

رسم منحنی عکس‌العمل زمین و تعیین اندرکنش نگهدارنده با توده‌سنگ

با روش‌های تحلیلی و عددی - مطالعه موردی تونل انتقال آب بابلک

علی نورزاد

ایران، استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید عباسپور
تهران (صنعت آب و برق)
Noorzad@pwut.ac.ir

کاوه آهنگری

ایران، استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی،
واحد علوم تحقیقات تهران.
Kaveh.Ahangari@gmail.com

احسان داداشی*

ایران، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن،
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران.
Edadashi.22@gmail.com

سعید آلودری

ایران، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن،
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران.
Saeed.aloudary@gmail.com

چکیده

رفتار فضای زیرزمینی و سیستم نگهداری آن به مشخصات بارسنگ و نیز مشخصات سیستم نگهداری، چگونگی و زمان نصب آن بستگی دارد. از طرف دیگر منحنی مشخصه بایستی شامل فاصله از مقطع حفاری و زمان از هنگام عبور حفاری از مقطع مورد نظر باشد. لذا تعیین منحنی عکس‌العمل زمین و زمان نصب سیستم نگهداری در هر مرحله با پیچیدگی‌هایی همراه است. از جمله این روش‌ها، روش‌های تحلیلی هستند که بر اساس فرض‌های متعددی استوار شده‌اند و بعضی از آنها ساده‌کننده هستند. به‌همین دلیل ممکن است نتایج آن در عمل در بعضی از سازه‌ها دور از واقعیت باشد. براین اساس می‌توان از دقت روش‌های حل عددی بهره جست. در این تحقیق از نتایج نرم‌افزار عددی FLAC در تحلیل تونل انتقال آب بابلک استفاده شده است ضمن آنکه این منحنی‌ها با روش تحلیلی نیز ترسیم شده‌اند. مقایسه نتایج حاصل از روش تحلیلی و روش عددی بیانگر اختلاف قابل ملاحظه جابجایی روی دیواره تونل است، بدین صورت که مقدار جابجایی محاسبه‌شده در روش عددی بیشتر از جابجایی بدست آمده از روش تحلیلی است.

ABSTRACT

The behavior of an underground space and its support system depends on the overburden and support system characteristic, circumstance and time of installation. On the other hand, the characteristic curve should include the distance from working face and transmission of time of excavation in the above mentioned section. Hence, determining the ground reaction curve and the support system installation time at any stage is concomitant with complexity. The limit equilibrium methods are part of the analytical methods that are based on multiple suppositions; some of these methods are simplifiers. Therefore, in some structures their results may be away from practical reality. Hence, the accuracy of the numerical solution methods can be profitable. In this paper; we use the numerical results of FLAC software in the analysis of Babolak Water Conveyance Tunnel. The curves have also been drawn by using the analytical method. The comparison of results from analytical methods and numerical methods show a noteworthy difference in the tunnel wall displacement. The displacement calculated by the numerical method is more than the analytical method.

کلمات کلیدی: روش تحلیلی، روش عددی، منحنی عکس‌العمل زمین، سیستم نگهداری، تونل بابلک.

مقدمه

توجه روزافزون به هزینه تونل‌سازی منجر به تحقیقات بیشتر برای بهینه‌سازی اقتصادی نگهداری شده است و برای انتخاب ترکیب‌های مختلف نگهداری با نتایج تکنیکی یکسان و هزینه‌های کمتر خصوصاً در توده‌سنگ‌های ناپایدار، درک مفهومی اندرکنش نگهداری و توده‌سنگ امری اجتناب‌ناپذیر است (مسیبیان، توکلی؛ ۱۳۸۶). در این راستا با وجود محدودیت‌هایی که مفروضات ساده‌کننده برای روش تحلیلی به‌وجود آورده است، طراحان از آن به عنوان ابزاری توانا برای آنالیز اولیه رفتار زمین استفاده می‌کنند. البته اساسی‌ترین آنالیز بر پایه روش عددی انجام شده و در نهایت از نتایج روش عددی برای کنترل نتایج روش تحلیلی استفاده می‌کنند. بر این اساس هدف از این تحقیق، بیان روشی جهت رسم منحنی عکس‌العمل زمین و نیز اندرکنش حائل و سنگ دربرگیرنده سازه با استفاده از روش عددی است که پیش‌فرض‌های محدودکننده روش‌های تحلیلی را نداشته و به‌راحتی برای هر سازه زیرزمینی با هر هندسه دلخواه قابل استفاده می‌باشد.

معرفی طرح تونل انتقال آب بابلک

پروژه تونل انتقال آب بابلک، بخشی از طرح سد مخزنی البرز محسوب می‌گردد که به‌منظور تأمین بخشی از آب مورد نیاز در مخزن سد البرز در استان مازندران در نظر گرفته شده است. این تونل با مقطع اصلاح‌شده به‌صورت نعل اسبی به قطر ۴/۲ متر با راستای شمال غرب- جنوب شرق، با شیب ۰/۰۱۸۹ درجه و طول ۲۵۸۰ متر در حال اجراست. این تونل آب رودخانه بابلک را به رودخانه بابل‌رود در بالادست محل سد اصلی البرز منتقل خواهد نمود (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۸). مقادیر اولیه پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده به‌طور خلاصه در مدل‌های عددی در جدول ۱ ارائه شده است. این مقادیر بر اساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های سنگ سالم و نتایج برداشت ژئوتکنیکی در طول مسیر تونل، با استفاده از روابط موجود به‌دست آمده‌اند.

چگالی توده‌سنگ (Kg/ m ²)	۲۱۰۰
ضریب پواسون	۰/۲۵
مدول دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ (GPa)	۱/۲
چسبندگی داخلی (MPa)	۰/۰۹
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۲۸
شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)	۳۵
مقاومت فشاری سنگ بکر (MPa)	۸
مقاومت فشاری توده‌سنگ (MPa)	۰/۸۳
ارتفاع روباره (m)	۸۵
ثابت ماده‌سنگ	۷
ضریب اختلال	۰

جدول ۱ مقادیر پارامترها مورد نیاز در روش‌های تحلیلی و عددی (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۸).

نحوه ترسیم منحنی عکس‌العمل زمین

۱- روش تحلیلی

روش تحلیلی، آنالیز منحنی مشخصه زمین بعد از حفر سازه را با استفاده از مدل‌های دوبعدی انجام می‌دهد. در این تحقیق این منحنی‌ها توسط نرم‌افزار RocSupport با استفاده از تئوری‌های مختلف روش تحلیلی که در زیر آمده‌اند، برای تونل بابلک رسم شده است. لازم به ذکر است که پارامترهای ورودی در این روش‌ها از جدول ۱ استخراج شده است.

۱-۱- روش Carranza-Torres

از نکات بارز این روش معرفی دو پارامتر S_1 و S_3 به عنوان تنش‌های اصلی و ارائه معیار شکست هوک- براون بر این اساس است. همچنین مقادیر P_i و S_0 نیز بر اساس فشار داخلی p_i و میدان تنش یکنواخت σ_0 تعریف شده‌اند (Carranza-Torres, 2004). لذا پارامترهای مورد نیاز جهت رسم منحنی عکس‌العمل زمین شامل مقاومت فشاری سنگ بکر، شاخص مقاومت زمین‌شناسی، ثابت ماده‌سنگ، زاویه اتساع، فاکتور اختلال، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می‌باشد (RocSupport, 2004).

۱-۲- روش Duncan Fama

این روش بر اساس معیار شکست موهر-کلمب ارائه شده است. لذا پارامترهای مورد نیاز جهت رسم منحنی عکس‌العمل زمین شامل مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری توده‌سنگ می‌باشد (RocSupport, 2004).

۲- روش عددی

در این تحقیق، رسم منحنی عکس‌العمل زمین به روش عددی بر اساس آنالیز مدل کالیبره‌ای است که در نرم‌افزار FLAC2D به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

۱- ابعاد هندسی مدل: با توجه به اینکه، اگر ابعاد مدل حدود ۱۰ برابر حفره باشد، تحت شرایط مرزی تفاوت درصد خطاها به حداقل ممکن (حدود ۰/۵٪) کاهش خواهد یافت (FLAC, 2008)، ابعاد هندسی مدل برای تونل بابلک ۴۲×۴۲ متر انتخاب شد.

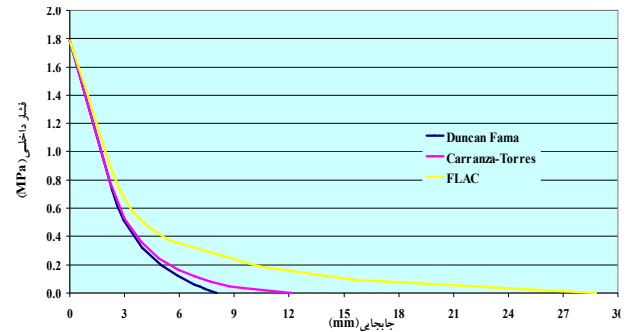
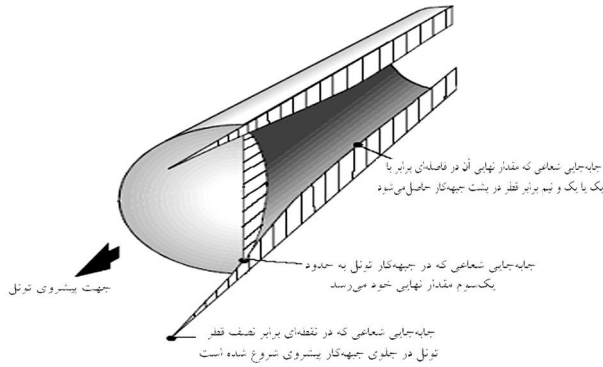
۲- مدل رفتاری توده‌سنگ معادل: مدل رفتاری موهرکلمب نمایان‌گر موادی است که تنها در اثر برش به حد تسلیم می‌رسند و در مکانیک‌سنگ و خاک به‌عنوان مدلی برای حالت پلاستیک، مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا به‌عنوان مدل رفتاری در مدل‌سازی تونل انتقال آب بابلک استفاده شده است. - پارامترهای فیزیکی و مکانیکی توده‌سنگ منطقه مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

۴- شرایط اولیه مدل: در این مرحله تنش‌های ثقلی برجا در مدل اعمال می‌شوند.

۵- شرایط مرزی مدل: در این حالت برای گره‌های مرزی جابه‌جایی‌ها ثابت و برابر صفر انتخاب شدند.

۶- ارائه مدلی از زمین مورد بررسی: این مرحله بر اساس حل و حفر مدل قابل دستیابی است. لازم به ذکر است که در این تحلیل‌ها، حفاری بصورت تک مرحله‌ای در نظر گرفته شد.

۷- فیش‌نویسی جهت رسم منحنی مشخصه زمین: این مرحله بر اساس کاهش فشار اولیه در ده مرحله بصورت نسبی در فشار اولیه برجا (۲۰٪ فشار مرحله قبل) مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه با تعیین مقادیر جابجایی‌های متناسب با فشار اعمالی، منحنی مشخصه رفتار زمین برای تونل بابلک با عنایت به موارد فوق رسم شده است. در شکل ۱، منحنی مشخصه زمین برای سه روش فوق ارائه شده است.

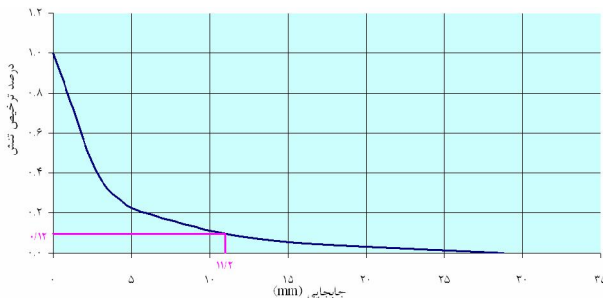


شکل ۱ منحنی مشخصه زمین با توجه به مدل عددی.

شکل ۲ الگویی از تغییرات توده‌سنگ مجاور تونل در حال پیشروی (Hoek, 2001).

بدین ترتیب می‌توان جایجایی را به‌عنوان پارامتر کنترلی وقفه زمانی در نظر گرفت. بدیهی است مقدار آن باید به‌نحوی تعیین شود که از جایجایی قابل قبول که از روابط ساکورائی (Sakurai, 1997) محاسبه می‌شود، بیشتر نشود. مقدار این جایجایی به خواص مکانیکی توده‌سنگ، وضعیت تنش منطقه و شکل فضای زیرزمینی بستگی دارد. بر این اساس جهت تعیین پوشش اولیه لازم به‌منظور حفظ پایداری فضای حفاری شده و کمک به ایجاد تعادل جدید در زمین از روش همگرایی - همجواری و رسم منحنی مشخصه زمین با کمک نرم‌افزار FLAC استفاده شده است. لذا مراحل طراحی پوشش اولیه به ترتیب شامل موارد زیر است:

۱- انتخاب گام پیشروی، فاصله جبهه‌کار از پوشش و اعمال ترخیص تنش معادل با همگرایی به‌وجود آمده با توجه پارامترهای مواد تا لحظه استقرار پوشش: در این طرح با توجه به شرایط اجرایی، میزان گام پیشروی و فاصله جبهه‌کار از پوشش به ترتیب ۱ و ۰/۷۵ متر انتخاب شد. با توجه به نسبت فاصله جبهه‌کار از پوشش و با رسم منحنی مشخصه زمین بر اساس پارامترهای جدول ۱، مقدار جایجایی نهایی در سقف تونل با توجه به ترخیص کامل تنش برابر با ۲۸/۷ میلی‌متر محاسبه شد. در ادامه مقدار جایجایی به‌وجود آمده در اثر پیشروی جبهه‌کار با توجه به نرخ ناهمجواری برابر ۱۱/۲ میلی‌متر محاسبه شد. سپس با توجه به شکل ۳ ترخیص تنش اعمالی به مدل معادل با ۱۱/۲ میلی‌متر جایجایی، ۸۸ درصد تعیین شد.



شکل ۳ تعیین ترخیص تنش معادل با همگرایی به‌وجود آمده با توجه پارامترهای مواد تا لحظه استقرار پوشش.

۲- بررسی پایداری فضای حفاری تا قبل از نصب پوشش اولیه: برای ارزیابی پایداری فضای حفاری لازم است تا نتایج جایجایی‌های حاصل از مدل عددی با جایجایی‌های مجاز حول فضای زیرزمینی مقایسه شوند. در صورتی که این جایجایی‌ها از جایجایی مجاز بواسطه رابطه (۱) که به عنوان مبنای طراحی نگهداری فضاهای زیرزمینی توسط ساکورائی ارائه شده است، کمتر شود، تونل پایدار خواهد بود. این رابطه کرنش بحرانی در حالت فشاری محصورشده در اطراف تونل را برحسب مدول الاستیسیته محیط بیان می‌کند (Sakurai, 1997).

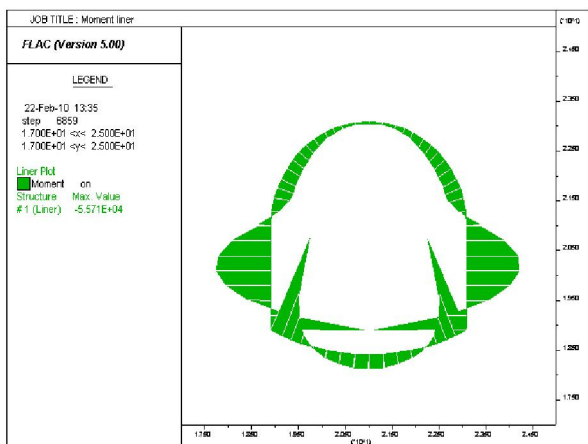
همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بخش الاستیک منحنی رسم‌شده به روش‌های تحلیلی مطابقت مناسبی با روش عددی دارد اما بخش پلاستیک این منحنی‌ها کمتر از روش عددی است، به‌عبارتی جایجایی ثبت‌شده در حالت عددی بیشتر از جایجایی روش‌های تحلیلی است. بر اساس اینکه روش تحلیلی نسبت به روش عددی دارای محدودیت‌هایی است، این امر موجب اختلاف بین نتایج دو روش و در نتیجه منحنی اندرکنش زمین می‌شود. از جمله این محدودیت‌ها هندسه مقطع تونل می‌باشد که در روش تحلیلی مقطع تونل دایره‌ای شکل فرض می‌شود، لذا در مواقعی که هندسه واقعی تونل شکلی غیر از دایره داشته باشد با توجه به تمرکزهای تنش اطراف آن منتج به جایجایی‌های متفاوتی خواهد شد. پارامتر دیگر نسبت تنش‌های افقی به قائم منطقه می‌باشد. در روش تحلیلی این نسبت ثابت و برابر یک در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که نسبت تنش‌های متفاوت نیز منجر به تمرکزهای مختلف تنش می‌شود. نهایتاً اطلاعات مربوط به پیچیدگی‌های زمین‌شناسی منطقه است که در روش تحلیلی مواد بصورت همگن و ایزوتروپ فرض شده و لایه بندی‌های مختلف و شیب‌داری آنها در نظر گرفته نمی‌شوند.

طراحی سیستم نگهداری

بر اساس اندرکنش نگهدارنده با توده‌سنگ

وقتی سیستم نگهداری در نزدیکی سینه‌کار نصب می‌شود، همه بار روی این سیستم منتقل نمی‌شود، بلکه قسمتی از بار که در اطراف فضای حفاری توزیع مجدد یافته، توسط خود سینه‌کار تحمل می‌شود. با پیشروی تونل، تاثیر سینه‌کار کاهش یافته و سیستم نگهداری باید مقدار بیشتری از بار را تحمل کند (Carranza-Torres et al., 2000). لحاظ نمودن وقفه زمانی بین حفر تونل تا نصب نگهداری، تاثیر بسزایی در کاهش حجم تزریق‌های تحکیمی دارد. چرا که بخش قابل توجهی از تغییر شکل توده‌سنگ در همین فاصله زمانی رخ داده و در اثر این تغییر شکل بخش عمده‌ای از تنش‌های القایی رها شده و در نهایت فشار وارد بر سیستم نگهداری کاهش می‌یابد. اگر در مدل عددی به این فاصله زمانی توجه نشود، مسلماً ناپیوستگی انتظار جواب قابل قبول از آنرا داشت.

از آنجا که حل مسئله در نرم‌افزار FLAC در قالب پله‌های زمانی انجام می‌گیرد و تغییر مقادیر اولیه پارامترها از قبیل تنش‌ها و جایجایی‌ها را می‌توان برحسب افزایش این پله‌های زمانی به‌وضوح مشاهده و کنترل کرد، از این‌رو می‌توان با کنترل تعداد پله‌های زمانی و حل مسئله بر اساس سعی و خطا، تاخیر زمانی نصب نگهداری نسبت به پیشروی تونل را مدل‌سازی کرد. اما مسئله این است که پارامتر کنترلی چه باشد و مقدار آن از جهت ملحوظ نمودن وقفه زمانی مناسب چقدر است؟ با توجه به شکل ۲، ملاحظه می‌شود که جایجایی سقف و کف یک تونل در حال پیشروی از فاصله‌ای از نصف قطر، جلوتر از سینه‌کار شروع شده و در سینه‌کار به حدود یک‌سوم مقدار نهایی می‌رسد و در نهایت پس از فاصله‌ای حدود ۱/۵ برابر قطر در پشت سینه‌کار به مقدار نهایی خود خواهد رسید (Hoek, 2001).



شکل ۵ ممان ایجاد شده در شاکریت با ضخامت ۲۰ سانتی متر.

همچنین به کمک رابطه (۳) مقاومت فشاری و کششی تعیین خواهند شد که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است.

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{MY}{I} \quad (3)$$

که در آن σ مقاومت کششی (با علامت منفی) و مقاومت فشاری (با علامت مثبت) بر حسب مگاپاسکال، A سطح مقطع بر حسب مترمربع، M ممان ایجاد شده در شاکریت بر حسب مگانیوتن-متر، Y فاصله از تار خنثی (نصف ضخامت شاکریت) بر حسب متر و I ممان اینرسی بر حسب چهارم متر است (باقرزاده، ۱۳۸۶).

مقاومت کششی شاکریت (MPa)	مقاومت فشاری شاکریت (MPa)
۳/۸۷	۱۲/۸

جدول ۳ نتایج حاصل از کنترل سیستم نگهداری.

با توجه به عدم تامین مقاومت کششی شاکریت بر اساس نتایج حاصل از کنترل سیستم نگهداری، مطابق رابطه (۴) و نتایج مدل عددی، ضخامت بر اساس مجموعه شاکریت، قاب مشبک در جدول ۴ ارائه شده است.

$$t_{eq} = t + \left(\frac{N\pi d^3}{4D} \times \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (4)$$

که در این رابطه، t_{eq} ضخامت شاکریت معادل، t ضخامت شاکریت، d قطر میلگرد و N تعداد میلگرد بکار رفته در قاب مشبک، D فاصله بین قابها همگی بر حسب متر و E_s/E_c نسبت مدول یانگ فولاد به شاکریت است که تقریباً برابر ۱۰ می باشد (باقرزاده، ۱۳۸۶).

جدول ۴ سیستم پیشنهادی برای تونل انتقال آب بابلک.

لازم به ذکر است که برای جلوگیری از شکست شاکریت در اثر کشش، یک ردیف شبکه فولادی $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} @ \Phi 6 \text{ mm}$ با توجه به محاسبات انجام شده پیشنهاد می شود. بر اساس خصوصیات توده سنگ منطقه و نتایج مدل عددی می توان گفت که تاثیر پیچ سنگها در کاهش جابجاییها و افزایش ضریب ایمنی ناچیز است. در نهایت جابه جاییهای حاصل از مدل عددی با توجه به نصب سیستم نگهداری در شکل ۶ ارائه شده است.

$$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad (1)$$

در این رابطه E مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع و ϵ_c کرنش بحرانی بر حسب درصد می باشد. با تعیین کرنش مجاز و با استفاده از رابطه (۲) جابجایی مجاز مشخص می گردد.

$$\epsilon_c = \frac{u}{a} \quad (2)$$

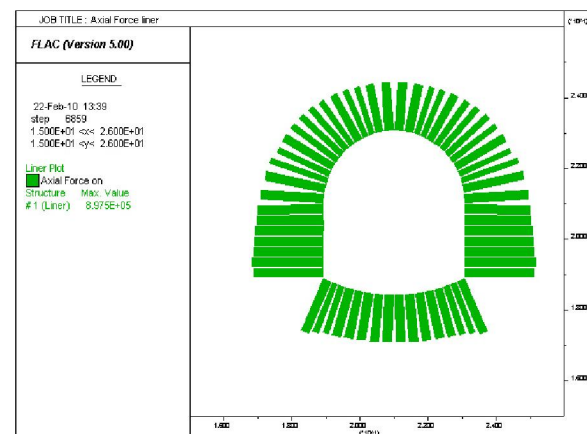
که در این رابطه u جابجایی مجاز برای مدل ایجاد شده و a شعاع تونل بر حسب متر است (Sakurai, 1997). بر اساس رابطه فوق و با توجه به پارامترهای مواد، مقدار کرنش بحرانی برابر 5.75×10^{-3} و جابجایی مجاز ۱۲ میلی متر تعیین شد. با توجه به مباحث یاد شده لازم است تا جابجاییهای حاصل از مدل عددی کمتر از ۱۲ میلی متر باشند.

۳- نصب پوشش اولیه بر اساس پارامترهای بهینه توده سنگ و ارزیابی پایداری: در این بخش با بررسی های به عمل آمده، تونل با ضخامت ۲۰ سانتی متر شاکریت پایدار است. اما تامین مقاومت فشاری، کششی و برشی سیستم نگهداری بایستی با توجه به نیروی محوری و ممان ایجاد شده در شاکریت کنترل شود. در جدول ۲ پارامترهای مورد نیاز برای کنترل سیستم نگهداری آورده شده است.

نیروی محوری شاکریت (N)	ممان شاکریت (N.m)
8.98×10^5	-5.57×10^4

جدول ۲ پارامترهای مورد نیاز برای کنترل سیستم نگهداری.

در ادامه نیروی محوری و ممان ایجاد شده در شاکریت با ضخامت ۲۰ سانتی متر به ترتیب در اشکال ۴ و ۵ ارائه شده است.



شکل ۴ نیروی محوری ایجاد شده در شاکریت با ضخامت ۲۰ سانتی متر.

نوع سیستم نگهداری	مشخصات سیستم نگهداری
قاب مشبک	۴ میلگرد، به قطر ۲۵ میلی متر، فواصل قابها ۱ متر
شاکریت	به ضخامت ۱۸ سانتی متر با مقاومت فشاری ۲۲ مگاپاسکال (مقاومت اجرا شده در طرح)

از راهنمایی‌های آقایان مهندس ضیایی، مهندس باقرزاده و مهندس نیک‌بختان در این تحقیق کمال تشکر را داشته باشیم.

مراجع

مسیبیان، آرش، توکلی، حسین، ۱۳۸۶، طراحی نگهداری تونل انتقال آب گاوستان به روش همگرایی- فشرده‌گی، سومین کنفرانس مکانیک‌سنگ، تهران، ایران، ۴۰۹-۴۱۴.

شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۸، گزارش معرفی، مطالعات صورت‌گرفته، مشخصات اجرایی تونل انتقال آب بابلک.

باقرزاده، افضل، ۱۳۸۶، تحلیل پایداری تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان در محل تبدیل تونل‌ها به یک تونل با استفاده از مدل‌سازی عددی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن و متالوژی، دانشگاه سهند تبریز، ایران.

Carranza-Torres, C., 2004, Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Proceedings of the ISRM SINOROCK 2004 Symposium, 41, 777-809.

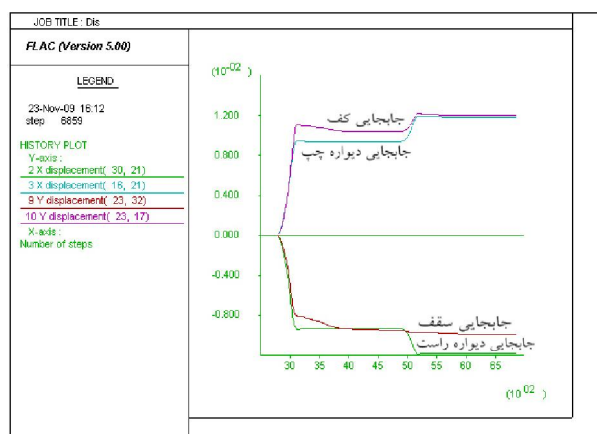
RocSupport, 2004, Rocscience Inc., Version 3.0, User's Manual, 1-16.

FLAC 2D, 2008, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Itasca Consulting Group, Inc., Version 5, User's Manual.

Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 2000, Application of the Convergence- Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses that Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion, *Tunneling and Underground Space Technology*, 15(2), 187-213.

Hoek, E., 2001, Rock mass properties for underground mines, *Underground Mining Method, Engineering Fundamentals and International Case Studies*, (Edited by Hustrulid, W., A and Bullock, R. L.) Littleton, Colorado, Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), 51-79.

Sakurai, S., 1997, Lessons learned from field measurements in tunneling, *Tunneling and Underground Space Technology*, 12(4), 453-460.



شکل ۶ جابجایی نهایی بعد از نصب سیستم نگهداری.

نتیجه‌گیری

همان‌گونه که در این تحقیق مشاهده شد، می‌توان با به‌کارگیری نرم‌افزار عددی مناسب با نوع رفتار محیط دربرگیرنده سازه زیرزمینی، بدون در نظر گرفتن پیش‌فرض‌های محدودکننده روش‌های تحلیلی، از این روش‌ها در تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی بهره‌جست. مقایسه نتایج حاصل از روش تحلیلی و روش عددی بیانگر اختلاف قابل ملاحظه جابجایی روی دیواره تونل است، بدین‌صورت که مقدار جابجایی محاسبه‌شده در روش عددی حتی از بیشترین جابجایی بدست آمده از روش تحلیلی بیشتر می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان برای هر سازه زیرزمینی با هر مقطع عرضی غیر مشخص در میدان تنش دلخواه، منحنی مشخصه رفتار زمین و اندرکش آن را با سیستم نگهداری طراحی شده، رسم کرد.

سپاسگزاری

در پایان از مساعدت آقایان مهندس بهنیا، مهندس کریمی، مهندس اصغری و مهندس امیری از شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس به‌خاطر درخصوص همکاری ارزشمندشان در انجام این تحقیق، قدردانی می‌گردد. همچنین بر خود لازم می‌دانیم