مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار و تابستان ۱۳۹٦، جلد دهم، شماره ۱ و ۲، صفحه ۹۷ تا ۱۱۱

تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهدارنده تونل آب بر سد معشوره

بهزاد سبزواری ده کبود*[۱]، امین فلاح[۲]، محمد رضا مشرفی فر[۳]، عنایت الله امامی[٤]

دریافت مقاله: ۹۷/۰۳/۰۲ پذیرش مقاله: ۹۷/۰٦/۳۰

چکیده

تونل آب‌بر سد معشوره با هدف تامین آب مورد نیاز برای نیروگاه برق آبی سد مذکور احداث شده است. تاقدیس منگنی کوه و خرم آباد از اصلی‌ترین ساختارهای تشکیل دهنده مسیر تونل هستند. در این مقاله با استفاده از سه روش تجربی، تحلیلی و عددی سیستم نگهداری پیشنهادی ارائه شده است. در روش تجربی از دو روش RMR و Q استفاده شده است. با استفاده از نرم افزار RocSupport شرایط پایداری تونل به روش تحلیلی انجام شد. در تحلیل به روش عددی از نرم افزار phase^2 که بر پایه اجزای محدود است استفاده شده است. نتایج تحلیل عددی نشان می دهد که جابجای های کل، افقی و عمودی بدون نصب سیستم نگهداری به ترتیب ۱۱/٤، ٦/۳ و ۱۱/٤ سانتیمتر است که با نصب سیستم نگهداری میزان جابجای کل، افقی و عمودی به ترتیب ٤/۷، ۲/۸ و ٤/۷ سانتیمتر کاهش پیدا کرده است. ضریب اطمینان بعد از نصب سیستم نگهداری به ۲/۲۱ می رسد که پایداری تونل را نشان می دهد. نتایج حاصل از سه روش تجربی، تحلیلی و عددی سیستم نگهدارنده مشابه را ارائه می دهند.

کلید واژه‌ها: *تحلیل پایداری، طراحی سیستم نگهداری، روش عددی، روش تحلیلی، روش تجربی*

۱. کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه یزد Sabzevari.9692@gmail.com
۲. کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه یزد
۳. استادیار و عضو هیئت علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه یزد
٤. استادیار و عضو هیئت علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه یزد
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

تونل آب‌بر یکی از سازه‌های است که در مراحل اولیه ساخت سد احداث می‌شود. در همین راستا جهت تامین آب نیروگاه برق آبی سد معشوره اقدام به طراحی تونل آب‌بر سد بتنی معشوره شد (شرکت توسعه آب و منابع ایران،۱۳۸۹). این تونل دارای طولی برابر ۹۰۰۰ متر و قطری برابر با ۵/۵ متر طراحی گردیده است. فرض در مدل سازی به روش عددی همگن بودن خواص توده سنگ در اثر و جود دسته درزه های مختلف در جهات مختلف است.

منطقه مورد مطالعه در تنگه معشوره و بر روی رودخانه کشکان در استان لرستان واقع شده است. این تونل در تگیه‌گاه چپ و با قطر داخلی ۵/۵ و تراز ورودی ۱۳۱۵ متر از سطح دریا در حال حفاری است. موقعیت جغرافیایی این محل برابر با ٤۷ درجه و ۵۰ دقیقه و ۲۵ ثانیه طول شرقی و ۳۳ درجه و ٤۸ دقیقه و ۳٤ ثانیه عرض شمالی می‌باشد. این منطقه در زاگرس مرتفع تشکیل شده است، سازندهای این منطقه بیشتر توده‌ای و دارای توالی رسوبی ضخیم لایه هستند. از مهم‌ترین ساختارهای مسیر تونل نیروگاه می‌توان به تاقدیس منگنی کوه اشاره کرد، که محور سد بر روی یال شمالی آن قرار دارد. مرتفع‌ترین نقطه ارتفاعی در مسیر تونل، حدود ۲۰۵۰ متر از سطح دریا می‌باشد.با نزدیک شدن به محل نیروگاه به تدریج از ارتفاعات کاسته شده و شیب ملایم‌تر می‌شود به لحاظ سنگ چینه شناسی در محدوده مسیر تونل نیروگاه سه سازند تاربور،امیران و گورپی رخنمون دارد. سازند تاربور در ۱۵۰ متری ابتدایی مسیر تونل دیده می‌شود، بدنه اصلی تونل از سازند امیران و گورپی تشکیل شده است. سازند تاربور یک سازند آهکی ریفی است، این نهشته‌ها از آهک‌های خاکستری تیره، متوسط تا ضخیم لایه تشکیل شده است. سازند آواری امیران شامل لای سنگ و ماسه سنگ به رنگ سبز زیتونی تا قهوه‌ای و مقداری آهک، گنگلومرا با قلوه سنگ‌های از چرت است (شرکت توسعه آب و منابع ایران،۱۳۸۹).

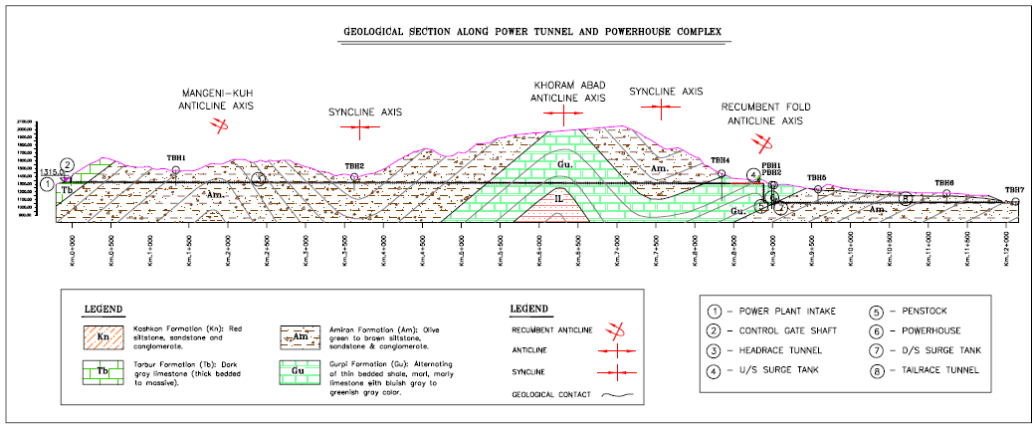
بخش اعظم تونل در سازند امیران قرار می‌گیرد. سازند گورپی نیز شامل مارن و شیل‌های خاکستری مایل به آبی و به صورت فرعی شامل لایه نازکی از آهک‌های ریفی است (شرکت توسعه آب و منابع ایران،۱۳۸۹).

۲. زمین شناسی منطقه:

بررسی‌های زمین‌شناسی سطحی نشان می‌دهد که گسل یا شکستگی عمده‌ای در محدوده تونل و نیروگاه وجود ندارد. شیب لایه بندی در قسمت ورودی تونل در حدود ٤۵ درجه به سمت شمال شرقی است. پس از عبور از تاقدیس برگشته منگنی کوه تا محدوده تاقدیس خرم اباد شیب تندتر می‌شود. تاقدیس خرم آباد یک تاقدیس نامتقارن که شیب عمومی یال شمالی آن حدود ۵۵ درجه و یال جنوبی آن حدود ۷۰ درجه است. در ادامه مسیر تونل به سمت خروجی، تاقدیس کوه کوسه قرار دارد. محور این تاقدیس موازی با تاقدیس خرم آباد است. این تاقدیس نیز از نوع نامتقارن بوده و شیب یال شمالی آن حدود ۵۵ درجه و یال جنوبی آن ۷۵ درجه است (شرکت توسعه آب و منابع ایران،۱۳۸۹).

۳. درزه نگاری منطقه مورد مطالعه:

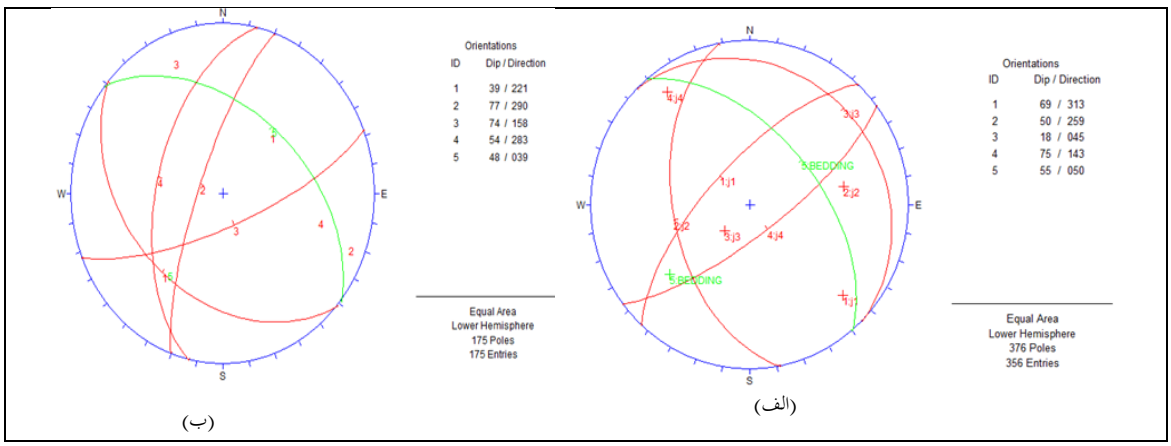
به منظور شناسایی لایه‌های زیرین تعداد ۸ گمانه در مسیر تونل به متراژ ۱۷٤۵ متر حفاری انجام گرفته است که عمق گمانه‌ها بین ۱۰۰ تا ۳۵٤ متر می‌باشد. بر اساس گمانه‌ای حفرشده در مسیر تونل میانگین RQD برای توده سنگ‌های در بر گیرنده مسیر تونل معادل ۷۵ (سازند امیران) تا ۸۰ درصد (سازند گورپی) می‌باشد و شاخص کیفیت توده سنگ خوب می‌باشد.



شکل ۱. پروفایل زمین شناسی مسیر تونل آب بر نیروگاه (شرکت توسعه آب و منابع ایران،۱۳۸۹).

همچنین ناپیوستگی‌های مسیر تونل اعم از درزه‌ها و لایه-بندی‌ها بر اساس برداشت‌های صحرائی به روش آماری مورد تجزیه تحلیل قرار گرفته است. به همین منظور پارامترهای نظیر شیب، جهت شیب، بازشدگی، پرشدگی، فاصله داری، زبری، شرایط زیرزمینی مد نظر قرار گرفته است. در حدود ۱۵۰۰ درزه در محدوده ورودی، بدنه و خروجی تونل برداشت شده است. اغلب درزهایی برداشت شده خشک بوده و از سطوح نسبتا زبری برخوردار است. بازه تغییرات فاصله داری اغلب ناپیوستگی‌ها از ٦ تا ۲۰ سانتیمتر تغییر کرده و تداوم آنها عمدتا کمتر از ۳ متر است. باز شدگی نیز از باز تا نسبتا باز در نوسان است. بیشتر ناپیوستگی‌ها از آغشتگی سطحی برخوردار بوده و در بعضی از موارد با لوم یا کلسیت پر شده است. (شرکت توسعه آب و منابع ایران،۱۳۸۹).

با توجه به وجود تاقدیس منگنی کوه و تاقدیس خرم آباد سمت شیب در دهانه خروجی و ورودی تونل متفاوت است. تصاویر استریونت درزه‌های برداشت شده در سازند امیران (مسیر اصلی تونل) شکل ۲ (الف) و خروجی تونل (سازند گورپی) شکل ۲ (ب) آمده است.



شکل ۲. تصاویر استرونت سازند امیران(الف) و سازند گورپی (ب)

٤. روش‌های تجربی تحلیل پایداری:

از جمله روش‌هایی که امروزه به کار گرفته می‌شوند روش تزراقی، روش طبقه بندی ژئومکانیکی (RMR)، روش Q و روش اندیس مقاومت زمین‌شناسی (GSI) است. که در این مقاله تونل فقط به روش RMR و Q تحلیل پایداری شده است (حسن مدنی، ۱۳۷۳).

٤-١. طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR):

روش RMR برای محاسبه بار وارد بر سیستم نگهداری و پیش‌بینی سیستم نگهداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رده‌بندی RMR ارتفاع ناحیه سست شده، که وزن خود را بر سیستم نگهداری وارد می‌کند با h نشان داده شده و از رابطه هوک و بروان (۲۰۰۲) بدست می آید که در رابطه ۱ بیان شده است (Hoek,2002).

h ارتفاع بار سنگ بر حسب متر، b عرض تونل بر حسب متر است. اگر RMR برابر ۱۰۰ باشد، هیچ‌گونه فشاری بر سیستم نگهداری وارد نمی‌شود. به بیان دیگر، بار موثر بر سیستم نگهداری صفر است (حسن مدنی،۱۳۷۳). جهت طبقه بندی بخش ورودی، مسیر تونل و خروجی از سیستم طبقه بندی اصلاح شده RMR یا CSIR در سال ۱۹۸۹ استفاده گردیده است (Hoek,2001). جدول ۱ میزان RMR بدست آمده در بخش‌های مختلف را نشان می‌دهد. براساس طبقه بندی جدول (۱) توصیه‌های برای سیستم نگهداری مجموعه تونل آب‌بر پیشنهاد شده است، که در جدول شماره ۲ ارائه شده است (وزارت صنایع و معادن،۱۳۸۹)

$$h = \frac{100-RMR}{100} b \qquad (۱)$$

جدول۱. طبقه بندی منطقه مورد مطالعه بر اساس RMR (شرکت توسعه آب و منابع ایران،۱۳۸۹).

پارامتر	ورودی		مسیر تونل		خروجی	
	مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز
مقاومت تراکمی تک محوری	۸۰	۷	۳۳	٤	٤۱	٤
RQD	۸۰	۱۵	۷۵	۱۳	۸۰	۱۵
فاصله ناپیوستگی (متر)	۳	۲۰	۳	۸	۳	۸
شرایط ناپیوستگی	-	۲۵	-	۱۵	-	۱۵
آب زیر زمینی	کاملا خشک	۱۵	کاملا خشک	۱۵	کاملا خشک	۱۵
تعدیل برای جهت یابی درزه	-۵		-۱۰		-۱۰	
RMR	۷۷		٤۵		٤۷	
کلاس	سنگ خوب		متوسط		متوسط	

جدول۲. سیستم نگهداری پیشنهادی برای تونل بر اساس رده بندی RMR (وزارت صنایع و معادن،۱۳۸۹)

کلاس توده سنگ	روش حفاری	سیستم نگهداری توصیه شده
متوسط	حائل تا ۱۰ متری سینه کار نصب شود	۱۰۰-۵۰میلیمتر شاتکریت و شبکه منظم راک بولت به طول ٤ متر با فاصله داری ۲

٤- ۲. شاخص کیفی تونل زنی در سنگ (Q):

جهت رده بندی توده سنگ در بخش ورودی، مسیر تونل و خروجی از سیستم طبقه‌بندی Q نیز استفاده شده است. جدول شماره ۳ میزان بدست آمده از طبقه‌بندی Q در بخش-های مختلف را نشان می‌دهد (رسول اجل لویئان و همکاران،۱۳۸۵). با توجه به طبقه‌بندی Q کیفیت توده سنگ در جدول شماره ۳ در ورودی خوب، مسیر تونل و خروجی در کلاس متوسط قرار می‌گیرد، که با توجه به این رده بندی نیز سیستم نگهداری برای تونل پیشنهاد شده است که در جدول شماره ٤ آمده است (حسن مدنی،۱۳۷۳).

جدول۳. طبقه بندی شاخص کیفی تونل زنی در سنگ در مسیر تونل آب‌بر (وزارت صنایع معادن،۱۳۸۹).

پارامتر	ورودی		مسیر تونل		خروجی	
	مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز
RQD	۸۰	۸۰	۷۵	۷۵	۸۰	۸۰
ضریب مربوط به تعداد درزه‌ها	٤	۱۵	٤	۱۵	٤	۱۵
ضریب مربوط به زبری	زبر و نامنظم	٤	زبر ونامنظم	۳	زبر و نامنظم	۳
ضریب مربوط به دگر سانی درزه‌ها	دیوار کمی دگرگون شده است.	۲	دیواره کمی دگرگون شده است.	۲	دیواره کمی دگرگون شده است.	۲
ضریب مربوط به کاهش آب درزه‌ها	خشک	۱	خشک	۱	خشک	۱
SFR	تنش متوسط	۱	تنش متوسط	۱	تنش متوسط	۱
Q	۱۰/٦		۷/۵		۷/۹	
کلاس	خوب		متوسط		متوسط	

جدول ٤. سیستم نگهداری پیشنهادی برای تونل بر اساس رده بندی Q (حسن مدنی،۱۳۷۳).

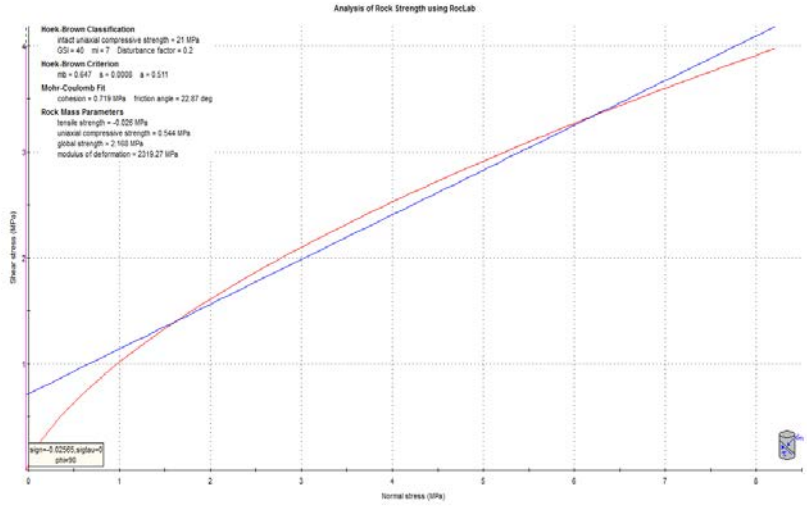
موقعیت	سیستم نگهداری پیشنهادی
ورودی	راک بوالت به طور منظم و گسترده با فاصله ۱/۵ تا ۲ متر یا شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر
مسیر تونل	راک بوالت به طور منظم و گسترده با فاصله ۲ متر و طول ٤ متر و شاتکریت به ضخامت ۵-۱۰ سانتیمتر
خروجی	راک بوالت به طور منظم و گسترده با فاصله ۲ متر و طول ٤ متر و شاتکریت به ضخامت ۵-۱۰ سانتیمتر

٤-۳. برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ ساختگاه:

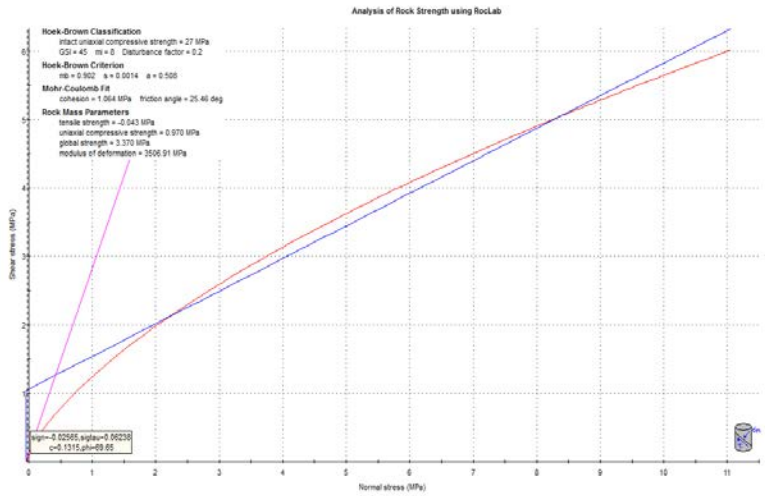
توده سنگ ساختگاه علاوه بر لایه‌بندی، تحت تاثیر ناپیوستگی‌ها قرار دارد که بر اساس برداشت‌های انجام شده ٤ دسته در راستاهای مختلف هستند (شرکت توسعه آب و منابع ایران،۱۳۸۹). با توجه به وجود این درزه‌ها و ناپیوستگی‌های متقاطع، توده سنگ به صورت همگن و ایزوتروپ فرض شده و برای مقاومت این توده سنگ از میعار شکست هوک-براون استفاده شده است.

برای محاسبه پارامترهای مقاومت برشی توده سنگ براساس معیار شکست هوک-براون با داشتن مقاومت تک محوری سنگ بکر، ضریب ثابت mi و شاخص GSI منحنی شکست هوک-براون محاسبه و برآورد شده است. برای محاسبه این پارامترها از نرم افزار Roclab کمک گرفته شده است. در

شکل‌های شماره ۳ و ٤ منحنی معیار شکست هوک-براون برای سازند امیران (مسیر تونل) و سازند گورپی (خروجی تونل) آمده است. نتایج سازند تاربور بسیار نزدیک به سازند امیران است و از آوردن نتایج این سازند در این مقاله صرف نظر شده است. با توجه به اشکال ۳و ٤ و نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، برجا و طبقه بندی مهندسی سنگ پارامترهای ورودی برای معیار هوک-براون در جداول شماره ۵ و ٦ آمده است.



شکل۳. منحنی معیار شکست هوک-بروان سازند امیران (مسیر تونل).



شکل ٤. منحنی معیار شکست هوک-بروان سازند گورپی (خروجی تونل)

جدول۵ . پارامترهای ورودی معیار هوک–براون برای توده سازند های امیران و گورپی.

موقعیت	سازند	مقاومت تک محوری (MPa)	M_i	GSI
مسیر تونل آب‌بر	امیران (مسیر تونل)	۲۱	۷	٤۰
	گورپی (خروجی تونل)	۲۷	۸	٤۵

به صورت کلی معیار شکست هوک–براون برای توده سنگ به صورت رابطه شماره ۲ آمده است که پارامترهای آن پس از محاسبه برای هر سازند در جدول شماره ٦ آورده شده است.

در برآورد این پارامترها از ویرایش ۲۰۰۲ معیار هوک–براون استفاده شده است (Hoek. Et al,2002).

$$\sigma 1 = \sigma 3 + \sigma ci\left(mi + \frac{\sigma 3}{\sigma ci}\right)^{a} \qquad (۲)$$

جدول ٦. پارامترهای معیار شکست هوک–براون برای سازندهای امیران و گورپی.

موقعیت	سازند	M_i	S	A
مسیر تونل	امیران (مسیر تونل)	۰/٦٤۷	۰/۰۰۰۸	۰/۵۲
	گورپی (خروجی تونل)	۰/۹۰۲	۰/۰۰۱٤	۰/۵۱

با توجه به شکستگی و ساختار بلوکی توده سنگ ساختگاه و با مشاهدات نتایج بارگذاری صفحه‌ای و دیلاتومتری، رفتار توده سنگ همگن و همسانگرد فرض شده است.برای برآورد پارامترهای مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ (مدول یانگ) از نتایج آزمایش‌های برجا (بارگذاری صفحه‌ای و دیلاتومتری) و آزمایش‌های آزمایشگاهی استفاده شده است (شرکت توسعه آب و منابع ایران،۱۳۸۹). همچنین برای برآورد خواص تغییر شکل‌پذیری ماده سنگ، از ویرایش ۲۰۰۲ معیار هوک–براون استفاده شده است (Hoek,2002). در جدول شماره ۷ نتایج برآورد پارامترهای تغییر شکل‌پذیری توده سنگ‌های مسیر تونل آب‌بر تنگ معشوره ارائه شده است.

جدول ۷. نتایج پارامترهای تغییر شکل‌پذیری توده سنگ مسیر تونل.

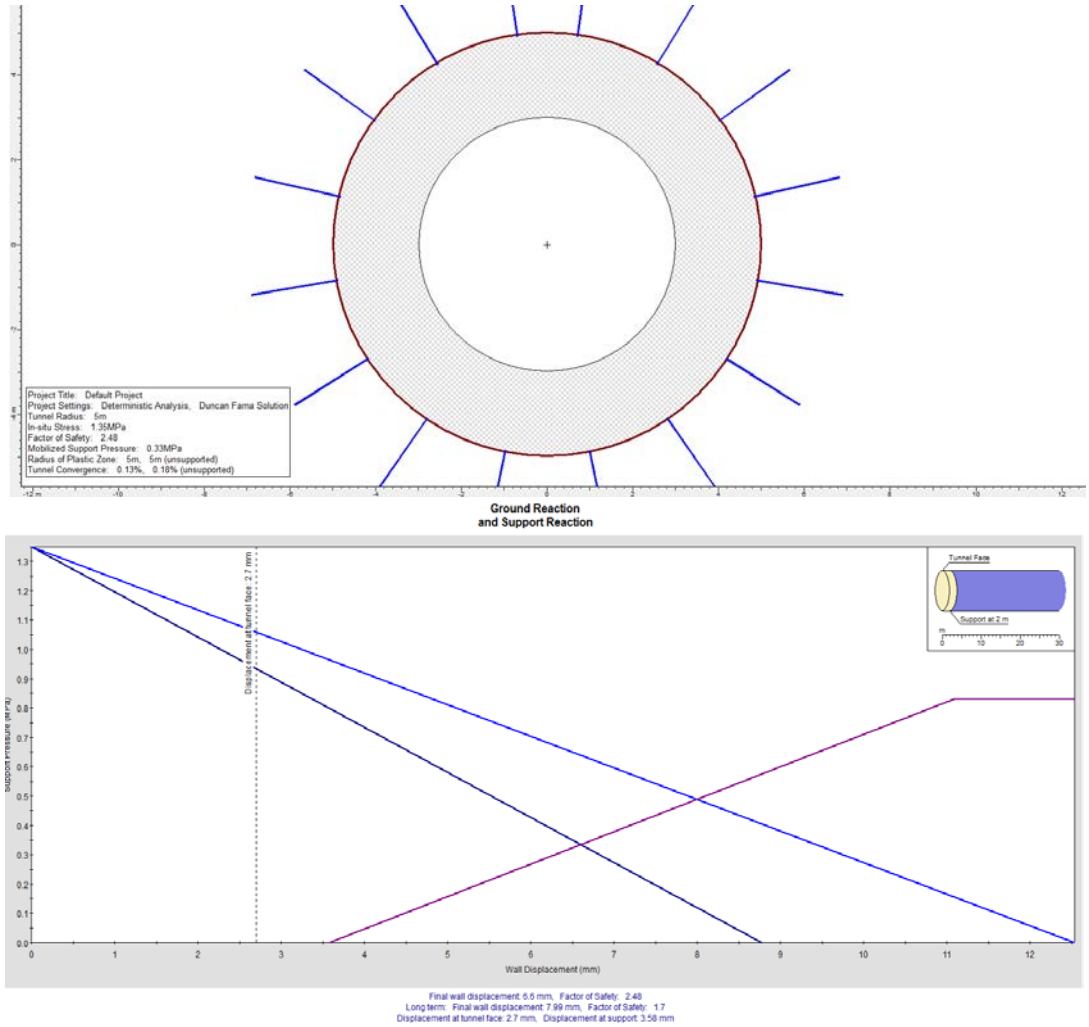
سازند	مدول تغییر شکل‌پذیری(MPa)	نسبت پواسون
امیران (مسیر تونل)	۱۰۰۰	۰/۳
گورپی (دهانه خروجی)	۱۵۰۰	۰/۳

۵. روش تحلیلی توده سنگ ساختگاه

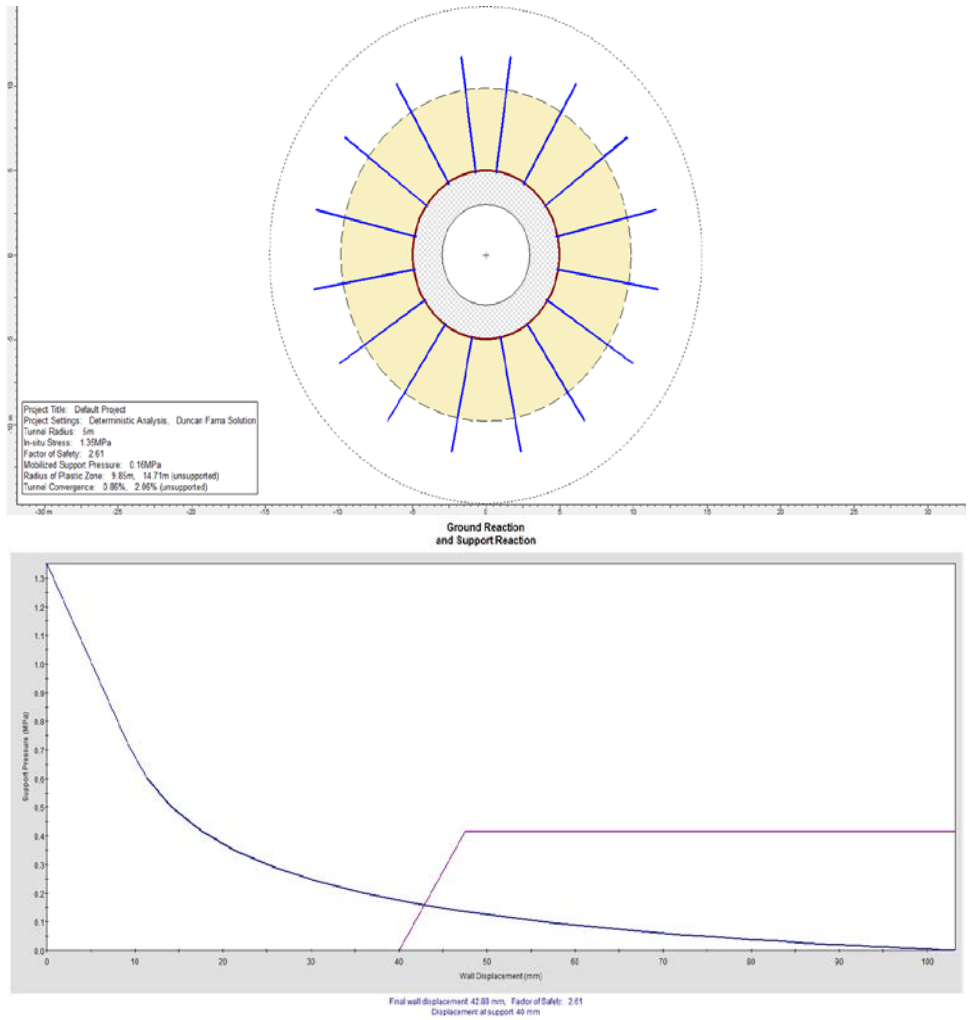
منحنی رفتار توده سنگ اطراف فضای زیرزمینی با استفاده از نرم افزار RocSupport3.0 و روش Duncan Fama ترسیم شده است. مقادیر ورودی شامل پارامترهای مقاومت فشاری توده سنگ و مدول تغییر شکل‌پذیری از جداول ٦ و ۷ ارائه شده است. فرض اولیه در تحلیل، برقراری شرایط هیدرواستاتیک (تنش افقی به قائم $K_0=1$) است (شرکت توسعه آب و منابع ایران،۱۳۸۹). فرض دیگر دایره بودن فضای حفاری است. در تحلیل به این روش از منحنی های رفتار زمین، و سیستم نگهداری، "ضریب اطمینان" مناسب برای مسیر تونل و دهانه خروجی ارائه شده است در شکل شماره ۵ میزان جابجای کل بعد از نصب سیستم نگهدارنده در

مسیر تونل به ۲/۷ میلیمتر و ضریب اطمینان به مقدار ۲/۲۸ می رسد و با توجه به شکل شماره ٦ میزان جابجای کل در دهانه خروجی تونل به ٤۲/۸۸ میلیمتر و ضریب اطمینان نیز به مقدار ۲/٦۱ می رسد.

خلاصه این تحلیل‌های آماری نیز در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۵. منحنی رفتار زمین در مسیر تونل آب بر (سازند امیران).



شکل٦. منحنی رفتار زمین دهانه خروجی تونل آب بر (سازند گورپی).

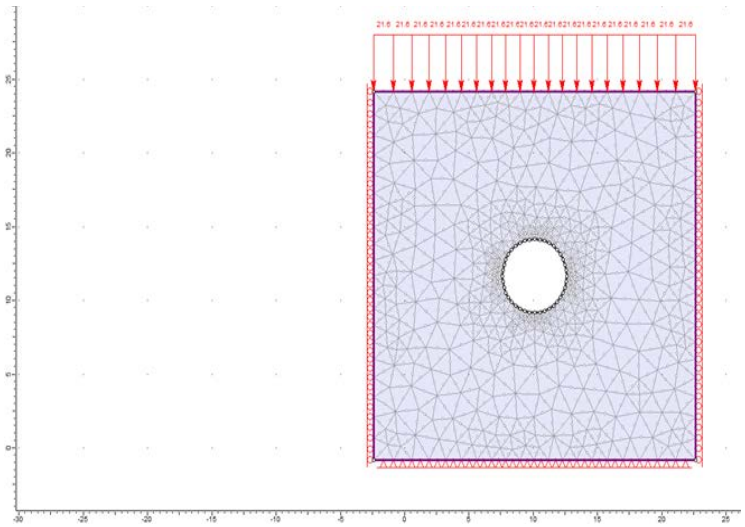
٦. تحلیل عددی ساختگاه با استفاده از نرم افزار phase^2

جهت بررسی میزان پایداری توده سنگ در بر گیرنده تونل و مدلسازی رفتار توده‌های سنگی پس از شکستگی و نیز بر هم کنش سنگ و سیستم نگهداری بهترین روش استفاده از روش‌های عددی کامپیوتری به نظر می‌رسد (رسول اجل لویئان و همکاران،۱۳۸۵). در این راستا نرم افزار phase^2 کمک گرفته شده است که بر پایه اجزای محدود می‌باشد. در این روش توده سنگ مورد مطالعه را به قطعات کوچکتری تقسیم می‌کند که هر کدام به عنوان یک عنصر نامیده می‌شود (رسول اجل لویئان و همکاران،۱۳۸۵). همچنین فرض می-گردد که این عناصر دارای خواص مخصوص به خود بوده و نقاط مشخصی که گره نامیده می‌شود به یکدیگر متصل می-شود که تنها ۲ تا ۳ برابر تعداد گره‌ها درجه آزادی دارند. به طور کلی برای تحلیل و بررسی سازه‌های زیرزمینی محاسبه تنش‌های برجا از ابتدایی‌ترین مراحل می‌باشد. مقدار عددی

تنش عمودی و افقی با توجه به نمودارهای تجربی و پروژه های مشابه برابر و میزان تنش افقی به قائم برابر یک (K=1) در نظر گرفته شده است. این فرض با توجه به شرایط تکتونیکی حاکم بر منطقه زاگرس چندان دور از واقعیت نیست (شرکت توسعه آب و منابع ایران،۱۳۸۹).

۶-۱. مدلسازی توده سنگ در بر گیرنده تونل

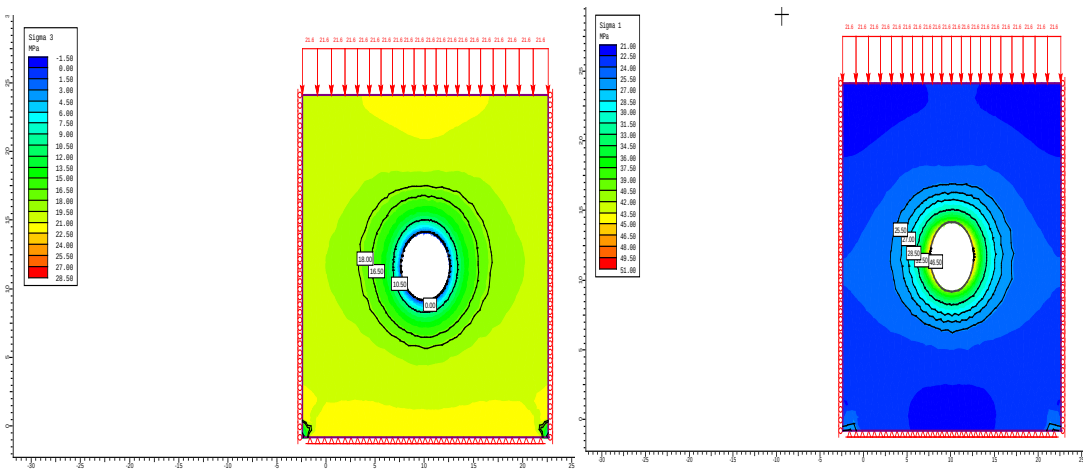
جهت بررسی و مدلسازی تونل نیاز به پارامترهای مقاومتی توده سنگ از قبیل میزان مدول تغییرشکل پذیری، نسبت پواسون، ثابت‌های هوک –بروان و غیره است (رسول اجل لویئان و همکاران،۱۳۸۵). با توجه به اینکه روش حفاری بصورت سنتی و به روش چاله زنی و آتشباری است در نتیجه خواص ژئومکانیکی تحت تاثیر قرار می‌دهد لذا بایستی این تغییرات در حین تحلیل مد نظر قرار بگیرد. اطلاعات لازم برای مدلسازی به روش عددی و با استفاده از معیار هوک-بروان در جداول ۵ تا ۷ آمده است.



شکل ۷. شبکه المان بندی شده در اطراف فضای حفاری شده.

۶-۲. نتایج تحلیل عددی توسط نرم افزار phase²

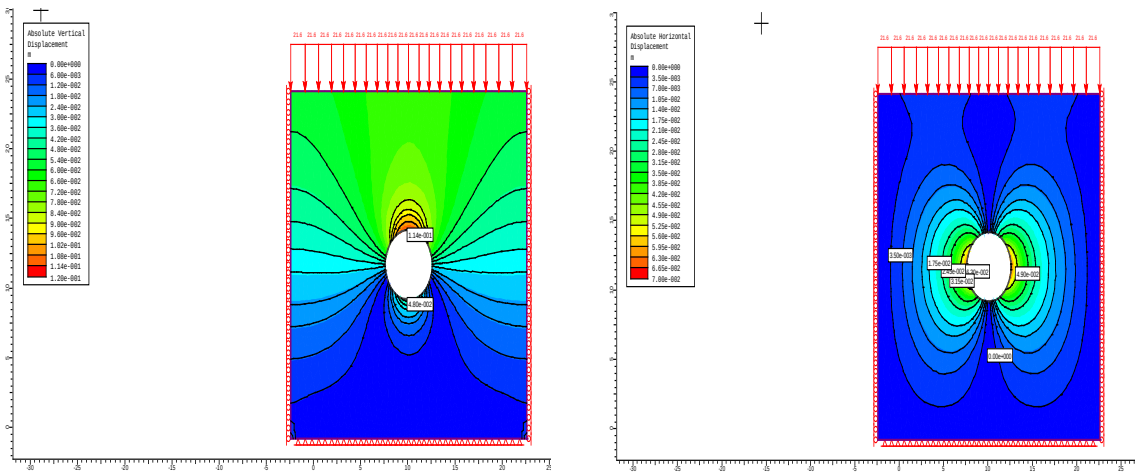
با استفاده از نرم افزار phase² چگونگی توزیع تنش‌های اصلی در نقاط مختلف فضایی حفاری شده در اشکال ۸ تا ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین تمرکز تنش در اطراف تونل می‌باشد. با توجه به دایره‌ای بودن مقطع تونل در اطراف تونل تمرکز تنش در نقاط مختلف یکسان است. این حالت می‌تواند ناشی از تمرکز تنش در این نقاط باشد که یا رها شدن ناگهانی این تنش در این قسمت‌ها باشد. با توجه به شکل ۸ (الف و ب) از داخل تونل به خارج تمرکز تنش زیاد می‌شود یعنی از۴/۶۵ مگاپاسکال تنش حداکثر تا صفر مگاپاسکال تنش حداقل تغییر می‌کند. با توجه به اینکه تنش حداقل در اطراف تونل بسیار پایین بوده لذا خطر تسلیم مصالح وجود دارد. برای جلوگیری از این خطر باید تمهدات ترمیمی اندیشیده شود.



(ب) (الف)

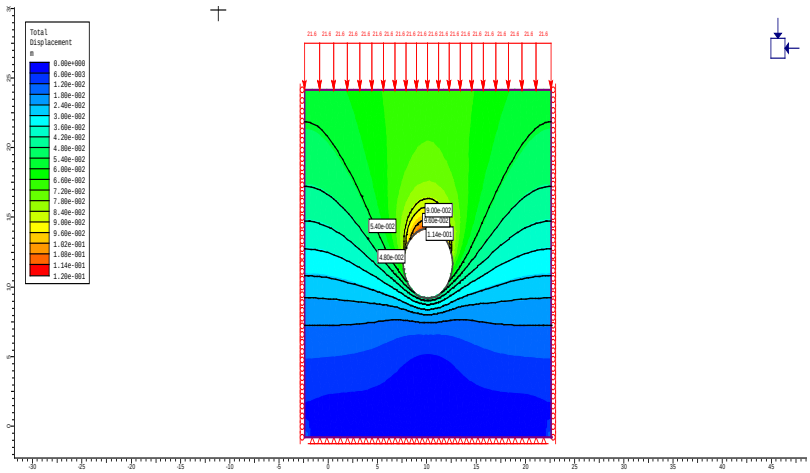
شکل ۸. میزان تنش اصلی حداکثر (الف) و تنش حداقل (ب) در اثر حفاری فضای زیر زمینی بدون سیستم نگهداری

با توجه به تحلیل پایداری تونل و نیاز به نصب سیستم نگهداری برای تونل، با استفاده از مدل سازی شرایط تونل بدون سیستم نگهداری و با سیستم نگهداری مقادیر جابجایی های افقی، عمودی و کل محاسبه شده است. این مقادیر مبنایی برای ارزیابی سیستم نگهداری پیشنهادی است. سیستم نگهداریپیشنهادی شامل شاتکریت با ضخامت ۱۵ سانتیمتر و سیستم راک بولت با طول ٤ متر و فاصله داری ۱/۵ متر می-باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل که در شکل ۹ (الف) نشان داده شده است، در حالت بدون نصب سیستم نگهداری حداکثر جابجایی افقی در دیواره تونل و به مقدار ٦,۳ سانتیمتر بوده است. با توجه به شکل ۹ (ب) جابجایی عمودی نیز ۱۱/٤ سانتیمتر و در شکل ۱۰ جابجایی کل ۱۱/٤ سانتیمتر در سقف تونل می‌باشد. میزان جابجایی کل نیز نشان دهنده لزم نصب نگهداری است. با آنالیز مدل‌های بالا می‌توان این چنین نتیجه گیری کرد که بیشترین ریزش در سقف تونل می‌باشد.

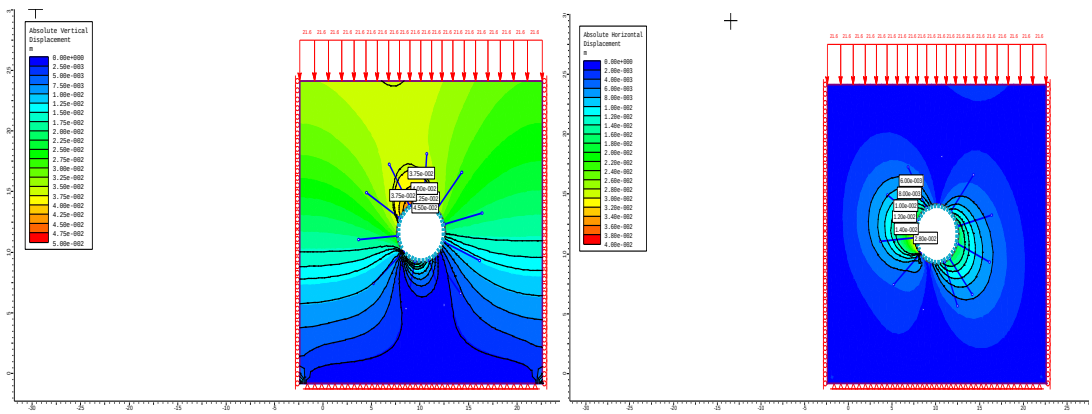


(ب) (الف)

شکل۹. میزان جابجای افقی (الف) و جابجای عمودی (ب) اطراف تونل بدون سیستم نگهداری.

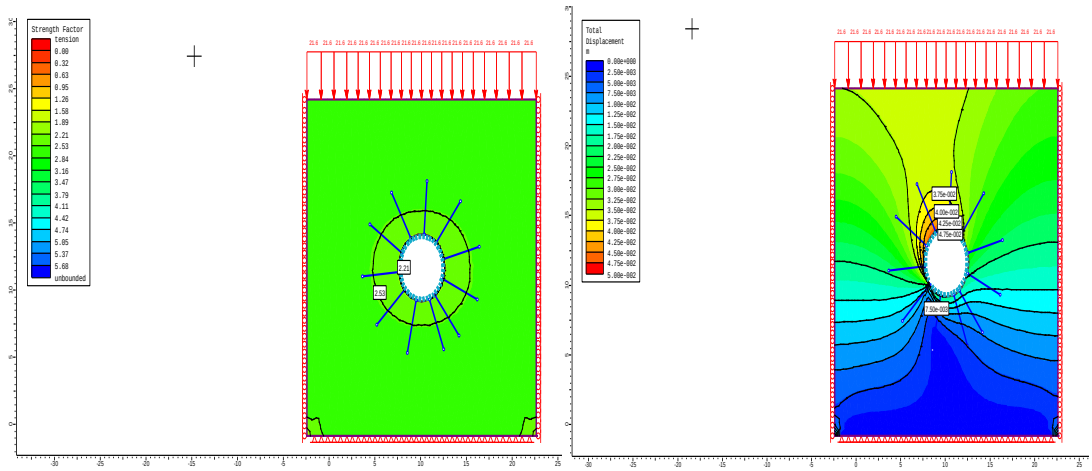


شکل ۱۰. جابجای کل در اطراف تونل بدون سیستم نگهداری.



(ب) (الف)

شکل ۱۱. حداکثر جابجای افقی (الف) و حداکثر جابجای عمودی (ب) بعد از نصب سیستم نگهداری.



(الف) (ب)

شکل ۱۲. جابجایی کل (الف) و ظریب اطمینان (ب) بعد از نصب سیستم نگهداری.

همان طور که ملاحظه می شود تونل بعد از نصب سیستم نگهداری که شامل یک لایه شاتکریت مصلح به ضخامت ۱۵ سانتیمتر و سیستم راک بولت با طول ٤ متر و فاصله داری ۱/۵ متر می‌باشد، باعث شده است که کاهش چشم‌گیری در میزان جابجایی افقی، جابجایی عمودی و جابجایی کل و همچنین افزایش ضریب اطمینان شاهد باشیم.

با توجه به شکل ۱۱ (الف) بانصب سیستم نگهداری میزان جابجایی افقی از٦/۳ سانتیمتر به ۲/۸ سانتیمتر می رسد. همچنین در شکل ۱۱ (ب) جابجایی عمودی نیز از ۱۱/٤ سانتیمتر به ٤/۷ سانتیمتر کاهش پیدا کرده است. در شکل ۱۲ (الف) میزان جابجایی کل نیز از ۱۱/٤سانیتمتر بدون سیستم نگهداری به ٤/۷ سانتیمتر (در سقف تونل) با نصب سیستم نگهداری کاهش یافته است، با توجه به شکل ۱۱ (ب) میزان بالازدگی در کف تونل نیز بعد از نصب سیستم نگهداری به ۷ میلیمتر می‌رسد. با توجه به شکل ۱۲ (ب) مقدار "ضریب اطمینان" (Fs) نیز به مقدار ۲/۲۱ رسیده است که حاکی از پایداری تونل بعد از نصب نگهداری می باشد.

۷. نتیجه‌گیری

تونل آب‌بر سد معشوره در میان سازندهای تاریور، امیران و گورپی حفاری می‌شود. مسیر اصلی تونل در سازند امیران و دهانه‌هایی ورودی و خروجی به ترتیب در سازندهای تاربور و گورپی قرار دارد. در این مقاله از سه روش تجربی، تحلیلی و عددی برای تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری استفاده گردیده است. به کمک نرم افزار Roclab پارامترهایی مورد نیاز برای معیار هوک–بروان برآورد شده است که از این پارامترها در برای تحلیل به روش‌هایی تحلیلی و عددی به روش هوک -براون استفاده شده است.

- با استفاده از دو روش تجربی طبقه بندی RMR وQ توده سنگ ورودی تونل واقع در سازند تاربور در رده خوب و توده سنگ مسیر و خروجی تونل واقع در سازندهای امیران و گورپی در رده متوسط قرار گرفته است. سیستم نگهداری پیشنهادی با استفاده از دو روش تجربی برای توده سنگ مسیر تونل شامل شاتکریت به ضخامت ۵ تا ۱۰ سانتیمتر و سیستم منظم راک بولت به فاصله داری ۲ و طول ٤ متر را پیشنهاد می‌دهند.
- نتایج حاصل از روش تحلیلی، استفاده از سیستم نگهداری راک بولت با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۵ سانتیمتر را پیشنهاد می دهد.
- تحلیل عددی مسیر تونل حفاری شده بدون نگهداری جابجایی افقی ٦/۳ سانتیمتر، عمودی ۱۱/٤ سانتیمتر و جابجایی کل ۱۱/٤ سانتیمتر می‌باشد.
- تمرکز تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل در اطراف تونل به ترتیب ٤/٦ مگاپاسکال و صفر مگاپاسکال می‌باشد. با توجه به اینکه تنش حداقل در اطراف تول صفر است لذا خطر تسلیم مصالح وجود دارد.
- با توجه به لزوم نصب نگهداری برای تونل، نگهداری که شامل شاتکریت با ضخامت ۱۵ سانتیمتر و سیستم راک بولت با طول ٤ متر و فاصله داری ۱/۵ متر در نظر گرفته شد.
- میزان جابجایی کل، افقی و عمودی بعد از نصب سیستم نگهداری به ترتیب٤/۷، ۲/۸ و ٤/۷ سانتیمتر کاهش پیدا کرده است و همچنین میزان فاکتور (Fs) به مقدار ۲/۲۱ رسیده است که دلیل بر پایداری تونل بعد از نصب نگهداری می‌باشد.
- نتایج سیستم نگهداری پیشنهادی تونل حاصل از سه روش تجربی، تحلیلی و عددی تقریبا مشابه بوده است.

منابع

شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، طرح سد مخزنی تنگ معشوره، گزارش مطالعات مکانیک سنگ سد تنگ معشوره، ۱۳۸۹، انتشارات وزارت نیرو.

مدنی، حسن،۱۳۷۳،تونلسازی، جلد سوم ،تحلیل پایداری، انتشارات دانشگاه امیر کبیر.

اجل لوئیان، رسول، رسول دادخواه، محمود هاشمی، ۱۳۸۵، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل انحراف سد خرسان۳، مجله علوم دانشگاه تهران.

وزارت صنایع و معادن، ۱۳۸۹، دستورالعمل طراحی و اجرای سیستم نگهداری تونلهای مدنی، انتشارات سازمان مهندسی معدن نشریه شماره ۵۳۷.

Hoek, E. 2002. A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion.

Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. Proceedings of NARMS-Tac, 1: 267-273.

Hoek, E., & Brown, E. T. 1980. Underground excavations in rock (No. Monograph).

Hoek, E., & Diederichs, M. S. 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(2): 203-215.

Hoek, E. 2001. Big tunnels in bad rock. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(9): 726-740.

Deere, D. U., Peck, R. B., Monsees, J. E., Schmidt, B. 1969. Design of tunnel liners and support systems (No. Final Rpt).

Hoek, E., & Diederichs, M. S. 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(2): 203-215.

FAMA, M. E. D. 1995. Numerical modeling of yield zones in weak rock. In Analysis and design methods (pp. 49-75).

Lecture, T. T. R. (1983). Strength of jointed rock masses. Gotechnique, 33(3): 187-223.