فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی و محیط زیست
سال چهارم ، شماره ۱۱ ، تابستان ۱۳۸۹

ارائه روشی نوین در تحلیل پایداری تونل با معرفی نمودار جدیدی برای منحنی اندرکنش زمین؛ مطالعه موردی: تونل انحراف آب سد گرین

سید مرتضی حسینی[۱]، کاوه آهنگری[۲]، کامران گشتاسبی[۳]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- عضو هیئت علمی گروه معدن دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

۳- عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

چکیده

مهمترین مسأله در طراحی و اجراء یک پروژه تونلسازی، انتخاب مناسب الگوی حفاری و سیستم نگهداری، به‌منظور پایداری توده‌سنگ و کاهش گسترش ناحیه پلاستیسیته می‌باشد. در این میان، تعیین مقدار جابجایی قبل از نصب سیستم نگهداری از اهمیت فراوانی برخوردار است. وقتی که تونلی حفر می‌شود تا قبل از اینکه سیستم نگهداری نصب شود، قطعاً یک جابجایی در دیواره تونل رخ خواهد داد که میزان این جابجایی حدود ۴۵- ۳۵ درصد جابجایی نهایی تونل می‌باشد. تعیین این جابجایی با استفاده از؛ الف) مقادیر مشاهده‌ای با حضور در محل ساخت تونل، ب) به‌روش عددی و با کمک نرم‌افزارهای المان محدود سه‌بعدی و یا مدلسازی متقارن المان محدود، ج) با استفاده از روابط تجربی و نمودارهای ارائه شده توسط پنت و ولاکوپولوس- دایدریکس امکان‌پذیر می‌باشد. در این مقاله روش همگرایی- همجواری به‌منظور رسم منحنی‌های مشخصه زمین بکار گرفته شده تا ترخیص تنش اعمالی به مدل، معادل با همگرایی به‌وجود آمده تا لحظه استقرار پوشش مورد محاسبه گردد. این تحقیق ارائه‌دهنده نموداری جدید از منحنی اندرکنش زمین می‌باشد که برخلاف نمودارهای متداول در محور قائم آن از روند کاهشی مدول تغییر شکل استفاده شده است. در انتها نیز ضریب ایمنی سیستم نگهداری پیشنهادی با سه روش متفاوت محاسبه شده است

کلمات کلیدی: سد گرین، تونل انحراف، تحلیل عددی، نمودارهای GRC و SCC، نرم‌افزار Phase[۲] 7.0 و FLAC HOO 4.00

مقدمه

از جمله مسائل مهم در طراحی و اجرای تونل‌ها در زمین‌هایی با مشخصات ژئومکانیکی ضعیف، تنش‌زدایی و جلوگیری از گسترش بیش از حد ناحیه پلاستیک در بخش فوقانی فضای حفاری شده می‌باشد که ممکن است موجب ریزش شده و قسمت حفر شده را پر کند. از آنجایی که گسترش ناحیه پلاستیک علاوه

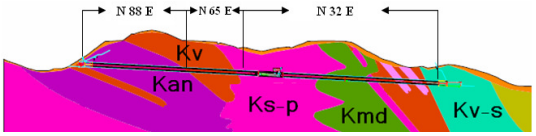
بر خصوصیات ژئومکانیکی به شکل و نحوه اجرای حفاری تونل نیز بستگی دارد، بنابراین انتخاب مناسب شکل مقطع و نحوه اجرا حفاری می‌تواند نقش بسزایی در کاهش این پدیده در زمان حفاری داشته باشد. مسأله مهم دیگر، تخمین طراحی نگهداری مورد نیاز برای پایدارسازی تونل است [۴].

شکل ۱- موقعیت محل احداث سد گرین [۳]

در این تحقیق منحنی‌های اندرکنش زمین (Ground Reaction Curve) با استفاده از دو روش ترسیم می‌شوند. روش اول، روشی به‌نام روند کاهشی فشار داخلی است و منحنی مشخصه زمین با استفاده از نرم‌افزار FLAC رسم می‌شود و روش دوم، روشی جدید به‌نام روند کاهشی مدول تغییر شکل (Modulus Reduction Method) می‌باشد که منحنی مشخصه زمین با کمک نرم‌افزار Phase[2] رسم می‌شود و مقدار جابجایی قبل از نصب نگهداری از روی نمودارهای پنت (Panet) و ولاکوپولوس- دایدریکس (Vlachopoulos-Diederichs) تعیین می‌گردند و اعمال ترخیص تنش معادل با همگرایی ایجاد شده تا قبل از استقرار پوشش در مدل عددی، می‌تواند مسأله بعد سوم که همان تأثیر گام پیشروی و فاصله جبهه کار از پوشش اولیه است را در مسائل دو بعدی حل کند. در این تحقیق سعی شده یک کار مقایسه‌ای با استفاده از دو نرم‌افزار Phase[2] و FLAC صورت گیرد.

مشخصات زمین‌شناسی و ژئومکانیکی ساختگاه

ساختگاه سد گرین در استان همدان، در حدود ۱۶ کیلومتری جنوب شهرستان نهاوند قرار دارد. دسترسی به ساختگاه سد، با طی حدود ۹ کیلومتر مسیر نهاوند به سمت بروجرد، تغییر مسیر به سمت نورآباد درمحل سه‌راهی قلعه قباد و طی حدود ۷ کیلومتر در جاده نهاوند- نورآباد امکانپذیر می‌باشد (شکل ۱) [۲]. به منظور انحراف دبی پایه و نیز سیلاب‌های رودخانه گاماسیاب از محدوده پی سد در طول دوره ساختمان سد هدایت جریان آب از بالا دست به سمت پایین دست توسط تونل انحراف صورت خواهد گرفت. جریان آب به‌وسیله یک کانال ذوزنقه ای با رقوم کف ۱۷۹۰ متر از سطح دریا به داخل دهانه ورودی تونل هدایت خواهد شد. مقطع تونل انحراف به‌شکل نعل اسبی با قطر ۶ و ارتفاع ۵/۵ متر و کف صاف در نظر گرفته شده است. طول تونل ۴۹۰ متر و به‌همراه کانال‌های ورودی و خروجی تونل تقریبا برابر ۵۵۰ متر خواهد بود. میزان روباره بر سقف تونل حدود ۴۰- ۳۵ متر برآورد می‌گردد. جریان خروجی از تونل توسط یک کانال افقی با مقطع ذوزنقه‌ای شکل به سمت پایین دست هدایت می شود. با توجه به قرارگیری تونل انحراف در تکیه‌گاه راست، وضعیت عمومی زمین‌شناسی محل آن از شرایط زمین‌شناسی این تکیه‌گاه تبعیت می‌نماید؛ یعنی تونل به‌ترتیب از واحدهای آندزیت (Kan) (شامل پیروکسن آندزیت)، آذرآواری (Kv) (شامل مجموعه‌ای از توف‌های دارای بلور، توف لیتیک و آگلومرا)، اسلیت- فیلیت (KS-p) (شامل لایه‌های اسلیتی خرد شده و درز و ترک‌دار و لایه‌های فیلیتی خردشده و پولک مانند)، متادیاباز (Kmd) و آذرآواری- رسوبی (Kv-s) (شامل سنگ‌های توف و آگلومرا با میان لایه‌های شیلی (شبیه شیل آرژیلیکی) عبور می‌کند (شکل۲) [۳].



شکل ۲- مقطع طولی مسیر تونل انحراف آب سد گرین [۳]

بر اساس تحلیل‌های تجربی و عددی صورت‌گرفته، تونل در واحدهای آندزیت، آذرآواری و متادیاباز پایدار می‌باشد و عمده ناپایداری تونل در واحد اسلیت- فیلیت می‌باشد که در ادامه تحلیل پایداری این واحد ارائه خواهد شد[۱]. مشخصات ژئومکانیکی واحد اسلیت- فیلیت مطابق جدول ۱ می‌باشد.

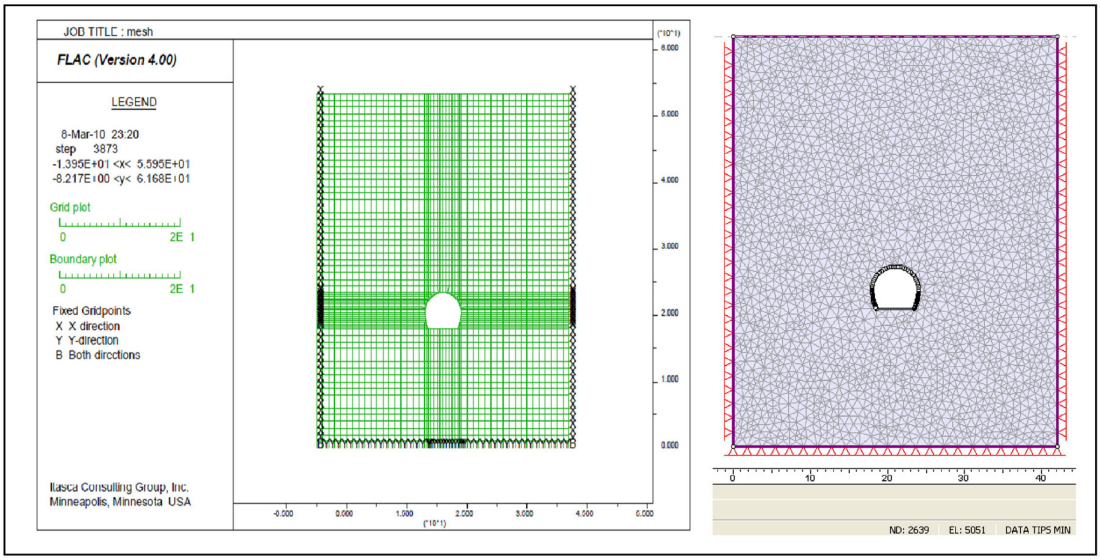
جدول ۱- مشخصات ژئومکانیکی واحد اسلیت- فیلیت [۱]

ν	E (GPa)	σ_t (MPa)	ϕ (درجه)	c (MPa)	γ (MN/m³)	γ (gr/cm³)
۰٫۳	۰٫۱۲	۰٫۰۰۱۲	۲۸	۰٫۰۴۵	۰٫۰۲۳	۲٫۳

روش تحقیق

مدلسازی تونل انحراف آب سد گرین

به‌منظور مدلسازی تونل در واحد اسلیت- فیلیت و تعیین وضعیت جابجایی‌ها و همچنین تعیین ضخامت ناحیه پلاستیک از دو نرم‌افزار Phase^2 و FLAC استفاده شد. مراحل مختلف مدلسازی در دو نرم‌افزار تقریباً شبیه هم می‌باشد که به‌ترتیب شامل؛ ترسیم هندسه تونل، انتخاب محدوده مناسبی از توده‌سنگ اطراف تونل (بر اساس روابط کرش (Kirsch)، ۶ برابرشعاع تونل)، مش‌بندی مدل (نوع مش‌ها تدریجی (Graded)، نوع المان‌ها شش گره‌ای مثلثی و تعداد گره‌ها در سطح منطقه حفاری، ۷۵ گره)، انتخاب مدل رفتاری و پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ، حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از حفاری، حفاری بخش‌های مختلف تونل و



شکل ۳- نمایی از مش‌بندی و تکیه‌گاه‌ها در نرم افزارهای Phase^2 و FLAC در شرایط مشابه

نصب سیستم نگهداری و تحلیل پایداری آن می‌باشد. معیار استفاده شده در این تحلیل، معیار شکست موهر- کولمب است و به دلیل خردشدگی این واحد در نمونه مغزه‌های گرفته شده در صحرا و همچنین با اعمال تنش در نمونه‌های سالم آزمایشگاهی، رفتار مصالح پلاستیک مشاهده گردید و در نهایت جهت تحلیل عددی نوع مواد پلاستیک در نظر گرفته شد. (شکل۳) [۱ و ۲].

پس از مدلسازی و حل مدل در نرم‌افزارها، مقادیر جابجایی و المان‌های تسلیم شده (Yielded Elements) قرائت می‌شود. المان‌های تسلیم شده به کاربر این اجازه را می‌دهد که درجه تسلیم‌پذیری توده‌سنگ‌های اطراف تونل را مشاهده نماید. به‌طور مثال، تعداد المان‌های اطراف تونل در شکل ۳ برابر ۵۰۵۱ می‌باشد که از این تعداد ۱۰۱۲ المان در وضعیت تسلیم‌پذیری قرار دارند.

بحث

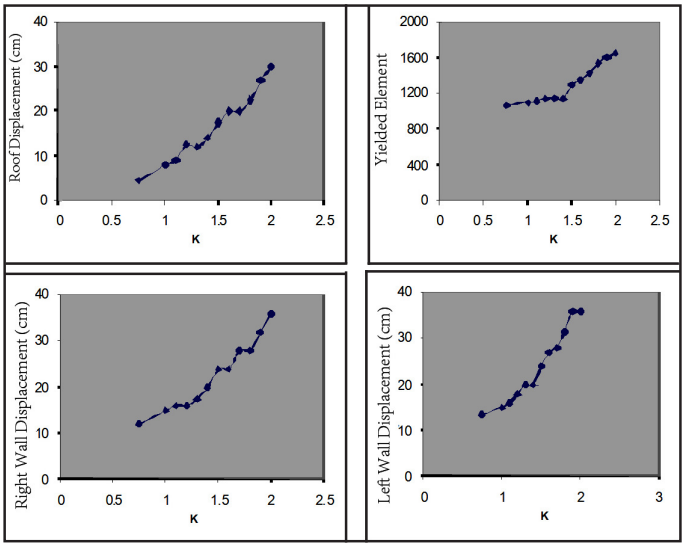
تعیین نسبت تنش‌های برجا منطقه به‌منظور تخمین مقدار نسبت تنش‌های برجا (K) با استفاده از آنالیز حساسیت از مقادیر جابجایی در واحد اسلیت- فیلیت استفاده می‌شود. مقادیر جابجایی‌ها در سقف، کف و دیواره‌های تونل به‌ازای مقادیر مختلف K در نرم‌افزار اکسل رسم می‌شود. همچنین از مقادیر تعداد المان‌های تسلیم‌پذیر در نرم‌افزار Phase^2 برای محاسبه K استفاده گردید. این نمودارها در شکل ۴ ارائه شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود روند نزولی و صعودی جابجایی‌ها و المان‌های تسلیم‌پذیر و در بخشی از خطوط رسم شده به ازای یک نسبت تنش (K) خاص تغییر می‌کند. این مقادیر در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر مختلف نسبت تنش‌های برجا (K)

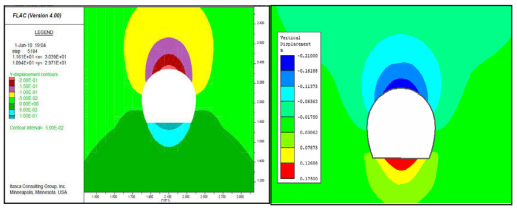
به Kمقدار ازای جابجایی در سقف	به Kمقدار ازای المان‌های تسلیم‌پذیر	به Kمقدار ازای جابجایی در دیواره راست	به Kمقدار ازای جابجایی در دیواره چپ
۱٫۳	۱٫۴	۱٫۶	۱٫۴

با بهره‌گیری از نتایج حاصل از روابط تجربی [۱] و



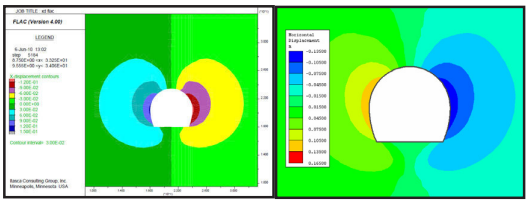
شکل ۴- مقادیر جابجایی و تعداد المان‌های تسلیم‌پذیر نسبت به مقادیر مختلف K

مقادیر جدول ۲ (میانگین‌گیری از مقادیر نسبت تنش‌ها) و همچنین با توجه به عملکرد معکوس گسل‌های اطراف تونل، مقدار ۱/۴ به‌عنوان نسبت تنش‌های برجای منطقه در نظر گرفته می‌شود. شکل‌های ۵ و ۶ وضعیت جابجایی‌های افقی و قائم را در اطراف تونل نشان می‌دهد.



(ب) (الف)

شکل ۵- توزیع جابجایی‌های قائم اطراف تونل واقع در واحد اسلیت-فیلیت، نرم‌افزارهای الف) Phase^2 و ب) FLAC



(ب) (الف)

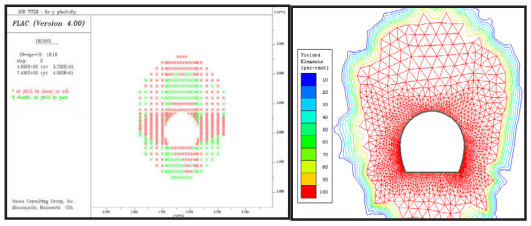
شکل ۶- توزیع جابجایی‌های افقی اطراف تونل واقع در واحد اسلیت- فیلیت، نرم‌افزارهای الف) Phase^2 و ب) FLAC

مقادیر جابجایی‌های قائم و افقی در قسمت‌های مختلف تونل واقع در واحد اسلیت- فیلیت که با استفاده از دو نرم‌افزار FLAC و Phase^2 حاصل گردیده، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر جابجایی در واحد اسلیت- فیلیت

مقادیر جابجایی (m)	نرم‌افزار FLAC	نرم‌افزار Phase^2
در سقف	۰٫۱۹۱۷	۰٫۱۹۶۷
در دیواره	۰٫۱۲۵	۰٫۱۲۸

در شکل ۷ ضخامت ناحیه گسیخته شده در اطراف تونل واقع در واحد اسلیت- فیلیت نمایش داده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۷- ضخامت ناحیه پلاستیک در واحد اسلیت- فیلیت، نرم‌افزارهای الف) Phase۲ و ب) FLAC

مقادیر ضخامت ناحیه پلاستیک در واحد اسلیت- فیلیت در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- شعاع ناحیه پلاستیک در واحد اسلیت- فیلیت

شعاع ناحیه پلاستیک (m)	نرم‌افزار FLAC	نرم‌افزار Phase^2
در بالای تونل	۱۲٫۲۴	۱۲٫۴۷۵
در دیواره‌های تونل	۸٫۰۲۱۳	۸٫۲۲۱

تحلیل پایداری تونل در واحد اسلیت- فیلیت

پس از تعیین مقادیر جابجایی و ضخامت ناحیه پلاستیک تونل انحراف آب سد گرین در واحد اسلیت- فیلیت، وضعیت پایداری تونل با استفاده از ترازهای هشدار خطر در اطراف تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش، برای بررسی پایداری سازه، مقدار تراز هشدار خطر تعیین و با مقادیر بدست آمده از نرم‌افزارهای عددی مقایسه می‌گردد. اگر مقدار تعیین شده، از سطح هشدار خطر کمتر باشد، سازه پایدار است. استفاده از کرنش بحرانی (مجاز) یکی از روش‌هایی است که با آن جابجایی اندازه‌گیری شده در تونل‌ها مثل نشست تاج و همگرایی را می‌توان بررسی کرد. کرنش بحرانی همواره از کرنش گسیختگی کمتر است. کرنش بحرانی با استفاده از معادله ۱ تعیین می‌شود[۱ و ۸].

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \qquad (۱)$$

در این رابطه؛ σ_c: مقاومت فشاری تک‌محوره توده‌سنگ (MPa)، E: مدول یانگ (MPa) و ε_c: کرنش بحرانی ساکورایی(Sakurai) با ارتباط دادن نتایج آزمایشگاهی و

داده‌های صحرایی، رابطه بین کرنش بحرانی و مقاومت فشاری و مدول یانگ را بدست آورد و سه تراز هشدار خطر به‌صورت زیر ارائه داد:

(۲) تراز هشدار خطر I $\log\varepsilon_c = -0.25\log E - 0.85$

(۳) تراز هشدار خطر II $\log\varepsilon_c = -0.25\log E - 1.22$

(۴) تراز هشدار خطر III $\log\varepsilon_c = -0.25\log E - 1.59$

در این رابطه؛ E: مدول تغییر شکل توده‌سنگ (Kg/cm^2)

ساکورایی تراز هشدار خطر II را به عنوان مبنای طراحی تونل‌ها پیشنهاد کرده است و ترازهای هشدار خطر I و III به‌عنوان دو حد بالایی و پایینی برای پایداری تونل‌ها بر اساس کرنش مجاز می‌باشند. به‌عبارتی دیگر تراز هشدار خطر I پایداری بلندمدت را نشان‌داده و در این شرایط تونل مشکل ناپایداری ندارد. تراز هشدار خطر III پایداری کوتاه مدت را نشان می‌دهد. با تعیین کرنش بحرانی و با استفاده از رابطه ۵ جابجایی مجاز مشخص می‌گردد[۵]:

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{a} \qquad (۵)$$

در این رابطه؛ a: شعاع تونل (cm)، u_c: جابجایی مجاز در دیواره یا سقف (cm)با احتساب شعاع ۳ متر برای تونل، مقادیر جابجایی‌های مجازی که براساس تراز هشدار خطر محاسبه گردید، در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- جابجایی‌های مجاز براساس ترازهای هشدار خطر I و II و III بر حسب سانتیمتر

اتراز خطر	IIتراز خطر	IIIتراز خطر
۷٫۱۶	۳	۱٫۳

مقایسه مقادیر جابجایی که از مدلسازی عددی بدست آمده (جدول ۳) با جابجایی‌های مجاز (جدول ۵)، نشان‌دهنده ناپایداری شدید تونل در واحد اسلیت-فیلیت می‌باشد.

ترسیم منحنی اندرکنش زمین

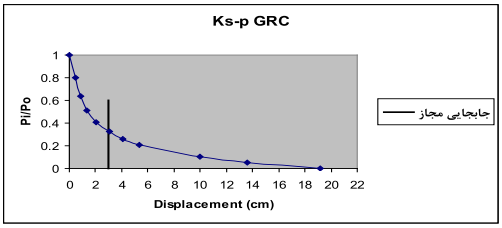
قبل از حفر تونل، زمین تحت فشار ناشی از تنش‌های طبیعی (P_o) قرار دارد و پس از حفر تونل فشار داخلی (P_i) به تونل اعمال می‌گردد، هرگونه حفاری این وضعیت تنش را به‌هم می‌زند و باعث جابجایی‌هایی در زمین می‌گردد. فشار داخلی را از مقداری برابر تنش‌های برجا که به صورت تنش افقی و قائم به مدل اعمال شده، در نظر می‌گیرند و پله پله تا مقادیر نزدیک به صفر کم می‌کنند. جابجایی نقطه‌ای روی تاج تونل یا دیواره را در نظر گرفته و تغییرات آنرا تحت تغییرات فشار داخلی ثبت می‌کنند. برای تشریح بهتر این مسئله، یک تونل دایره‌ای حفرشده در محیطی همگن، همسان‌گرد و تحت تنش‌های هیدروستاتیک ($\sigma_h = \sigma_v$) که قرار است با یک پوشش بتنی نگهداری شود، مفروض است. برای تبدیل مسئله به حالت دوبعدی، فرض می‌شود که تونل در زمان کوتاه و در طولی نامحدود حفر شده و همچنین قسمت تخلیه شده با یک فشار داخلی اعمالی به دیواره تونل جایگزین شود. اگر مقدار این فشار (P_i) با تنش طبیعی زمین (P_o) که پیش از حفر تونل وجود داشته، برابر باشد، هیچگونه همگرایی به‌وجود نخواهد آمد. اما با کاهش فشار داخلی (P_i) زمین دربرگیرنده، تونل تحت جابجایی قرار گرفته و دیواره تونل به‌سمت داخل حرکت می‌کند که به آن همگرایی گفته می‌شود. این میزان کاهش فشار، ترخیص تنش (Stress Relaxation) نامیده می‌شود. به‌جای استفاده از متغیر P_i می‌توان از نسبت P_i/P_o تحت عنوان ضریب محصوریت و یا از متغیر λ موسوم به ضریب آزادی استفاده نمود که مقدار آن در حالت اولیه (قبل از حفر تونل) صفر است و با حفاری در صورتی‌که تونل بدون حائل‌بندی باشد تا یک افزایش می یابد و با رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$\lambda = 1 - (P_i/P_o) \qquad (۶)$$

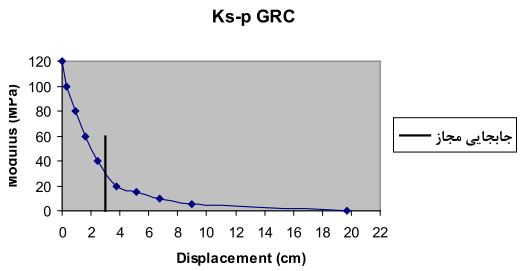
در این تحقیق، فرآیند ترخیص تنش طی ۱۲ مرحله انجام می‌گیرد که در هر مرحله ۲۰درصد تنش‌ها نسبت

به مرحله قبل آزاد شده و در آخر کل نیروها (۱۰۰درصد تنش‌ها) آزادسازی می‌گردد و منحنی اندرکنش زمین که منحنی P_i/P_o نسبت به تغییر مکان قائم تاج تونل (یا در بعضی مواقع دیواره تونل) می‌باشد، بدست می‌آید. منحنی اندرکنش زمین (GRC) که بدین طریق حاصل می‌گردد، برای کل مقطع تونل بوده و درصورت حفاری چند مرحله‌ای لازم است برای هر مرحله محاسبات تکرار شود و منحنی مربوطه به‌دست آید [۴]. این روند با کاهش چند مرحله‌ای مدول تغییر شکل به‌عنوان یک پارامتر مقاومتی به‌جای P_i، در طی مدلسازی نیز انجام می‌گیرد (به‌طور مثال در هر مرحله ۲۰ درصد کاهش یابد).

هریک از این نرم‌افزارهای FLAC و Phase^2 به‌سهولت و با انجام عملیاتی بیشتر در طی مراحل مدلسازی قابلیت ترسیم منحنی اندرکنش زمین را دارند. در ترسیم منحنی‌های اندرکنش مرسوم است که محور y روند کاهشی فشار داخلی (Pi) و یا نسبت P_i/P_o باشد. ولی با استفاده از نرم‌افزار Phase^2، شکل جدیدی از منحنی اندرکنش زمین قابل ترسیم است که در آن محور x نشانگر جابجایی و محور y روند کاهشی مدول تغییر شکل را نشان می‌دهد. نقطه صفر بر روی محور y نشان‌دهنده حفر کامل تونل می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از دو نرم‌افزار مورد اشاره، منحنی‌های اندرکنش به طریقی که گفته شد، ترسیم می‌گردد. منحنی‌های اندرکنش ترسیم شده در واحد اسلیت- فیلیت، مطابق شکل ۸ و ۹ می‌باشند.



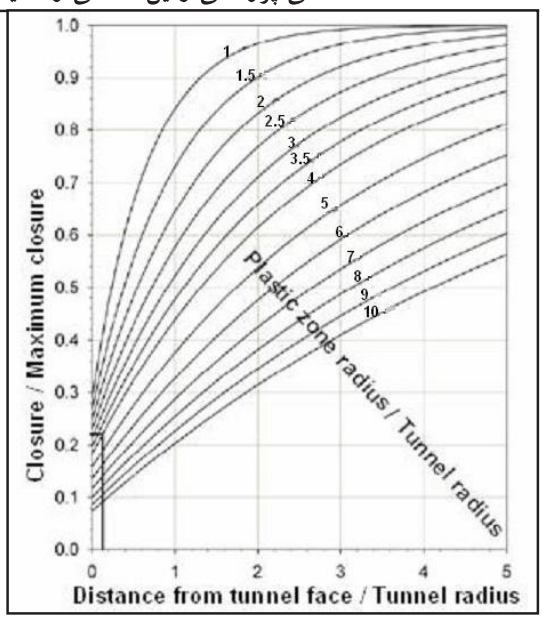
شکل ۸- منحنی اندرکنش زمین در واحد اسلیت- فیلیت، رسم شده توسط نرم‌افزار FLAC



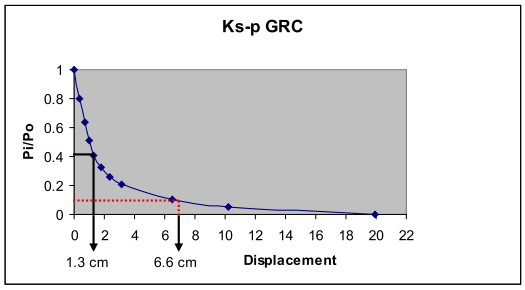
شکل ۹- منحنی اندرکنش زمین در واحد اسلیت- فیلیت، رسم شده توسط نرم‌افزار Phase^2

تعیین مقدار جابجایی قبل از نصب نگهداری

در این طرح، میزان گام پیشروی و فاصله جبهه‌کار از پوشش با استفاده از نرم‌افزار تعادل حدی TUNREN [۱] و سیستم طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ (RMR) به‌ترتیب برابر ۱ و ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. در تعیین نقطه جابجایی قبل از نصب سیستم نگهداری از نمودارهای پنت و ولاکوپولوس- دایدریکس استفاده می‌شود (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). جهت استفاده از این نمودارها، بایستی مقادیر شعاع تونل، فاصله جبهه‌کار از پوشش، شعاع ناحیه پلاستیک در سقف تونل و حداکثر جابجایی در سقف تونل مشخص باشد تا بتوان مقدار جابجایی قبل از نصب سیستم نگهداری را تعیین نمود. مقدار جابجایی قبل از نصب سیستم نگهداری در نمودار پنت با نماد u_r و در نمودار ولاکوپولوس- دایدریکس با عبارت Closure نشان داده شده است. براساس مدلسازی صورت‌گرفته با نرم‌افزارها و مشخصات هندسی تونل قطر تونل ۶ متر، فاصله جبهه‌کار از پوشش ۰/۵ متر، شعاع ناحیه پلاستیک در سقف تونل ۱۲/۴۷۵ متر (جدول ۴) و حداکثر جابجایی در سقف تونل با استفاده از نرم‌افزار FLAC برابر ۱۹/۱۷ سانتیمتر و با نرم‌افزار Phase^2 برابر با ۱۹/۶۷۶ سانتیمتر (جدول ۳) می‌باشد.

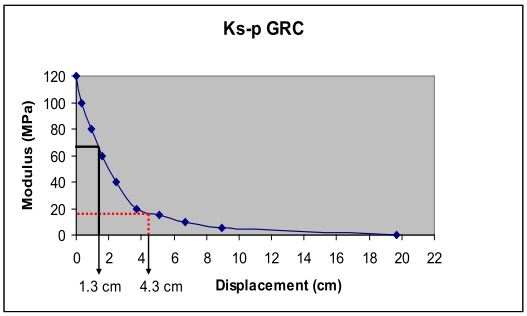


شکل ۱۰- نمودار پنت برای تعیین مقدار جابجایی قبل از نصب نگهداری [۶]



شکل ۱۱- نمودار ولاکوپولوس- دایدریکس برای تعیین مقدار جابجایی قبل از نصب [۹]

در این‌حالت و با استفاده از نمودار پنت، مقدار ضریب ناهمجواری (u_r/u_{max}) برابر ۰/۳۴۵ و مقدار جابجایی قبل از نصب سیستم نگهداری (ur)، ۶/۶ سانتیمتر محاسبه گردید. همچنین با استفاده از نمودار ولاکوپولوس- دایدریکس، مقدار ضریب ناهمجواری (Closure /Maximum Closure) برابر ۰/۲۲ و مقدار جابجایی قبل از نصب سیستم نگهداری (Closure)، ۴/۳ سانتی‌متر محاسبه شد. این مقادیر جابجایی بایستی از جابجایی مجاز که از روابط ساکورایی محاسبه می‌شود کوچکتر باشد. مقدار جابجایی مجاز براساس تراز هشدار خطر II و III که برای واحد اسلیت- فیلیت محاسبه گردید به ترتیب برابر ۳ و ۱/۳ سانتیمتر شد که از مقادیر۶/۶ و ۴/۳ کوچکتر می‌باشد. بنابراین ۱/۳ سانتی‌متر جابجایی مجاز حاصل از تراز هشدار خطر III (به عنوان پایداری کوتاه‌مدت)، معادل با مقدار جابجایی به وجود آمده قبل از نصب سیستم نگهداری در نظر گرفته می‌شود. مدول تغییر شکل معادل با ۱/۳ سانتی‌متر جابجایی، ۶۸ مگاپاسکال بدست می‌آید و ترخیص تنش اعمالی به مدل معادل با ۱/۳ سانتی‌متر جابجایی، ۵۹ درصد بدست می‌آید (شکل‌های ۱۲ و ۱۳).



شکل ۱۳- منحنی اندرکنش زمین جهت تعیین مدول تغییر شکل در نقطه نصب سیستم نگهداری، نرم‌افزار Phase[2]

نصب پوشش اولیه و ارزیابی پایداری

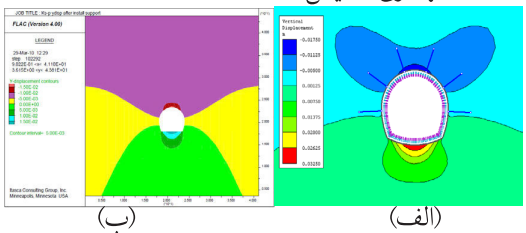
با استفاده از تراز هشدار خطر، جابجایی مجاز توده‌سنگ که در آن بایستی نگهداری نصب گردد، تعیین می‌شود. با افزایش عمق تونل، تاثیر زمان نصب نگهداری در کنترل ناپایداری بیشتر می‌شود. اگر نگهداری زود نصب شود، تحمل فشار توده‌سنگ را ندارد[۸]. نگهداری باید در بازه جابجایی مجاز توده‌سنگ که از تراز هشدار خطر II بدست می‌آید (مقدار آن ۳ سانتی‌متر محاسبه شد) و جابجایی کوتاه‌مدت که از تراز هشدار خطر III تعیین می‌شود (مقدار آن ۱/۳ سانتیمتر محاسبه شد)، نصب شود. تعیین دقیق جابجایی مزبور با ابزار دقیق امکان‌پذیر می‌باشد. برای انتخاب سیستم نگهداری،

به‌خصوص حائل فولادی، ابتدا مشخصات تیرآهن‌های تولیدی شرکت ذوب آهن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به سهولت استفاده از تیرآهن‌های شماره ۱۶ و ۱۴ و رایج بودن این تیرآهن‌ها، مشخصات آنها در نرم‌افزارهای FLAC و Phase^2 وارد گردید. سپس با ایجاد بیش از ۵۰ مدل مختلف با ضخامت‌های شاتکریت متفاوت و انجام آزمون‌های مربوطه جهت رسیدن به فاکتور ایمنی مورد نظر، سیستم نگهداری مناسب انتخاب گردید. بر این اساس و در نهایت، جهت پایدارسازی تونل در واحد اسلیت- فیلیت، اجرای شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر همراه با نصب تور سیمی (#6)، حائل فولادی از نوع HE160A با کف‌بند در فواصل ۱ متری و پیچ‌سنگ‌های ۲ متری در شبکه ۱ × ۲ متر در نظر گرفته شد. مشخصات سیستم نگهداری پیشنهادی و معادل آنها در جدول ۶ ارائه گردیده است.

جدول ۶- خصوصیات سیستم نگهداری پیشنهادی

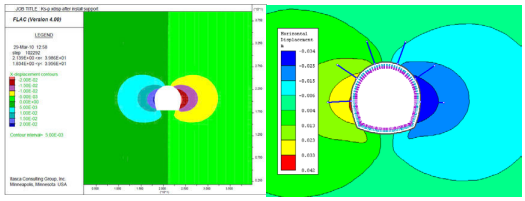
خصوصیات	تیرآهن HE 160A	بتن (شاتکریت)	سیستم نگهداری معادل
مدول (GPa)	۲۰۰	۲۱	۱۹٫۸
سطح مقطع (m^2)	$۲٫۰۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۱ \times ۰٫۱$	$۱ \times ۰٫۱۳۰۲$
ممان اینرسی (m^4)	$۸٫۶۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۸٫۳۳۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۱٫۸۴ \times ۱۰^{-۲}$

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ وضعیت جابجایی‌ها پس از اعمال نگهداری نمایش داده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۱۴- توزیع جابجایی قائم دیواره تونل پس از اعمال نگهداری، نرم افزارهای الف) Phase^2 و ب) FLAC



(ب) (الف)

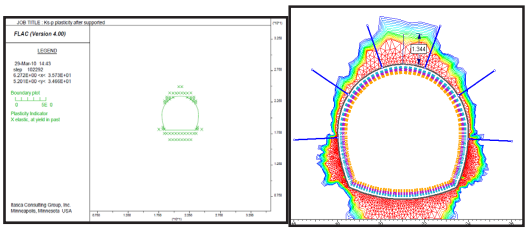
شکل ۱۵- توزیع جابجایی افقی دیواره تونل پس از اعمال نگهداری، نرم افزارهای الف) Phase^2 و ب) FLAC

مقادیر جابجایی‌های قائم و افقی در قسمت‌های مختلف تونل (واقع در واحد اسلیت- فیلیت) پس از اعمال سیستم نگهداری که با استفاده از دو نرم‌افزار FLAC و Phase^2 حاصل گردیده ، در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- مقادیر جابجایی پس از اعمال تحکیمات

مقادیر جابجایی پس از اعمال نگهداری (cm)	نرم‌افزار FLAC	نرم‌افزار Phase^2
در سقف	۱٫۶۲۳	۱٫۶۳
در دیواره	۲٫۰۹۷	۲٫۲۷

در شکل ۱۶ ضخامت ناحیه گسیخته شده پس از اعمال سیستم نگهداری در اطراف تونل واقع در واحد اسلیت- فیلیت نمایش داده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۱۶- ضخامت ناحیه پلاستیک در واحد اسلیت- فیلیت، نرم‌افزارهای الف) Phase^2 و ب) FLAC

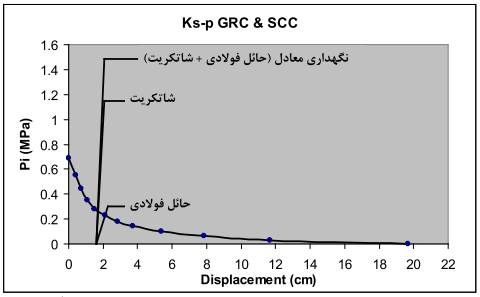
مقادیر ضخامت ناحیه پلاستیک پس از اعمال سیستم نگهداری در واحد اسلیت- فیلیت در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸- ضخامت ناحیه پلاستیک پس از اعمال نگهداری

ضخامت ناحیه پلاستیک (m)	نرم‌افزار FLAC	نرم‌افزار Phase^2
در بالای تونل	۱٫۵۲	۱٫۳۴۴
در دیواره‌ها	۰٫۲	۰

رسم منحنی اندرکنش زمین و سیستم نگهداری

در این قسمت با استفاده از راهنمای نرم‌افزار RocSupport و روش حل دانکن فاما (Dun can Fama)که بر مبنای معیار شکست موهر- کلمب می‌باشد و همچنین استفاده از روابط تجربی ارائه شده توسط هوک (Hoek)، منحنی اندرکنش زمین و سیستم نگهداری برای واحد اسلیت- فیلیت ترسیم گردید. به‌منظور رسم منحنی اندرکنش زمین و سیستم نگهداری، نمودار اندرکنش زمین (GRC) که با نرم‌افزار FLAC ترسیم شده، انتخاب می‌گردد. در نمودار انتخاب شده به‌جای نسبت P_i/P_o در محور y از فشار داخلی (Pi) استفاده می‌گردد. با توجه به ۰/۶۹ مگاپاسکال معادل حداکثر تنش قائم در سقف(۰/۶۹=۳۰×۰/۰۲۳ =σ=γh)، این مقدار به‌عنوان حداکثر مقدار فشار داخلی انتخاب می‌گردد (حداکثر مقدار P_i/P_o برابر یک بود). برای رسم منحنی مشخصه نگهداری (Structure Curve Characteristic) یا (SCC) ابتدا جابجایی مجاز تونل برای طراحی نگهداری بر اساس روش کرنش بحرانی تعیین شده و سیستم نگهداری در این جابجایی نصب می‌گردد. مقدار این جابجایی ۱/۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که در بازه جابجایی مجاز توده‌سنگ که از تراز هشدار خطر II بدست می‌آید و جابجایی کوتاه مدت که از تراز هشدار خطر III تعیین می‌شود، می‌باشد. شکل ۱۷ منحنی اندرکنش زمین و سیستم نگهداری در واحد اسلیت- فیلیت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- منحنی اندرکنش زمین و سیستم نگهداری

تعیین ضریب ایمنی سیستم نگهداری

برای تعیین ضریب ایمنی سیستم نگهداری از سه روش زیر استفاده می‌گردد:

۱- تعیین ضریب ایمنی سیستم نگهداری با استفاده از منحنی اندرکنش زمین و سیستم نگهداری

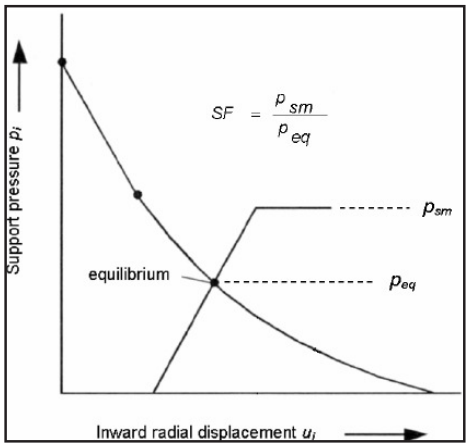
۲- تعیین ضریب ایمنی سیستم نگهداری با استفاده از روابط و نرم‌افزار FLAC

۳- تعیین ضریب ایمنی سیستم نگهداری با استفاده از نرم‌افزار Phase[2]

تعیین ضریب ایمنی با استفاده از منحنی اندرکنش زمین و سیستم نگهداری

ضریب ایمنی به‌گونه‌ای که در شکل ۱۸ نشان داده شده، محاسبه می‌گردد. در این‌حالت ضریب ایمنی بصورت نسبت بین حداکثر فشار سیستم نگهداری (Psm) و فشار در نقطه تعادل منحنی اندرکنش زمین و منحنی اندرکنش سیستم نگهداری (Peq) بیان می‌شود [۷]. با تطابق منحنی اندرکنش زمین و سیستم نگهداری (شکل ۱۷) و نمودار تعیین ضریب ایمنی (شکل ۱۸)، مقادیر ضریب ایمنی سیستم نگهداری به صورت جدول ۹ می‌باشد:

جدول ۹- تعیین ضریب ایمنی نگهداری با استفاده از منحنی اندرکنش زمین



شکل ۱۸- نمودار تعیین ضریب ایمنی [۱۰]

سیستم نگهداری	P_{sm}	P_{eq}	SF
سیستم نگهداری معادل (حائل فولادی+شاتکریت)	۱٫۴۸۶	۰٫۲۸۲۹	۵٫۲۵

تعیین ضریب ایمنی سیستم نگهداری با استفاده از روابط و نرم‌افزار FLAC

برای تعیین ضریب ایمنی سیستم نگهداری بدین روش، از روابط زیر استفاده می‌گردد:

$$SF=\frac{F_{ayp}}{\sigma_{max}} \quad (۷)$$

$$\sigma_{max}=\frac{N}{A}+\frac{M}{2I} \quad (۸)$$

که در آن؛ F_{ayp}: مقاومت یا تنش مجاز محوری سیستم نگهداری (MPa)، σ_{max}: حداکثر تنش محوری وارد بر سیستم نگهداری (MPa)، N: حداکثر نیروی محوری وارده بر سیستم نگهداری (MN)، A : سطح مقطع (m^2)، M: حداکثر گشتاور ایجاد شده در سیستم نگهداری (MN.m)، t: ضخامت سیستم نگهداری (m)، I: ممان اینرسی (m^4) می‌باشد[۷].

برای بدست آوردن حداکثر نیروی محوری وارده، حداکثر نیروی برشی و حداکثر گشتاور ایجاد شده در سیستم نگهداری از اطلاعات خروجی نرم‌افزار FLAC استفاده می‌شود. این اطلاعات در جدول ۱۰ ارائه شده است، همچنین مقادیر سطح مقطع، ممان اینرسی در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۱۰- پارامترهای مورد نیاز برای تعیین تنش‌های وارده بر سیستم نگهداری، نرم‌افزار FLAC

نقاط مختلف پوشش	شرایط بدون وقوع زلزله		
	N (MN)	M (MN.m)	Q (MN)
سقف	۰٫۹۷۱۳۰	۰٫۰۰۳۹۲	۰٫۰۰۰۶۳
دیواره راست	۰٫۷۳۶۸۰	۰٫۰۰۵۴۰	۰٫۰۳۲۲۶

N: حداکثر نیروی محوری، M: حداکثر گشتاور خمشی، Q: حداکثر نیروی برشی

با توجه به موارد مذکور، نتایج محاسبه ضریب ایمنی سیستم نگهداری بر اساس تنش محوری در واحد اسلیت- فیلیت مطابق جدول ۱۱ می‌باشد:

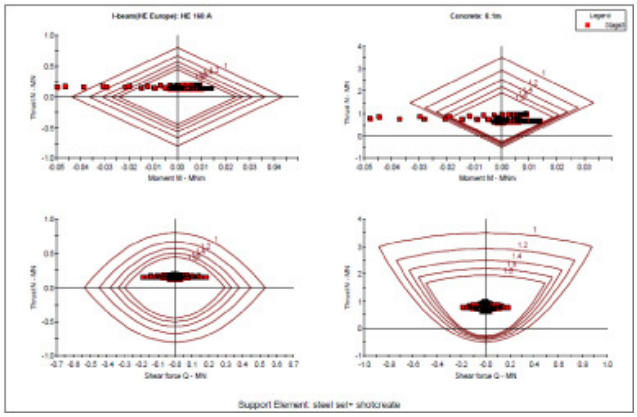
جدول ۱۱- ضریب ایمنی سیستم نگهداری

تنش محوری مجاز F_{ayp} (MPa)	تنش محوری وارده σ_{max} (MPa)		ضریب ایمنی	
	سقف	دیواره	سقف	دیواره
۲۰	۸٫۷۷	۶٫۲۹۱	۲٫۲۸	۳٫۱۸

همانگونه که در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود ضریب ایمنی سیستم نگهداری در دیواره و سقف تونل بیشتر از ۲ می‌باشد که این موضوع بیانگر ایمن بودن سیستم نگهداری پیشنهادی می‌باشد.

تعیین ضریب ایمنی سیستم نگهداری با استفاده از نرم‌افزار Phase^2

یکی از مناسب‌ترین روش‌ها در تعیین ضریب ایمنی سیستم نگهداری، استفاده از نرم‌افزار Phase^2 ۷/.می‌باشد. این کار در نرم‌افزار Phase^2 با استفاده از ابزار Capacity Support Plot در Interpret Phase^2 انجام می‌گیرد. در حالتی‌که از یک نگهداری ترکیبی مانند حائل فولادی به همراه شاتکریت استفاده شده باشد، نرم‌افزار چهار نمودار را نمایش می‌دهد. در هر یک از چهار نمودار، پوش‌های مربوط به ضریب ایمنی که تعداد آنها توسط کاربر تعیین می‌گردد، نمایش داده شده است. در شکل ۱۹، علاوه بر پوش‌ها، تعدادی نقاط مربعی کوچک که معرف نیروها و گشتاورهای وارده در هر گره یا نقطه از سیستم نگهداری است، دیده می‌شود. چنانچه این نقاط مربعی در داخل یک پوش قرار بگیرند، در این صورت، نقاط مورد نظر ضریب ایمنی بزرگتر از مقدار آن پوش دارند و اگر تعدادی از نقاط خارج از



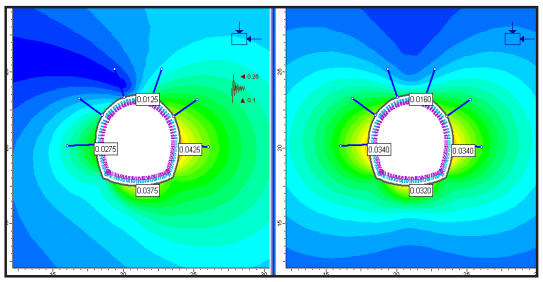
شکل ۱۹- وضعیت پوش‌های ضریب ایمنی در واحد اسلیت- فیلیت در نرم‌افزار Phase^2

پوش قرار بگیرند، نقاط مذکور ضریب ایمنی کوچکتر از آن پوش دارند.

در سیستم نگهداری پیشنهاد شده برای واحد اسلیت- فیلیت با انتخاب ۵ پوش از ابزار Support Capacity Plot وضعیت ضریب ایمنی بررسی خواهد شد. در شکل ۱۹ این پوش‌ها به همراه نقاط مربعی کوچک نمایش داده شده است. همانطور که دیده می‌شود اکثر نقاط در چهار نمودار، داخل پوش با ضریب ایمنی ۱/۸ قرار دارند و مفهوم آن این است که این نقاط از سیستم نگهداری دارای ضریب ایمنی بزرگتر از ۱/۸ هستند. اما تعدادی از نقاط در نمودارهای نیروی محوری- گشتاور خارج از پوش‌ها قرار دارند که نشان می‌دهد این نقاط ضریب ایمنی کمتر از یک دارند. در نرم‌افزار Phase^2 با استفاده از ابزار Filter Data by FS تعیین می‌شود که این نقاط در کدام قسمت از دیواره تونل قرار دارند. دلیل این موضوع را می‌توان به تیز بودن گوشه‌ها و تمرکز تنش در این مکان‌ها تعمیم داد. در محیط کار بایستی این گوشه‌ها کاملاً گرد حفاری شوند. در ادامه با انجام آزمون سعی و خطا در ابزار Filter Data by FS ، مقدار عددی ضریب ایمنی در سقف و دیواره تونل تعیین می‌گردد. بر این اساس ضریب ایمنی در بالاترین نقطه از سیستم نگهداری در سقف تونل برابر ۳/۸ و ضریب ایمنی در نقاطی از دیواره‌های تونل برابر ۴/۶ می‌باشد.

تاثیر بار دینامیکی زلزله بر سیستم نگهداری

باتوجه به مطالعات لرزه خیزی در ساختگاه تونل و شناسایی گسل‌های اصلی در شعاع ۲۰۰ کیلومتری محور تونل حداکثر شتاب افقی در سطح زمین g ۰/۲۶ و حداکثر شتاب قائم g ۰/۱ برآورد شده است. تحلیل لرزه‌ای با استفاده از مدلسازی در نرم‌افزار Phase^2 انجام شده است، بطوری که شرایط زلزله با سطح طراحی حداکثر (Maximum Design Level) یا (MDL) در نظر گرفته شد. زلزله با سطح طراحی حداکثر (MDL) عبارت است از طراحی در شرایطِ زلزلهِ نسبتاً شدیدی که احتمال وقوع آن در دوره عمر مفید سازه، کم است [۱].



(الف) (ب)

شکل ۲۲- وضعیت جابجایی‌ها اطراف تونل پس از اعمال سیستم نگهداری در شرایط الف) بدون وقوع زلزله و ب)شرایط ناشی از وقوع زلزله

پس از مدلسازی، مقادیر نیروها و گشتاور خمشی در نقاط مختلف پوشش در شرایط ناشی از وقوع زلزله محاسبه شد که در جدول ۱۲ درج شده است.

جدول ۱۲- نیروها و گشتاور خمشی ایجاد شده در سیستم نگهداری شرایط ناشی از وقوع زلزله

نقاط مختلف پوشش	شرایط ناشی از وقوع زلزله		
	N (MN)	M (MN.m)	Q (MN)
سقف	۰٫۹۷۰۵	۰٫۰۰۳۹۷	۰٫۰۰۰۵۵
دیواره راست	۰٫۷۲۶۳	۰٫۰۰۴۷۱	۰٫۰۳۲۵۴

N: حداکثر نیروی محوری، M: حداکثر گشتاور خمشی، Q: حداکثر نیروی برشی

با مقایسه جدول فوق با جدول ۱۰ چنان بر می‌آید که پس از اعمال بار شبه دینامیکی زلزله، تغییرات محسوسی در وضعیت نیروها و گشتاور خمشی ایجاد نشده و سیستم نگهداری پیشنهادی نسبت به بار ناشی از وقوع زلزله نیز ایمن می‌باشد.

نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزارهای Phase² 7.0 و FLAC 4.00 تحلیل‌های عددی مقایسه‌ای صورت گرفت. نتایج این دو نرم‌افزار همخوانی خوبی با هم داشتند. خلاصه نتایج بدست آمده مطابق بندهای ذیل می‌باشد:

- به منظور تخمین مقدار نسبت تنش‌های برجا (K) در ساختگاه سد گرین در نهاوند با استفاده از آنالیز حساسیت، از مقادیر جابجایی در واحد اسلیت- فیلیت استفاده شد. همچنین با بهره‌گیری از نتایج حاصل از روابط تجربی، آنالیز حساسیت انجام‌شده و با توجه به عملکرد معکوس گسل‌های اطراف تونل، عدد ۱/۴ به عنوان نسبت تنش‌های برجای منطقه در نظر گرفته شد.
- مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزارهای عددی با جابجایی حاصل از روش کرنش بحرانی که از معادلات ساکورایی بدست می‌آید، نشان می‌دهد که در واحد اسلیت- فیلیت ناپایداری در جبهه‌کار تونل وجود خواهد داشت. با استفاده از ترازهای هشدار خطر، جابجایی مجاز بین ۱/۳ تا ۳ سانتی‌متر می‌باشد. در این واحد، جابجایی در سقف تونل حدود ۲۰ سانتی‌متر پیش‌بینی می‌شود. وضعیت ناپایداری واحدهای اسلیت- فیلیت با ترسیم منحنی اندرکنش زمین (GRC) با استفاده از نرم‌افزارهای Phase² و FLAC هم اثبات می‌شود.
- بر اساس تحلیل و بررسی سیستم نگهداری پیشنهاد شده برای واحد اسلیت- فیلیت از دو روش ترخیص تنش و روند کاهشی مدول تغییر شکل استفاده گردید.
- در روش ترخیص تنش، ۱/۳ سانتیمتر جابجایی مجاز حاصل از تراز هشدار خطر III (به عنوان پایداری کوتاه مدت)، معادل با مقدار جابجایی به وجود آمده قبل از نصب سیستم نگهداری در نظر گرفته شد و ترخیص تنش اعمالی به مدل معادل با ۱/۳ سانتیمتر جابجایی، در نرم‌افزار FLAC برابر ۵۹ درصد و در نرم‌افزار Phase² برابر ۵۷ درصد بدست آمد.
- در روش روند کاهشی مدول تغییر شکل، ۱/۳ سانتی‌متر جابجایی مجاز حاصل از تراز هشدار خطر III (به عنوان پایداری کوتاه مدت)، معادل با مقدار جابجایی به‌وجود آمده قبل از نصب سیستم نگهداری در نظر گرفته شد.

مدول تغییر شکل معادل با ۱/۳ سانتی‌متر جابجایی، ۶۸ مگاپاسکال بدست می‌آید.

- به‌منظور کنترل ناپایداری در واحد اسلیت- فیلیت از نگهداری ترکیبی شامل اجرای شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر همراه با نصب توری سیمی، حائل فولادی از نوع HE 160 A با کف‌بند در فواصل ۱ متری و نصب پیچ‌سنگ‌های ۲ متری در شبکه ۱×۲ با تزریق در تمام طول در محدوده سقف توصیه می‌گردد. این انتخاب با ایجاد بیش از ۵۰ مدل در نرم‌افزارهای FLAC و Phase[2] ، با ضخامت‌های مختلف شاتکریت و حائل‌های فولادی متفاوت و انجام آزمون‌های مربوطه جهت رسیدن به فاکتور ایمنی مورد نظر، صورت گرفت.

- جهت مدل‌سازی ساده در نرم‌افزارها بخصوص نرم‌افزار FLAC و برای بدست آوردن نیروهای محوری و برشی و گشتاور خمشی، سیستم نگهداری معادل با شاتکریت و حائل فولادی محاسبه گردید. سیستم نگهداری مرکب از حائل فولادی و ۱۰ سانتیمتر شاتکریت معادل شاتکریتی به ضخامت ۱۳/۰۲۲ سانتیمتر و ممان اینرسی $1/84*10^{-4}$ (m4) و مدول تغییر شکل ۱۹/۸ گیگاپاسکال محاسبه شد.

- نتایج حاصل از محاسبه ضریب ایمنی بیانگر ایمن بودن سیستم نگهداری پیشنهادی می‌باشد.

- نتایج حاصل از مدلسازی شبه دینامیکی مانند بار ناشی از زلزله با حداکثر شتاب افقی g ۰/۲۶ و حداکثر شتاب قائم g ۰/۱ ، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در ضریب ایمنی سیستم نگهداری پیشنهادی مشاهده نگردید.

- نظر به اینکه اجرای این طرح آغاز نشده، نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمای مناسبی برای طراحی و اجرای دقیق طرح تونل انحراف آب سد گرین نهاوند باشد.

- باتوجه به قرارگیری مصالح ضعیف از جمله اسلیت- فیلیت در مسیر تونل، نصب و قرائت ابزاردقیق (همگرایی‌سنج) جهت کنترل پایداری سازه مذکور، ضروری می‌باشد.

- با توجه به مصالح ضعیفی همچون واحد اسلیت- فیلیت و قطر تونل پیشنهاد می‌گردد که از روش دو مرحله‌ای جهت حفر تونل در این توده‌سنگ استفاده شود.

منابع

۱- حسینی س.م.، (۱۳۸۹)، « طراحی و تحلیل پایداری تونل انحراف آب سد گرین نهاوند» پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ۲۴۰ ص.

۲- شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، (۱۳۸۷)، "مطالعات مرحله دوم، گزارش میانکار مطالعات زمین‌شناسی مهندسی ۱۱۵ص

۳- شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، (۱۳۸۷)، "مطالعات مرحله دوم، آلبوم نقشه‌ها و برش‌های زمین‌شناسی و مهندسی محل سد و مخزن"،۱۰ ص ۲۵

۴- فردوسی ب.، عطایی م.، رضا م.، وثوق الف.، (۱۳۸۶)، «تحلیل پایداری و طراحی پوشش نهایی تونل راه آهن کوهین محور قزوین- رشت"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۳۰ تا ۳۶

۵- محمدی ح.، رحمان نژاد ر.، سعیدی ع.، (۱۳۸۷)، "بررسی امکان‌پذیری حذف پوشش بتنی تونل‌های انتقال آب مطالعه موردی: تونل انتقال آب کرمان"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۴۰ ص۱۵۰

6- Hoek E., Diederichs M.S., Carranza-Torres C., Corkum B.,(2008), "Integration of geotechnical and structural design in tunneling", 56th Annual Geotechnical Engineering Conference, University of Minnesota, p.54

7- Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F.

(1995), Support of underground excavations in hard rock, Balkema, Rotterdam, 254 pp.

8- Hsiao F.Y., Wang C.L., Chern J.C., 2009, Numerical simulation of rock deformation for support design, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.24, 14-21

9- Phase^2 Tutorials Pdf, 2009, Ver. 7.009, Tunnel Lining Design 25 pp.

10- Rocsupport Tutorials PDF , (2004), Ver. 3.002, Rocscience Inc., Canada90 pp.