

مدلسازی عددی بررسی رفتار وابسته به زمان تونل انتقال آب بالیک با نرم افزار FLAC^{2D}

علی قربانی^۱، محمدسعید امینی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن؛ گرایش تونل و فضاهاى زیرزمینی؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن،

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن؛ گرایش مکانیک سنگ؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن،

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (نویسنده مسئول)

چکیده

تونل‌ها و فضاهاى زیرزمینی برای مقاصد گوناگونی ساخته می‌شوند. از جمله کاربردهای سازه‌های زیرزمینی می‌توان به تونل‌های حمل‌ونقل و دسترسی، تونل‌های آب‌بر، مغارها، فضاهاى زیرزمینی (ایستگاه‌های مترو، نیروگاه‌ها، انبارهای زیرزمینی و کارگاه‌های استخراج مواد معدنی) اشاره کرد. تونل‌های انتقال آب از جمله حفاریاتی هستند که جهت انتقال آب رودخانه، سد و یا حوضچه‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مسائل مهم در حفر تونل‌ها رفتارهای تونل از قبیل پایداری تونل با توجه به زمان است. حفر چنین فضاهاى در زمین باعث از بین رفتن تعادل اولیه در تنش و پیرامون تونل می‌شود به همین دلیل رفتارهای وابسته به زمان که زمین در مقابل حفاریه زیرزمینی نشان می‌دهد باید مورد بررسی قرار گیرد. همگرایی که در دیواره تونل به وجود می‌آید می‌تواند ناشی از دو پارامتر باشد. اولین پارامتر همگرایی ناشی از پیشروی سینه‌کار است و دومین پارامتر، همگرایی در اثر رفتار وابسته به زمان توده‌سنگ هست. برای مدلسازی رفتار تونل در نتیجه پیشروی سینه‌کار می‌توان یک مدل الاستوپلاستیک مانند مدل موهر-کلمب را در نظر گرفت، و همگرایی تونل ناشی از رفتار وابسته به زمان را به کمک مدل ویسکوپلاستیک مدلسازی کرد. در این تحقیق با استفاده از مدلسازی عددی با نرم‌افزار FLAC^{2D} جهت بررسی رفتار وابسته به زمان تونل انتقال آب بالیک پرداخته شده است. با توجه به تحلیل‌های انجام شده کنتورهای جابجایی افقی و قائم برای مقطع تونل انتقال آب بالیک پس از گذشت ۹۶ روز نشان داده شده است. مقدار حداکثر جابجایی وابسته به زمان افقی و قائم تونل (همگرایی) پس از ۹۶ روز در اثر پدیده مچاله شوندگی به ترتیب برابر ۲۹ میلی‌متر و ۱۵/۶ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نتایج تحلیل‌ها. مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی در حین و پس از حفر تونل نشان داد که این مدلسازی قادر است تغییر شکل‌های وابسته به زمان توده‌سنگ را با دقت مقبولى شبیه‌سازی کند.

واژه‌های کلیدی: تونل انتقال آب، همگرایی و همجواری، رفتار وابسته به زمان تونل‌ها، D₂FLAC، مدل ویسکوپلاستیک

۱. مقدمه

انجام پروژه‌های تونل‌سازی برای اهداف مختلف در نواحی پر جمعیت شهری و یا به منظور انتقال آب در طول دهه گذشته به سرعت رو به رشد بوده است. با افزایش جمعیت، بالا رفتن سطح زندگی و پیشرفت در صنایع مختلف، نیاز به منابع آبی را افزایش داده و وضعیت نامطلوبی از نظر کمیت و کیفیت آب در بسیاری از نقاط جهان بوجود آمده است. با توجه به نیاز آب در یک منطقه و عدم دسترسی آب در آن منطقه و کمبود آب با استفاده از ایجاد تونل‌های انتقال آب از یک منطقه به منطقه دیگر می‌توان آب آن منطقه را تأمین کرد. تونل‌های انتقال آب نقشی حیاتی در پیشبرد زندگی شهری دارند. بررسی تونل‌های انتقال آب از اهمیت بالایی برخوردار هستند. حفر تونل باعث از بین رفتن حالت اولیه تنش‌ها در زمین و جابه‌جایی توده‌سنگ پیرامون تونل می‌گردد. بدین ترتیب با حفر مقطع جدیدی از تونل و با گذشت زمان، جابجایی دیواره‌ها و فشار وارده از طرف زمین بر سیستم نگهداری تونل افزایش می‌یابد. این تغییر شکل در نتیجه پیشروی سینه کار تونل و رفتار وابسته به زمان (رفتار خزشی) توده سنگ اطراف تونل به وجود می‌آید. در سال ۱۳۹۱ اسدالله پور و همکارانش به پیش‌بینی همگرایی دیواره تونل در توده سنگ‌هایی با رفتار وابسته به زمان در تونل انتقال آب بالیک پرداختند که در نهایت پیش‌بینی همگرایی دیواره تونل در ایستگاه ۹۱۱+۰ نشان می‌دهد که به علت همگرایی زیاد، دیواره تونل با سیستم نگهداری نصب شده در آن پایدار نخواهد بود، و برای پایداری تونل باید با نصب کف بند، سیستم نگهداری در آن تقویت گردد [۱]. احمدی و همکاران در سال ۱۳۹۱ به تحلیل پایداری تونل انتقال آب امیرکبیر در حالت کرنش نرم شونده پرداختند که در حالت کرنش نرم شونده نمی‌توان از گزاره‌های فرم بسته برای محاسبه همگرایی استفاده نمود. نتایج نشان می‌دهد که نگهداری در این پروژه می‌تواند از ضخامت سگمنت‌های بتنی تا حدود ۵۱ درصد بکاهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد کاهش بار مالی پروژه به میزان ۸۱ درصد خواهد رسید [۲]. همچنین رحیم‌دل و همکاران در سال ۱۳۹۱ به بررسی شدت مجاله شونده و انفجار سنگ در هر بخش از تونل انتقال آب گلاب با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ پرداختند که در نتیجه تحلیل به انتخاب یک سیستم نگهداری برای هر بخش از تونل دست یافتند [۳]. شریفی و همکاران در سال ۱۳۹۷ به ارزیابی پایداری تونل انتقال آب ارومیه با مدل‌سازی عددی سه بعدی با استفاده از روش‌های اجزاء و تفاضل محدود $FLAC^{2D}$ پرداختند که با توجه به نتایج به‌دست‌آمده پایداری قسمت آبرفت با استفاده از روش‌های حفاری NATM و ترکیب با روش‌های بهسازی، تأمین نمی‌شود [۴]. مهدوری و همکاران در سال ۱۳۹۰ به بررسی تراست لازم حفاری در تونل انتقال آب بهشت‌آباد پرداختند که نتایج این تحقیق نشان داد که با مقایسه روش عددی و روش ارائه‌شده به‌وسیله هامونی مشخص شد که تراست تعیین شده با روش هامونی بیشتر از مقادیر حاصل شده با روش عددی است [۵].

۲. تونل انتقال آب بالیک

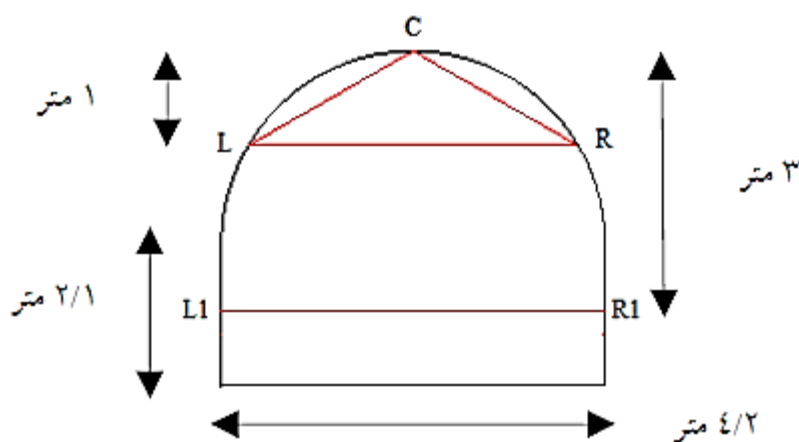
با توجه به لزوم انتقال آب به مخزن اصلی سد البرز مورد نظر، برای منظور تأمین و رسیدگی بخشی از آب مورد نیاز به مخزن سد البرز، سدی انحرافی بر روی رودخانه بالیک در ۷۰۰ متری بالادست روستای تمر در نظر گرفته شده است (شکل ۱). این

سد انحرافی توسط یک تونل، آب رودخانه بالیک را به رودخانه بابل در بالادست سد اصلی البرز منتقل خواهد کرد. تونل با مقطع مدور ۴/۲ متر و راستای شمال غربی- جنوب شرقی و به طول ۲۶۰۰ متر می‌باشد. آزمون تونل انتقال آب ۳۱۰ درجه از محل سد انحرافی بالیک تا بالادست شاخه باختری مخزن سد البرز پیش‌بینی شده است. حفاری در تونل انتقال آب بالیک

توسط دستگاه رودهدر بازویی انجام می‌گیرد [۱]. سیستم نگهداری تونل انتقال آب بابلک شامل ۲۵ سانتی‌متر شاتریت، شبکه فولادی، قاب مشبک فولادی با فاصله یک متر و پیچ سنگ تزریقی می‌باشد. اندازه‌گیری همگرایی در تونل به کمک نصب پنج عدد پین همگرایی یکی در سقف و چهارتا در دیواره تونل انجام می‌شود شکل (۲) [۶].



شکل ۱- موقعیت ساختگاه سد البرز و رودخانه بابلک و روستای تمر



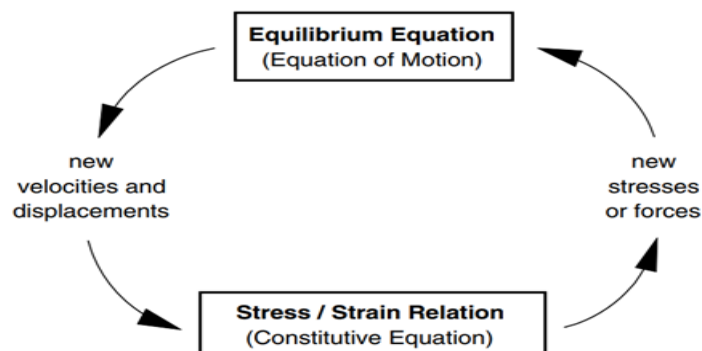
شکل ۲- مقاطع اندازه‌گیری همگرایی در تونل انتقال آب بابلک [۶].

به لحاظ ساختاری مسیر تونل از یال‌های شمالی و جنوبی یک ناودیس عبور می‌کند شیب متوسط این لایه‌ها در یال‌های ناودیس با توجه به اطلاعات به دست آمده از گمانه‌ها به‌طور متوسط ۳۵ درجه است [۱]. نهشته‌های مسیر تونل شامل ماسه‌سنگ، ماسه‌سنگ مارنی، مارن ماسه‌ای، مارن و کنگلومرا به رنگ‌های خاکستری و قرمز مربوط به دوره میوسن می‌باشند که میان لایه‌های کنگلومرای در آن دیده می‌شوند [۶]. نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی نشان می‌دهد که این مسیر از ناودیزی که نهشته‌های ماسه‌سنگی، مارنی، کنگلومرای و گاهی میان لایه‌هایی از میکروکنگلومرا تشکیل شده است، عبور می‌کند. محور این ناودیس با راستای تقریباً شرقی- غربی در نزدیکی متر ۷۵۰ متری از دهانه ورودی زاویه‌ای حدوداً ۵۰

درجه با امتداد تونل می‌سازد [۶]. تونل انتقال آب به‌جز در قسمت‌های ورودی و خروجی هر یک به طول حدود ۱۰۰ و ۱۲۰ متر که کمترین ضخامت روباره و ناکافی برای اجرای تونل را دارند در بقیه قسمت‌ها از زیر روباره با ضخامت‌های مختلف عبور خواهد کرد [۱]. بیشترین روباره در مترائ ۱۷۵۰ + متر نسبت به دهانه ورودی تونل، ضخامتی حدود ۱۸۵ متر و کمترین روباره در مترائ ۶۰ + حدود ۸ متر ضخامت دارد [۶].

۳. نرم‌افزار شبیه‌سازی

بر اساس روش‌های عددی تبدیل یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی به محیطی با تعداد درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط می‌باشد. با بررسی اثر نیرو و بارگذاری در این نقاط و تعیین میزان تغییر شکل آن‌ها، با استفاده از میانمایی می‌توان تغییر شکل‌های سایر نقاط را نیز به دست آورد. موقعیت، تعداد و ارتباط نقاط فوق و ارتباط نقاط فوق‌الذکر توسط المان بندی محیط مشخص می‌شود. هر المان نشان دهنده جز کوچکی از محیط است که دارای مشخصات هندسی و مواد مختص به خود می‌باشد. بعد از تقسیم محیط به المان‌های نسبتاً کوچک، معادلات مشخصه المان‌های به‌طور هم‌زمان حل می‌شود. روش‌های عددی خود به روش‌های مختلفی از جمله تفاضل محدود، اجزای محدود، المان‌های مجزا، اجزای مرزی و غیره تقسیم می‌شود. با پیشرفت کامپیوترها برای هر یک از این روش‌ها برنامه‌نویسی صورت گرفته است. در رابطه با مسائل ژئوتکنیکی برنامه‌های بسیاری وجود دارد که در این راستا در این تحقیق از نرم‌افزار FLAC2D که بر مبنای روش تفاضل محدود هست استفاده شده است. در شکل ۳ مراحل حل یک مسئله به روش تفاضل محدود نشان داده شده است [۷].



شکل ۳- مراحل حل یک مسئله به روش تفاضل محدود [۷]

۴. تحلیل وابسته به زمان در نرم‌افزار FLAC^{2D}

در نرم‌افزار FLAC^{2D} برای تحلیل‌های وابسته به زمان، شش مدل رفتاری تعریف شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل قانون توان، مدل‌های کلاسیک ماکسول، مدل برگر در حالت ویسکوپلاستیک و مدل WIPP نام برد [۷]. در ادامه با توجه به اینکه در این تحقیق از مدل ویسکوپلاستیک برگر استفاده خواهد شد، این مدل ترکیب یافته از دو مدل کلونین و ماکسول می‌باشد که در آن تنش و کرنش میانگین از رابطه زیر بدست می‌آید [۸].

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{kk}}{r} \quad (1)$$

$$e_{vol} = \varepsilon_{kk} \quad (3)$$

در این رابطه σ و e_{vol} به ترتیب تنش و کرنش میانگین‌اند. همچنین تنش و کرنش‌های انحرافی (S_{ij} و e_{ij}) را نیز می‌توان با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \cdot \delta_{ij} \quad (۳)$$

$$e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{e_{vol}}{3} \delta_{ij} \quad (۴)$$

کرنش کل به فرم تفاضلات محدود را می‌توان به صورت زیر نوشت:

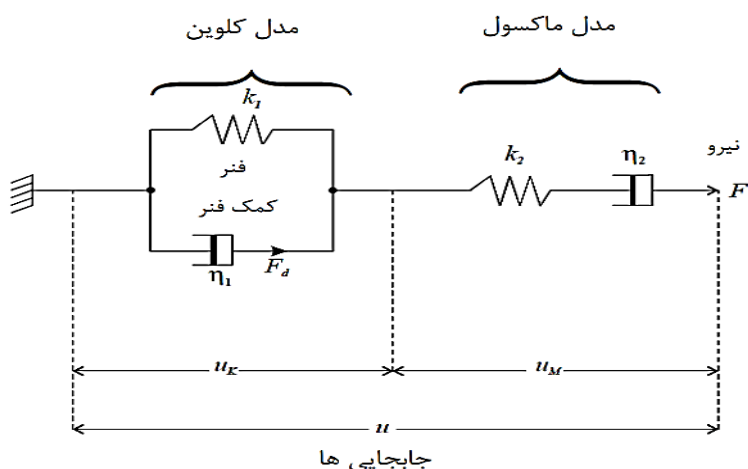
$$\Delta e_{ij} = \Delta e_{ij}^k + \Delta e_{ij}^M + \Delta e_{ij}^p \quad (۵)$$

که در آن اندیس‌های K ، M و p به ترتیب بیانگر مدل‌های کلوین، ماکسول و پلاستیک است. برای مدل رابطه تنش-کرنش در هر گام زمانی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\overline{S}_{ij} \cdot \Delta t = \gamma \eta^k \Delta e_{ij}^k + \gamma G^k \overline{e}_{ij}^k \cdot \Delta t \quad (۶)$$

$$\Delta e_{ij}^M = \frac{\Delta S_{ij}}{\gamma G^M} + \frac{\overline{S}_{ij}}{\gamma \eta^M} \cdot \Delta t \quad (۷)$$

در شکل ۴ مقادیر روابط فوق نشان داده شده:



شکل ۴- نمایش شماتیک مدل برگر به همراه تعریف پارامترهای آن در نرم‌افزار FLAC [۸]

$$\overline{S_{ij}} = \frac{\overline{S_{ij}^N} + S_{ij}}{2} \quad (8)$$

$$\overline{e_{ij}} = \frac{\overline{e_{ij}^N} + e_{ij}}{2} \quad (9)$$

که مقدار میانگین دو کمیت در دو گام متوالی در نظر گرفته می‌شود.

۵. مدل‌سازی عددی جهت بررسی رفتار وابسته به زمان تونل در نرم‌افزار $FLAC^{2D}$

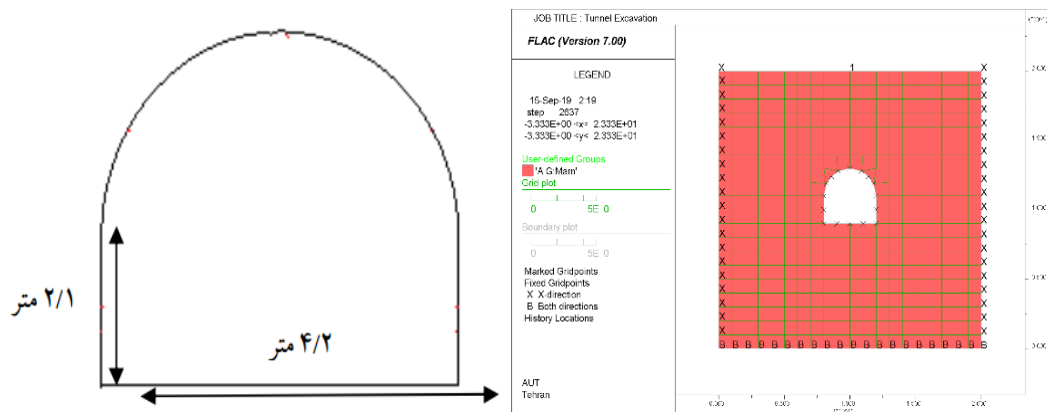
کل همگرایی که در دیواره تونل به وجود می‌آید ناشی از دو پارامتر هست. مقداری از همگرایی در اثر پیشروی سینه‌کار به وجود می‌آید؛ و مقداری دیگر در اثر رفتار وابسته به زمان توده‌سنگ ایجاد می‌شود. همان‌طور که در فصل قبل بیان شد برای مدلسازی رفتار تونل در نتیجه پیشروی سینه‌کار می‌توان یک مدل الاستوپلاستیک مانند مدل موهر-کلمب را در نظر گرفت؛ و همگرایی تونل ناشی از رفتار وابسته به زمان را به کمک مدل ویسکوپلاستیک مدلسازی کرد.

۶. مدل‌سازی تونل

مراحل مدل‌سازی پروژه به شرح ذیل می‌باشد.

۶-۱. هندسه مدل

برای مدل‌سازی ابتدا باید هندسه مدل را مشخص کنیم، معمولاً ابعاد مدل باید حداکثر ۱۰ برابر شعاع تونل باشد تا مرز شبکه بر نتایج مدل تأثیرگذار نباشد. شعاع قسمت دایره‌ای تونل بابلک ۲/۱ متر می‌باشد، بنابراین ابعاد مدل ۴۲×۴۲ متر انتخاب شده است. هندسه مدل در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- ابعاد مقطع تونل انتقال آب بابلک

۶-۲. تخصیص مواد به مدل

برای مدل کردن تونل، مشخصات تونل در ایستگاه در مقطع مورد نظر را برای مدل در نظر می‌گیریم. ضخامت روباره در این مقطع ۸۵ متر و تا متر ۶۵۰+۰ در طول محور تونل حدوداً به ۹۱ متر افزایش پیدا می‌کند. تونل در این متر ۹۱ در توده‌سنگ مارنی قرار دارد. پارامترهای ورودی مدل در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات تنش اطراف تونل

H (m)	ρ (Kg/m ³)	k	σ_v (MPa)	σ_h (MPa)
۸۸	۲۲۰۰	۱/۵	۱/۹۳	۲/۹۰

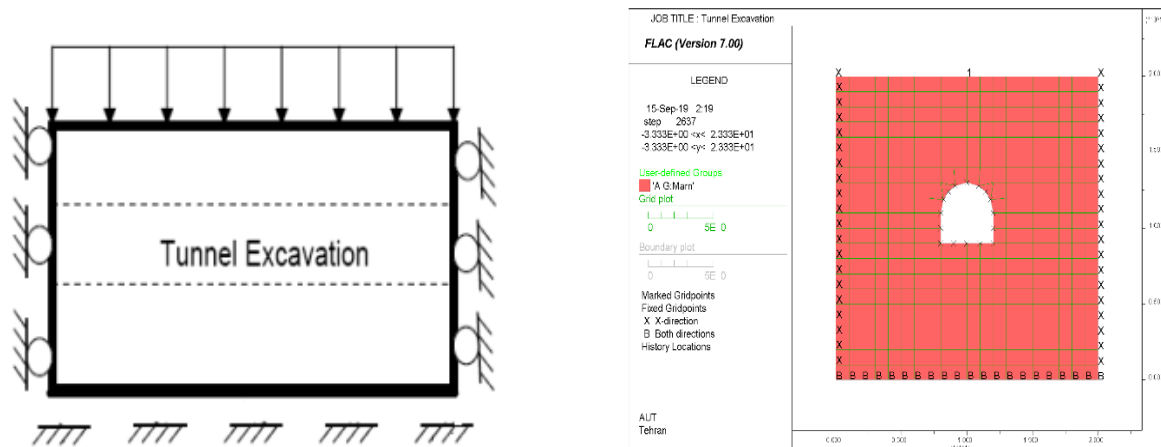
جدول ۲- خواص مقاومتی توده‌سنگ اطراف تونل

K (Gpa)	G (Gpa)	C (MPa)	ϕ°	E (Gpa)	σ_t (MPa)
۱/۴۲	۰/۶۵۴	۰/۱	۲۸	۱/۷	۰

جهت اطمینان مقاومت کششی توده‌سنگ صفر فرض شده است.

۶-۳. اعمال شرایط مرزی و اولیه

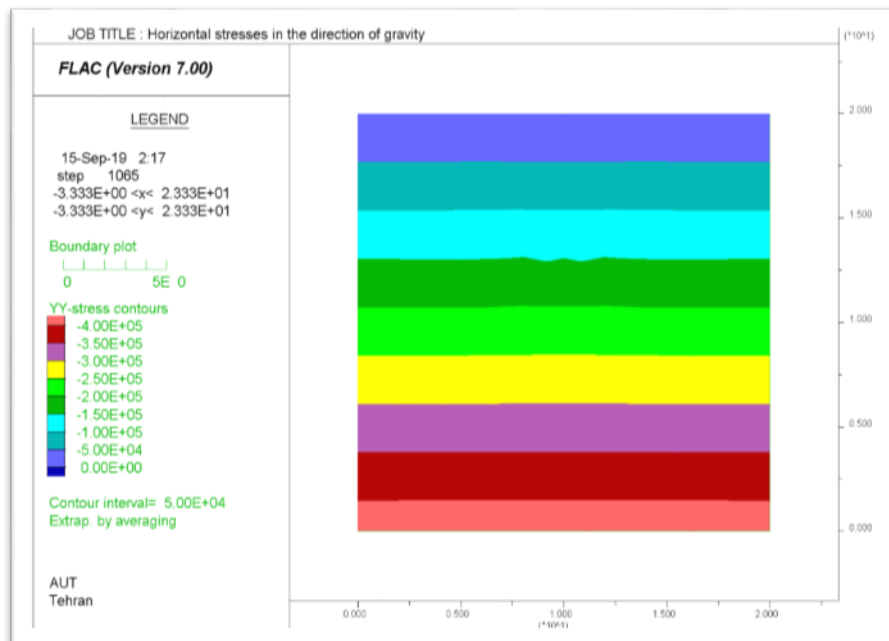
در نرم‌افزار FLAC^{2D} شرایط در مرزهای مصنوعی را می‌توان به دو صورت تنش یا جابجایی اعمال کرد. در مدل‌سازی تونل بابلک شرایط در مرزهای مصنوعی به صورت زیر اعمال شده است. در کف مدل مرز به صورت ثابت و در مرزهای جانبی Y و یک سمت مرز، X مرز به صورت غلظتی اعمال شده است (مرزهای جابجایی). در مرز فوقانی و در یک طرف مرز X شرایط مرزی به صورت تنش می‌باشد. شرایط مرزی اعمالی به مدل در شکل ۶ نشان داده شده است.



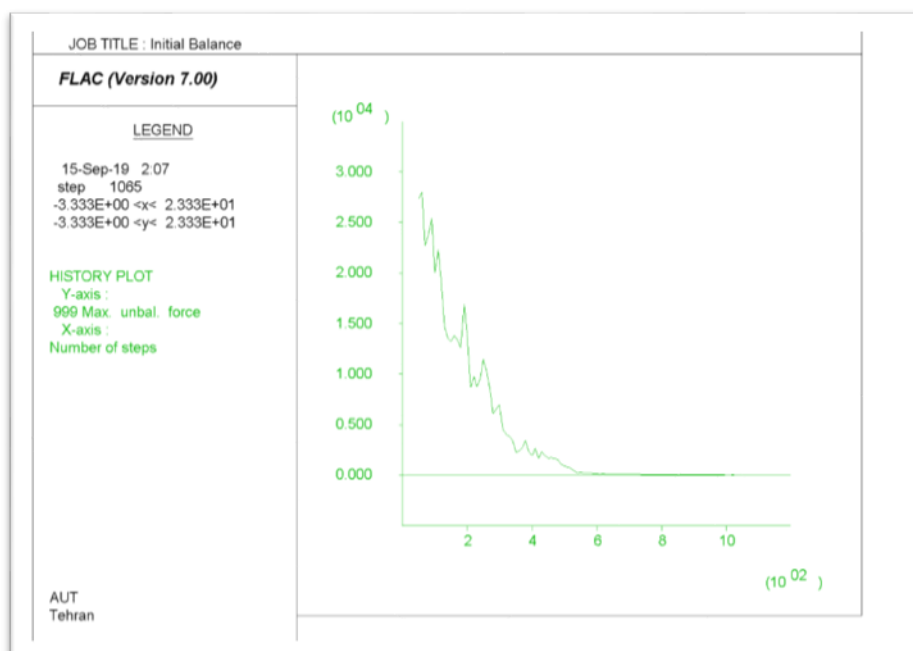
شکل ۶- شرایط مرزی برای مدل تونل بابلک

۴-۶. تعادل اولیه

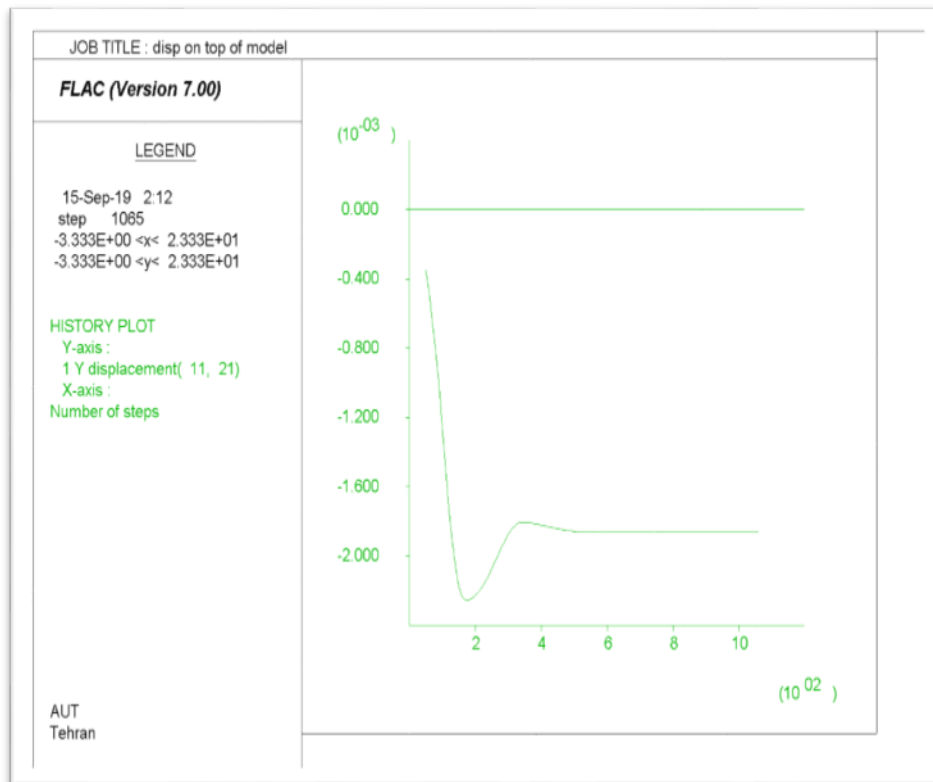
مدل ساخته شده پس از اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی، باید در تعادل اولیه قرار داشته باشند. برای مدل‌هایی با هندسه ساده شرایط اولیه و شرایط مرزی ممکن است به گونه‌ای اعمال شود که مدل دقیقاً در تعادل اولیه باشد اما در بسیاری از موارد، به ویژه مسائلی با هندسه پیچیده لازم است، تحت شرایط مرزی و اولیه داده شده، مدل به تعادل اولیه رسانده شود. مدلی که زمانی به تعادل اولیه می‌رسد که حداکثر نیروی نامتعادل کننده به 0.01% مقدار اولیه‌اش برسد. جابجایی در هر گره و در هر راستایی به مقداری ثابت همگرا شود. در صورتی که تنش‌های برجا نیز وجود داشته باشد، یکنواخت شدن کنتور تنش برجا نشان از حل صحیح مسئله خواهد بود. که این مسئله در شکل ۷ نشان داده شده است. نیروی نامتعادل کننده در مدل و جابجایی قائم رخ داده در بالای مرز فرضی مدل به ترتیب در اشکال ۸ و ۹ نشان داده شده است.



شکل ۷- کنتورهای تنش اولیه قائم S_{yy} ایجاد شده در مدل به همراه گرادیان آن در جهت قائم



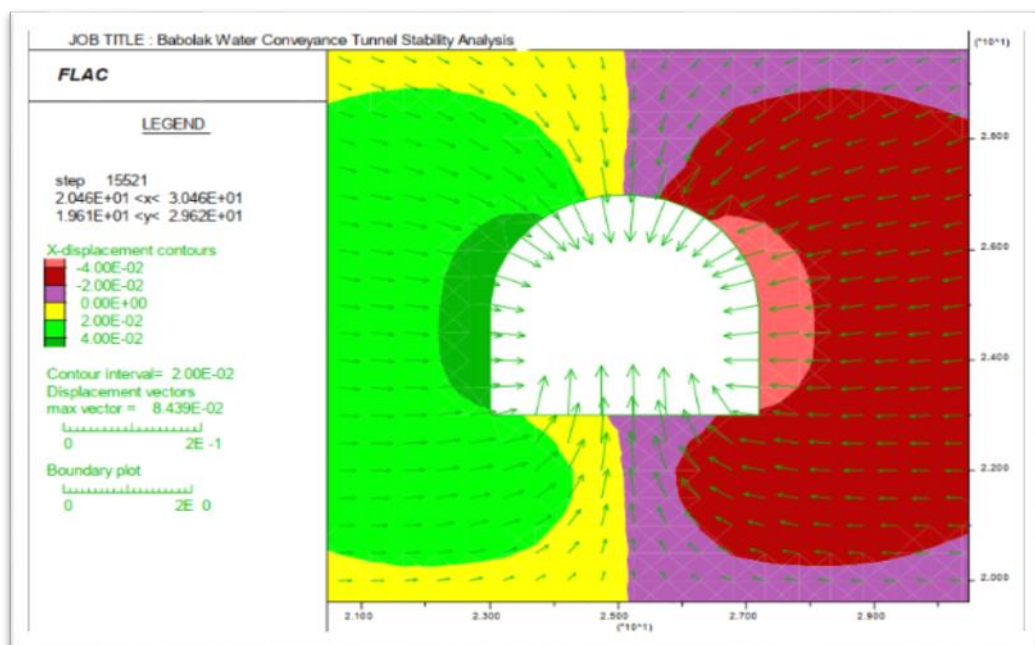
شکل ۸- نیروی نامتعادل کننده (نیروی نامتوازن) در مدل پیش از حفاری



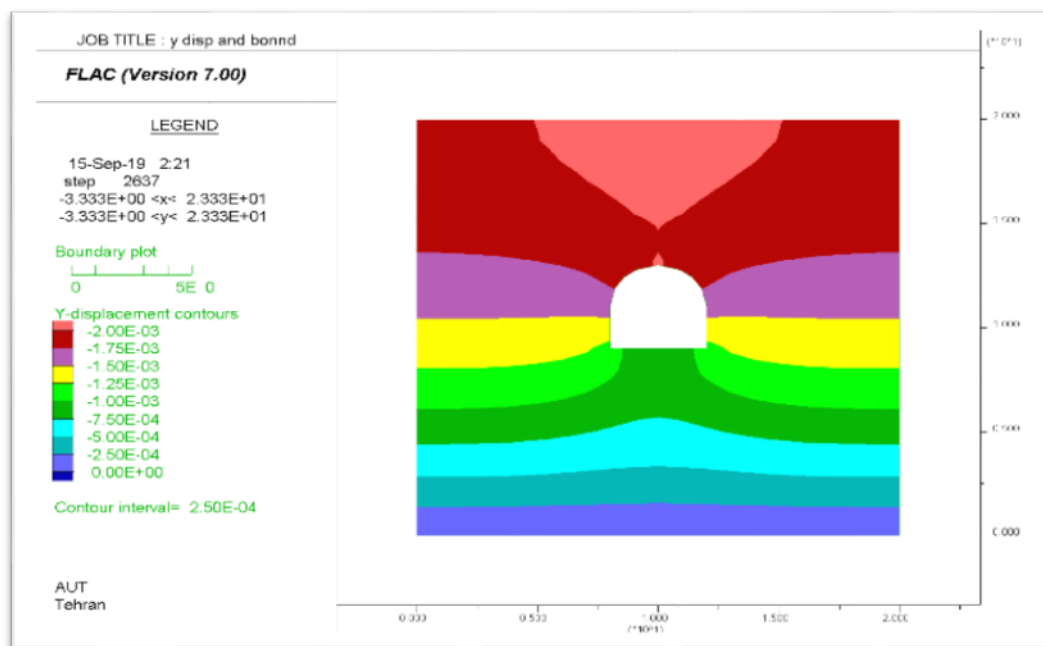
شکل ۹- جابجایی اتفاق افتاده در بالای مرز فرضی پیش از اعمال حفاری به مدل

۵-۶. حفاری تونل در مدل

پس از حفر تونل در و به دست آمدن نتایج حاصل میزان جابجایی قائم و افقی رخ داده در مدل به ترتیب در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند.

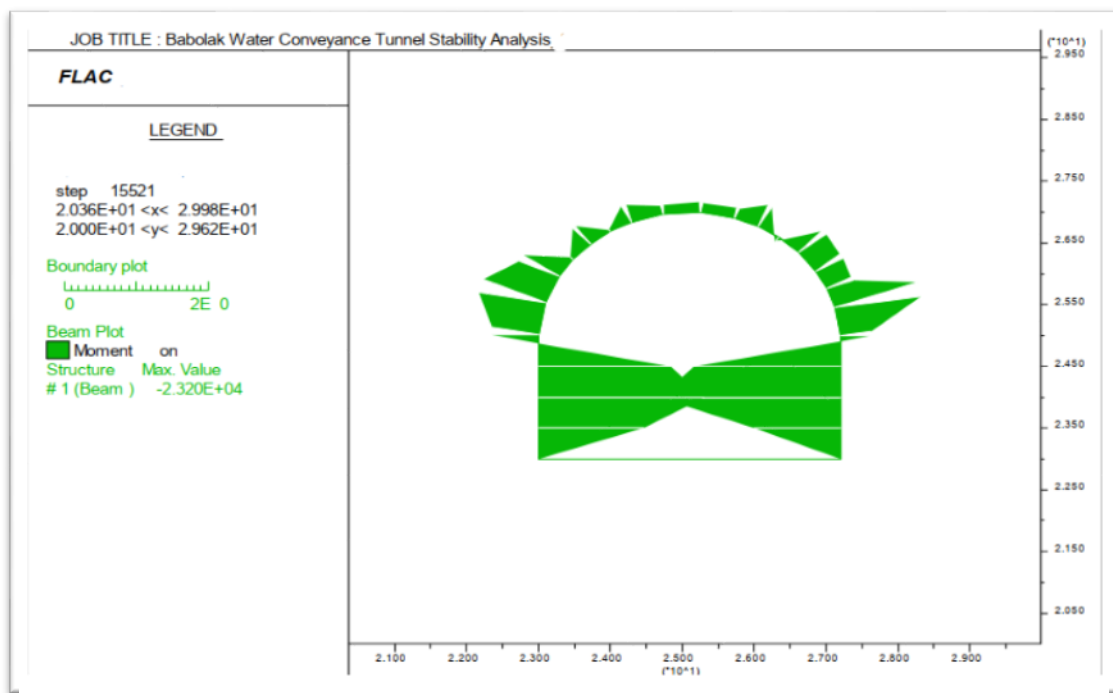


شکل ۱۰- جابه‌جایی افقی ایجاد شده در مدل پس از حفاری

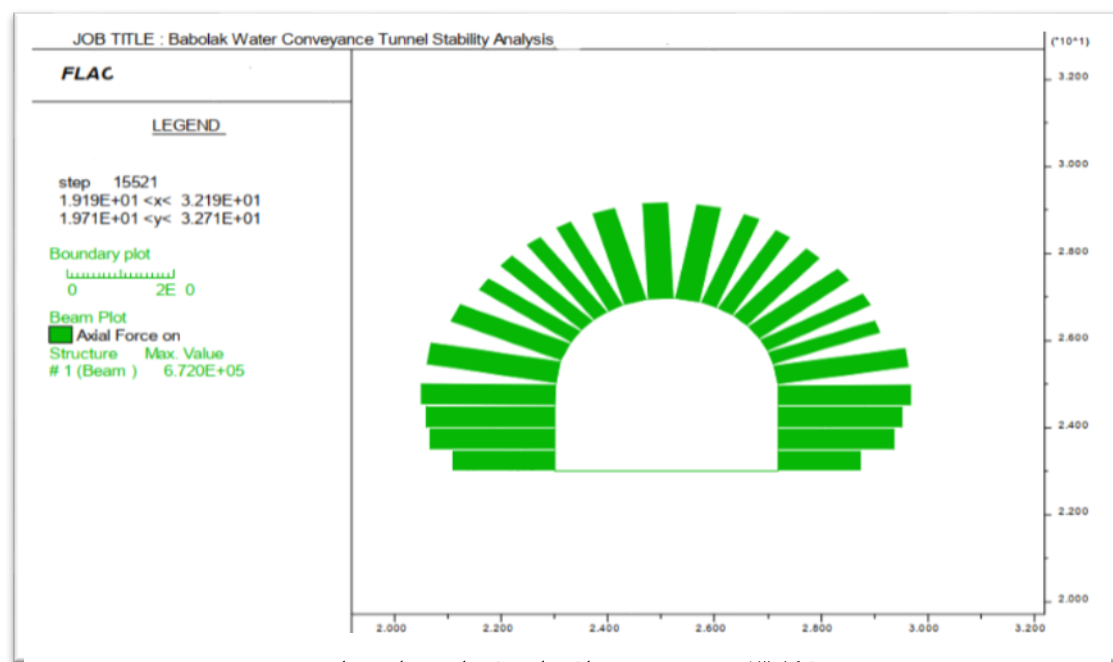


شکل ۱۱- جابجایی قائم ایجاد شده در مدل پس از حفاری

همچنین نیروی محوری و خمشی ناشی از تنش‌های برجای منطقه در شکل ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- نیروی خمشی ناشی از تنش‌های برجای منطقه



شکل ۱۳- نیروی محوری ناشی از تنش‌های برجای منطقه

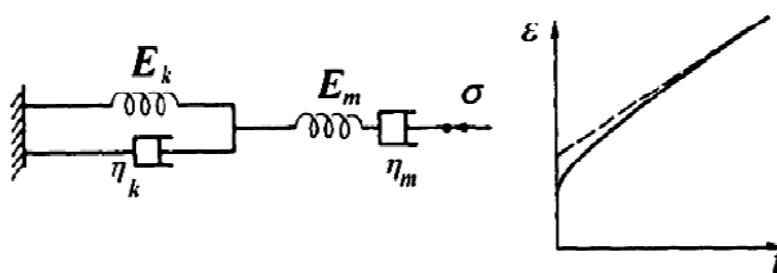
۷. تحلیل وابسته به زمان در تونل انتقال آب بابلک

مقدار زیادی از همگرایی تونل در اثر رفتار وابسته به زمان به وجود آمده است. برای مدل کردن رفتار وابسته به زمان تونل باید خواص ویسکوز سنگ مشخص باشد.

۸. مدل سازی وابسته به زمان تونل بالیک

برای مدل سازی رفتار وابسته به زمان تونل بالیک هندسه مدل، شرایط مرزی و تنش ها همانند حالت مدل ارایه شده در مدل بخش های قبل می باشد.

همان گونه که اشاره شد در $FLAC^{2D}$ هشت مدل برای مدل سازی رفتار وابسته به زمان مصالح سنگی وجود دارد. از میان این مدل ها مدل ویسکوپلاستیک خزش برگر برای مدل سازی رفتار وابسته به زمان توده سنگ تونل بالیک انتخاب شده است. بعد از تخصیص خواص به مدل، تعادل اولیه برقرار شده و جابجایی ایجاد شده در گره ها صفر می شود [۹]. این مدل که دارای چهار پارامتر برای مدل کردن رفتار وابسته به زمان توده سنگ است در همانطور که در این شکل مشاهده می شود، مدل ویسکوالاستیک برگر از اتصال سری دو مدل کلوین حالت الاستیک در شکل ۱۴ نشان داده شده است [۱۰].



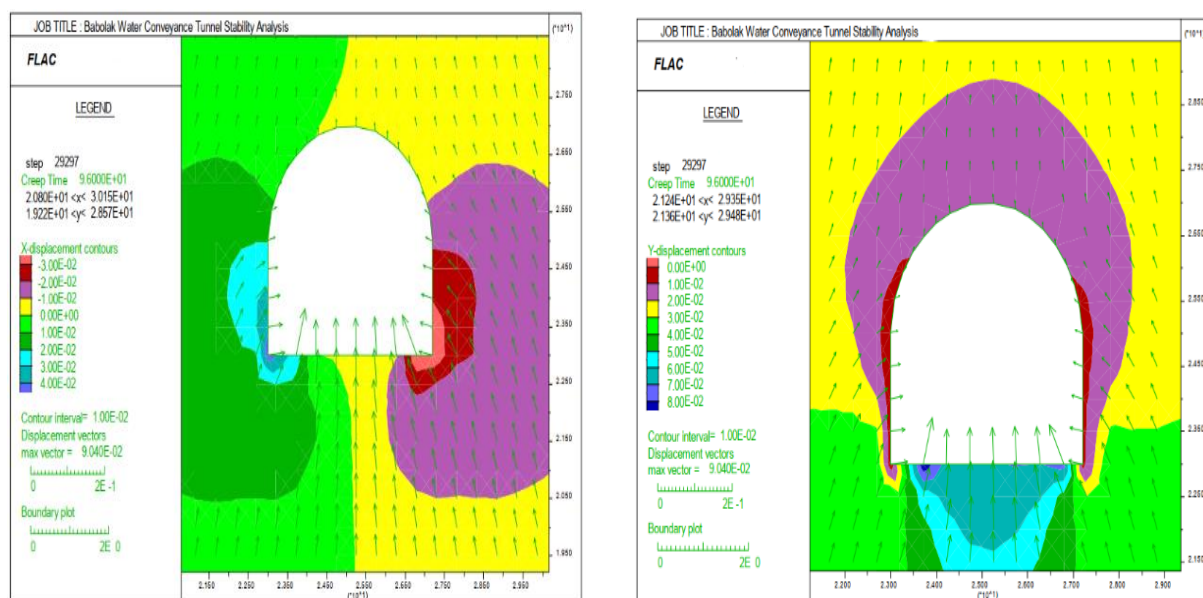
شکل ۱۴- مدل خزشی ویسکوالاستیک برگر؛ σ تنش، ϵ کرنش، t زمان و E و η نیز به ترتیب مدول یانگ و ویسکوزیته مربوط به مدل های کلوین (اندیس k) و ماکسول (اندیس m) می باشند [۱۰].

بازه تغییرات پارامترهای برگر توده سنگ به دست آمده از منابع مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

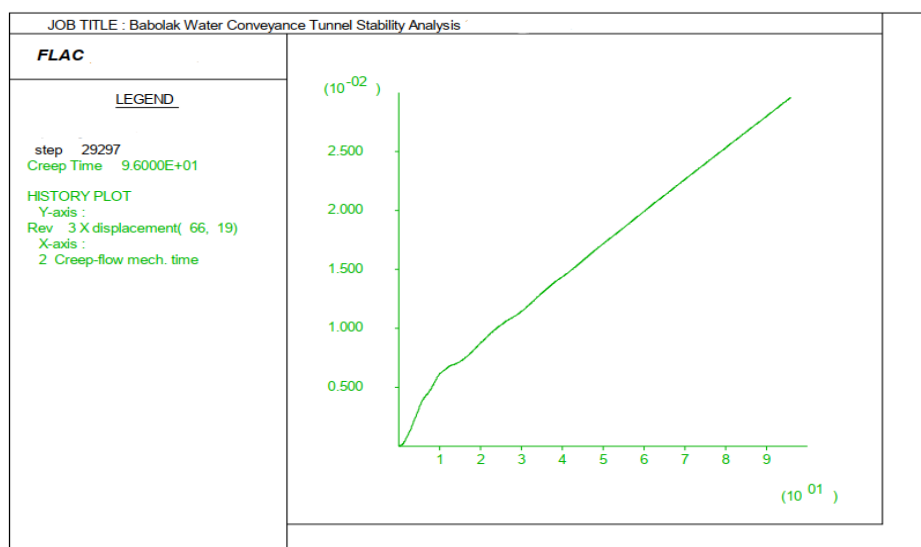
جدول ۳- بازه تغییرات پارامترهای برگر توده سنگ به دست آمده از منابع مختلف [۷].

پارامتر	E_1 (MPa)	η_1 (MPa.day)	E_2 (MPa)	η_2 (MPa.day)
مقدار	۵۰۰-۳۰۰۰	۵۰۰۰-۲۰۰۰۰	۸۰۰-۲۰۰۰	۸۰۰۰۰-۳۰۰۰۰۰

در شکل ۱۵ به ترتیب کنتورهای جابجایی افقی و قائم برای مقطع تونل انتقال آب بابلک پس از گذشت ۹۶ روز نشان داده شده است. مقدار حداکثر جابجایی وابسته به زمان افقی و قائم تونل (همگرایی) پس از ۹۶ روز در اثر پدیده مچاله شوندگی به ترتیب برابر ۲۹ میلی‌متر و ۱۵/۶ میلی‌متر خواهد بود. نمودار شکل ۱۶ تغییرات همگرایی دیواره تونل را پس از ۹۶ روز نشان می‌دهد.



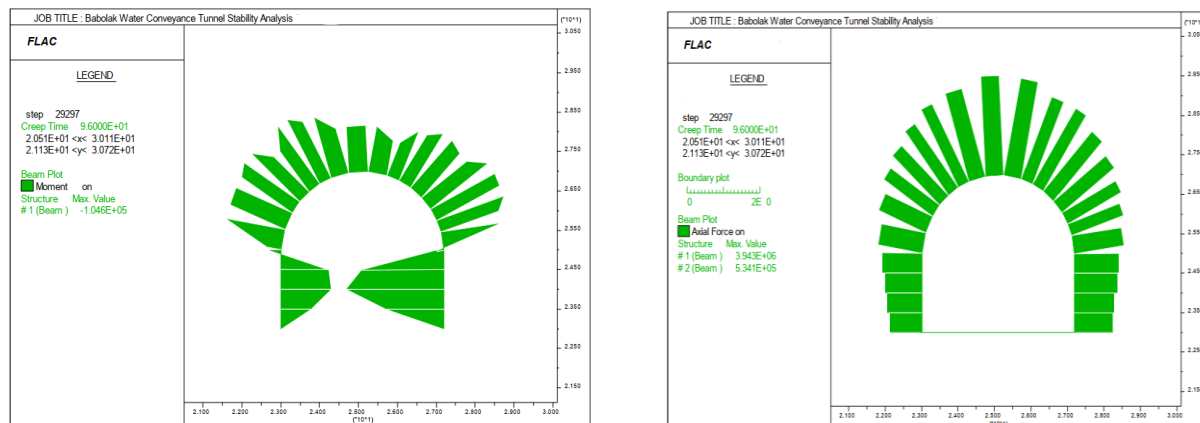
شکل ۱۵- کنتورهای جابجایی قائم (چپ) و افقی (راست)



شکل ۱۶- همگرایی دیواره تونل را پس از ۹۶ روز

نیروهای داخلی ایجاد شده در المان‌های دیواره تونل در اثر همگرایی‌های نسبتاً بزرگ است. لذا، در این مقطع پیش‌بینی می‌شود که پس از حفاری تونل، جابجایی‌های عمده‌ای با گذشت زمان در دیواره‌های تونل رخ خواهند داد که نیاز به کف‌بندی تونل احساس خواهد شد. در شکل ۱۷ به ترتیب نمودار نیروهای محوری و ممان خمشی را مشاهده می‌کنید.

شکل ۱۷- نمودار نیروهای محوری (راست) و ممان خمشی (چپ)



۹. نتیجه‌گیری

- مقدار همگرایی که نشان داد که حدود ۷۰٪ از جابجایی‌ها در اثر رفتار وابسته به زمان توده سنگ به وجود می‌آیند.
- مقدار بسیار زیاد گرانروی مدل ماکسول نشان می‌دهد که عملاً کمک فنر در مدل ماکسول نقشی در جابجایی ندارد و توده‌سنگ در واقع از مدل کلونین اصلاح شده پیروی می‌کند.
- نتایج تحلیل نشان داد که با تغییر مقدار کمی از مدول برشی کلونین مقدار تابع خطا تغییرات زیادی می‌کند در نتیجه مدول برشی کلونین بیشترین تأثیر را بر جابجایی وابسته به زمان توده‌سنگ داشته است.
- برای مدل‌سازی تغییر شکل‌های وابسته به زمان در تونل‌ها و بررسی پدیده مچاله شوندگی می‌توان از مدل‌های وابسته به زمان موجود استفاده نمود. مدل ویسکوپلاستیک برگر یکی از کامل‌ترین مدل‌های رفتاری وابسته به زمان موجود در این زمینه است که نتایج تحلیل‌ها به‌خوبی نشان داد که قادر است تغییرشکل‌های وابسته به زمان توده سنگ را با دقت بالایی شبیه‌سازی کند.

مراجع

۱. ابراهیم اسدالله‌پور، (پیش‌بینی همگرایی دیواره تونل در توده سنگ‌هایی با رفتار وابسته به زمان (مطالعه موردی: تونل انتقال آب بابلک)- شهرپور ۱۳۹۱)
۲. علیرضا احمدی، کورش شهریار، احمد اسدی، (تحلیل پایداری تونل انتقال آب امیرکبیر در حالت کرنش نرم‌شونده بر اساس روش خود تشابهی و استفاده از منحنی همگرایی همجواری)- دی ۱۳۹۱- نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی.

۳. محمدجواد رحیم‌دل و راهب باقرپور، (طراحی نگهداری اولیه تونل انتقال آب گلاب با تأکید بر خطرات زمین‌شناسی)- اسفند ۱۳۹۱- فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی.
۴. سهیل شریفی، فریدون خسروی، سید رسول سورانی، (ارزیابی پایداری تونل انتقال آب ارومیه با مدل‌سازی عددی سه بعدی با استفاده از روش‌های اجزاء و تفاضل محدود)- مهر ۱۳۹۷- نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاها‌ی زیرزمینی.
۵. سعید مهدوری، فریما آیتی، (بررسی تراست لازم حفاری در تونل انتقال آب بهشت‌آباد)- بهار و تابستان ۱۳۹۲- نشریه زمین‌شناسی مهندسی جلد هفتم شماره ۱.
۶. داب، عباس، گزارش زمین‌شناسی، مطالعات مرحله اول سیستم انتقال آب بابلک، داده‌های همگرایی تونل انتقال آب بابلک، شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، بهمن ۱۳۷۷.
۷. Itasca Consulting Group, Inc, ۲۰۰۴, “FLAC^۳D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2 Dimensions”, User’s Manual.
۸. قربانی، مسعود ۱۳۸۷، بهینه‌سازی سیستم نگهداری مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه بیشه با مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و داده‌های حاصل از ابزار دقیق. دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
9. X. Feng and J. A. Hudson, “International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Specifying the information required for rock mechanics modelling and rock engineering design, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 47, no. 2, pp. 179–194, 2010. ([Cross Ref](#))
10. R. Mechanics, R. E. Goodman, and J. Wiley, “Introduction to Rock Mechanics.([Cross Ref](#))