{zs}(t)$، t، K_q، σ_z، σ_0 و η_q به‌ترتيب کرنش تورمي در جهت اصلي، زمان، ضريب تغييرشکل تورمي (بدون بعد)، تنش قائم روي نمونه، تنش اعمالي به نمونه که به‌ازاي آن کرنش تورمي رخ نخواهد داد و مدول زماني تورم بر حسب واحد زمان است.

با به‌دست آوردن عامل‌هاي K_q، η_q و σ_0 مي‌توان مقاديرکرنش‌هاي تورمي را در هر سطح تنش و در هر بازه‌ي زماني دلخواه محاسبه نمود. ميزان تنش در توده‌سنگ را مي‌توان از تحليل محيط اطراف تونل با روش‌هاي عددي موجود مانند روش اجزاي محدود يا روش‌هاي حل بسته محاسبه نمود و ضريب تغيير شکل تورمي و پتانسيل تورم از طريق روش‌هاي آزمايشگاهي تعيين مي‌شوند. در اين‌جا براي تحليل تورم برنامه‌ي کامپيوتري در محيط مطلب تهيه شده است که نتايج آن در بخش‌هاي بعدي ارائه خواهد شد.

٤- بررسي نتايج بدست آمده از مدل تحليلي

آزمايش‌هاي هودر و امبرگ که بر روي سنگ‌هاي تورمي انجام شد، کرنش‌هاي تورمي را به‌صورت تابعي از زمان و

تنش نشان مي‌دهند كه در اين مقاله از اين آزمايش‌ها به‌عنوان مطالعه‌ي موردي استفاده شده است. براي اين مقايسه بايد ابتدا مقدار h_q براي نمونه‌ي مورد آزمايش محاسبه شود. براي اين‌كار از ۲ سري آزمايش براي تعيين h_q استفاده شده و سپس با تعيين اين مقدار، مدل تحليلي با ساير آزمايش‌ها مقايسه خواهد شد. با روش سعي و خطا مقدار h_q براي نمونه‌ي مورد آزمايش برابر با ۱۰ ساعت بدست آمد. با استفاده از اين مقدار و رابطه‌ي (۸)، مقادير كرنش‌هاي تورمي در سطوح تنش متفاوت محاسبه و با نتايج آزمايشگاهي مقايسه شده‌اند. اين مقايسه در شكل (۵) آورده شده است.

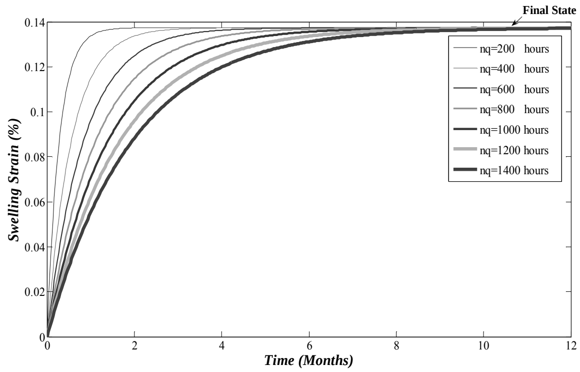


شكل (۵): مقايسه‌ي مدل تحليلي با نتايج آزمايشگاهي

همان‌طور كه ديده مي‌شود نتايج قابل قبولي بدست آمده است و به‌طور ميانگين خطا كمتر از ۳% است. قابل توجه است كه در سطوح تنش پايين، خطاي مدل رفته رفته زياد و تا حدود ۵ درصد هم مي‌رسد كه علت آن اثر كم تنش‌هاي كوچک در ميزان كرنش‌هاي تورمي است.

۵- اثر hq در ميزان كرنش‌هاي تورمي

hq كه همان مدول زماني كرنش‌هاي تورمي است، در واقع نشان‌دهنده‌ي نرخ پتانسيل تورمي توده‌سنگ است. اگر 1/hq زياد باشد، توده‌سنگ در مدت زمان كمتري به كرنش حداكثر خواهد رسيد و سرعت رشد كرنش بيشتر خواهد بود و اگر 1/hq كم باشد، توده‌سنگ در مدت زمان طولاني‌تري به كرنش‌هاي حداكثر خواهد رسيد. به‌طور كلي مي‌توان گفت كه در زمين‌هاي با 1/hq بالا زمان خود ايستايي تونل پايين بوده و نياز به نصب سريع حائل موقت (يا دائم) خواهد بود. در شكل (۶) اثر hq در ميزان كرنش‌هاي تورمي نشان داده شده است.

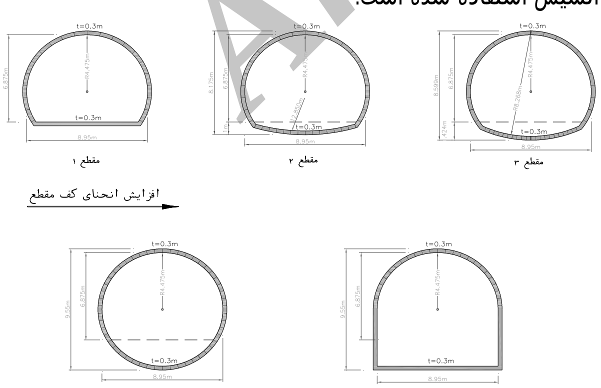


شكل (٦): اثر h_q در ميزان كرنش‌هاي تورمي

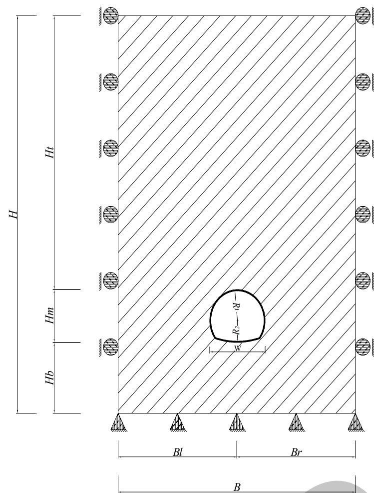
اغلب h_q به ميزان رطوبت زمين (درجه‌ي اشباع)، جنس كاني‌هاي سنگ، توزيع درزه‌ها و نفوذپذيري توده بستگي دارد. درجه‌ي اشباع بالا، نفوذپذيري بالا و كاني سنگ‌ها با پتانسيل تورمي بالا مانند شيل‌ها باعث كاهش h_q و نيز كاهش زمان لازم براي رسيدن به حداكثر كرنش تورمي مي‌شود [۵].

٦- اثر شكل مقطع تونل در ميزان تغييرشكل‌هاي تورمي

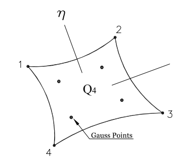
براي بررسي اثر شكل مقطع در تغيير شكل‌هاي تورمي، پنج تونل با مقاطع مختلف و رايج در نظر گرفته شده است. اين مقاطع در شكل (۷) آورده شده‌اند. همه‌ي مشخصات مدل‌ها ازجمله ضخامت روباره يكسان است و تنها تفاوت آن‌ها در هندسه‌ي مقطع تونل است. براي تحليل تنش‌ها از روش عددي المان‌هاي محدود با استفاده از المان‌هاي ايزوپارامتريك *Q4* با فرض شرايط كرنش مسطح استفاده شده است. براي انجام تحليل عددي و هم‌چنين حل روابط تغييرشكل‌هاي تورمي از قابليت كدنويسي نرم‌افزار مطلب استفاده شده است. گفتني است كه براي مش‌بندي و هم‌چنين شماره‌گذاري المان‌ها و گره‌ها در همه‌ي مدل‌ها از قابليت مش‌بندي خودكار نرم‌افزار انسيس استفاده شده است.



شكل (۷): مقاطع انتخابي تونل براي بررسي اثر شكل مقطع بر ميزان تورم



شکل (۹): هندسه‌ي مدل مورد استفاده در تحليل



شکل(۸): المان Q4

جدول (۱): ابعاد هندسي مدل‌ها (متر)

مدل	H	B	H_t (روباره)	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): خصوصيات ژئوتکنيکي زمين ميزبان

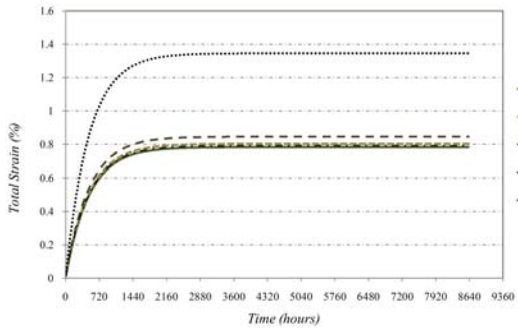
K_q	η_q (hour)	σ_0 (kg/cm²)	σ_c (kg/cm²)
۰/۰۰۵	۵۰۰	۴۲/۵	۰/۰۵

نتيجه‌ي بدست آمده از اين تحليل‌ها محاسبه‌ي تنش‌ها و کرنش‌هاي زمين در اثر تورم است. کرنش‌هاي تورمي در طي زمان؛ در نقاط جداره و کف تونل محاسبه شده‌اند. کرنش کل برابر با مجموع کرنش‌هاي الاستيك و کرنش‌هاي تورمي در نظر گرفته شده است.

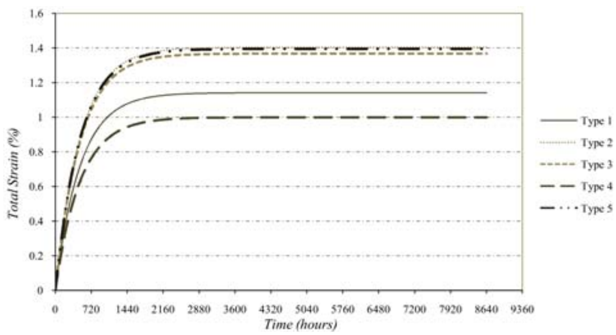
$$\{\varepsilon_I^{tot}(t)\} = \{\varepsilon_I^{el}(t)\} + \{\varepsilon_I^{q}(t)\} \quad (۹)$$

که در آن $\varepsilon_1^{tot}(t)$، $\varepsilon_1^{el}(t)$ و $\varepsilon_1^{q}(t)$ به‌ترتيب مجموع کرنش‌هاي الاستيك و تورمي، کرنش الاستيك و کرنش تورمي هستند.

همان‌طور که در شکل‌هاي (۱۰) و (۱۱) ديده مي‌شود، کرنش تورمي در کف در همه‌ي مدل‌ها از تورم در جداره بيشتر است. هم‌چنين با توجه به اين شکل‌ها کرنش تورمي کف و جداره در مقطع شماره‌ي ۵ (مقطع D شکل) از همه بيشتر و در مقطع ۴ (مقطع دايره‌اي کامل) از همه کمتر است. به‌طور تقريبي حداکثر کرنش تورمي ۴ ماه پس از حفاري مقطع رخ مي‌دهد.



شکل (۱۰): نمودار کرنش افقي کل در برابر زمان در ديواره‌ي تونل



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

۷- نتيجه‌گيري

با توسعه‌ي مدل گروب و در نظر گرفتن اثر ميزان تنش در آن مي‌توان رفتار سنگ‌هاي تورمي را کامل‌تر پيش‌بيني نمود. از طرفي همگرايي تونل در زمين‌هاي تورمي همواره از مسائل اساسي و مبهم بوده است. بنابراين با مدل ارائه شده در اين مقاله مي‌توان اين تغييرشکل‌ها را محاسبه و راه‌حل‌هاي مناسب براي مقابله با آن را انتخاب نمود. ميزان تورم در يك زمان ثابت به ميزان تنش و پتانسيل تورمي زمين ميزبان بستگي دارد که تنش در توده‌سنگ را مي‌توان از تحليل‌هاي عددي تونل و پتانسيل تورم را از آزمايش‌هاي تورمي بر روي سنگ ميزبان به‌دست آورد. با توجه به‌اينکه کرنش‌هاي تورمي با گذشت زمان افزايش مي‌يابند بنابراين در زمين‌هاي با پتانسيل تورمي بالا (K_q) و مدول تورمي (h_q) کم، استفاده از حائل‌هاي موقت مانند شاتکريت و هم‌چنين حائل‌هاي چندتکه مي‌تواند باعث کاهش تنش‌هاي تورمي شود. هم‌چنين تاخير در نصب حائل نهايي (در صورت امکان) مي‌تواند منجر به رهاسازي تنش و کم شدن نيروهاي ايجاد شده در حائل شود. با توجه به نتايج تحليل تونل‌ها با مقاطع مختلف مي‌توان گفت که استفاده از قوس‌ها با انحناي بيشتر در کف تونل مي‌تواند نقش بسزايي در کاهش کرنش‌هاي تورمي و تنش‌هاي ايجاد شده در حائل داشته

باشد و هم‌چنين بهترين مقطع براي تونل‌زني در زمين‌هاي تورمي مقطع دايره‌اي است.

۸- مراجع

[۱] 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.

[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.