

طراحی و تحلیل پایداری ساختگاه تونل انحراف سد گرین نهاوند

کامران گشتاسبی گوهریزی
ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
goshtasb@modares.ac.ir

کاوه آهانگری
ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران
kaveh.ahangari@gmail.com

سید مرتضی حسینی*
ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران
s_morteza_h2003@yahoo.com

خلاصه مقاله

طراحی یک سازه زیرزمینی با استفاده از روش‌های تجربی و عددی امکان‌پذیر می‌باشد. مهندسين معمولاً ترجیح می‌دهند که از روش‌های تجربی به دلیل سهولت استفاده و کاربردی بودن آن استفاده کنند. اما در برخی شرایط امکان استفاده از روش‌های تجربی نمی‌باشد و بایستی از روش‌های عددی استفاده نمود. سد گرین در استان همدان و در حدود ۱۶ کیلومتری جنوب شهرستان نهاوند با هدف ذخیره‌سازی آب چشمه گاماسیاب مورد مطالعه قرار گرفته است. نظر به پیچیدگی ساختار زمین‌شناسی در ساختگاه سد گرین و مشکلات متعدد در تحلیل و طراحی تونل انحراف آب سد گرین که باعث اختلاف نظر اساسی در انتخاب سازه انحراف آب (تونل یا کالورت) شده بود، در نهایت گزینه تونل جهت انحراف آب انتخاب گردید. این تونل در مسیر خود، از واحدهای آندزیت، اسلیت-فیلیت، متادیاباز و آذرآواری عبور می‌کند. مهمترین مسأله در طراحی و اجراء این پروژه انتخاب مناسب الگوی حفاری و سیستم نگهداری، به‌منظور پایداری توده سنگ و کاهش گسترش ناحیه پلاستیسیته در واحد اسلیت-فیلیت می‌باشد. در این مقاله با استفاده از روش همگرایی-همجواری و رسم منحنی مشخصه زمین با کمک نرم افزارهای عددی و اعمال ترخیص تنش در مدل معادل با همگرایی به وجود آمده تا لحظه استقرار پوشش، سیستم نگهداری اولیه مناسب برای واحد اسلیت-فیلیت پیشنهاد شده است.

ABSTRACT

The design of an underground structure is applicable by using empirical and numerical methods. Empirical methods are generally preferred by engineers and engineering geologists because they are more practical and usable. But in some conditions is not possible to use empirical methods and numerical methods should be used. Garin dam is located in Hamedan province about 16 km in southern Nahavand. Considering the complexity geological structure in Garin dam site and diverse problems in design and analysis of the diversion tunnel which had led in two options for water diversion structure (diversion tunnel and culvert), finally, tunnel was selected as water diversion structure. This tunnel passes from andesite, slate-phyllite, metadiabaz, volcanic units in own route. The most important problem of this project about design and performance is selection suitable pattern for drilling and support system, in order to stability of rockmass and reduction plasticity zone in slate-phyllite unit. In this paper, convergence-confinement method is applied to tracing ground characteristic curve using of numerical software models and then stress relaxation is exerted to modal that equivalent with occurred critical convergence until before install support system. Finally, suitable support system is proposed for slate-phyllite unit.

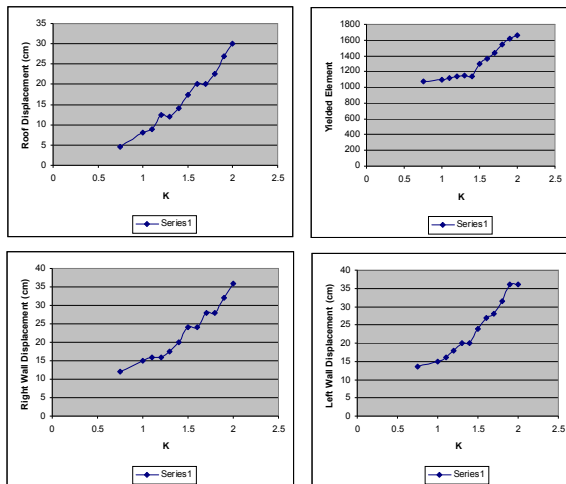
کلمات کلیدی: سد گرین، تونل انحراف، طبقه‌بندی توده‌سنگ، تحلیل عددی، نرم‌افزار Phase² 7.0 و FLAC 4.00

نماد	γ (MN/m ³)	C (MPa)	ϕ	σ_t (MPa)	E (GPa)	ν
Ks-p	۰/۰۲۳	۰/۰۴۵	۲۸	۰/۰۰۱۲	۰/۱۲	۰/۳

جدول ۱- مشخصات ژئومکانیکی واحد اسلیت- فیلیت

تعیین نسبت تنش‌های برجا منطقه (K)

به منظور 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 به ازای مقادیر مختلف K در نرم افزار اکسل رسم می‌شود. همچنین از مقادیر تعداد المان‌های تسلیم‌پذیر^۳ در نرم‌افزار Phase^۲ برای محاسبه K استفاده گردید. این نمودارها در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- مقادیر جابجایی و تعداد المان‌های تسلیم‌پذیر نسبت به مقادیر مختلف K

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

مقدار K به ازای جابجایی در سقف	مقدار K به ازای جابجایی در دیواره راست	مقدار K به ازای المان‌های تسلیم‌پذیر	مقدار K به ازای جابجایی در دیواره چپ
۱/۳	۱/۶	۱/۴	۱/۴

جدول ۲- مقادیر مختلف نسبت تنش‌های برجا (K)

با بهره‌گیری از نتایج حاصل از روابط تجربی و مقادیر جدول فوق و با توجه به عملکرد معکوس گسل‌های اطراف تونل، عدد ۱/۴ به عنوان نسبت تنش‌های برجای منطقه در نظر گرفته می‌شود.

مدلسازی تونل انحراف آب سد گرین در واحد اسلیت- فیلیت

به منظور مدلسازی تونل در واحد اسلیت- فیلیت و تعیین وضعیت جابجایی‌ها و همچنین تعیین ضخامت ناحیه پلاستیک از دو نرم‌افزار Phase^۲ و FLAC استفاده شد. معیار استفاده شده برای واحد اسلیت- فیلیت در این تحلیل، معیار شکست موهر-کولمب است و نوع مواد نیز پلاستیک در نظر گرفته شد. همچنین پارامترهای مورد استفاده در تحلیل عددی به صورت جدول ۱ می‌باشد.

شکل‌های ۳ و ۴ وضعیت جابجایی‌های افقی و قائم را در اطراف تونل نشان می‌دهد.

مقدمه

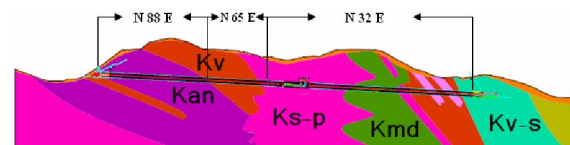
ساختمان سد گرین در استان همدان، در حدود ۱۶ کیلومتری جنوب شهرستان نهاوند قرار دارد. دسترسی به ساختمان سد، با طی حدود ۹ کیلومتر مسیر از نهاوند به سمت بروجرد، تغییر مسیر به سمت نورآباد در محل سه‌راهی قلعه قباد و طی حدود ۷ کیلومتر در جاده نهاوند- نورآباد امکان‌پذیر می‌باشد.

از جمله مسائل مهم در طراحی و اجرا تونل‌ها در زمین‌هایی با مشخصات ژئومکانیکی پایین، تنش‌زدایی و 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 نیز بستگی دارد. لذا انتخاب مناسب شکل و نحوه اجرا حفاری می‌تواند نقش بسزایی در کاهش این پدیده در زمان حفاری داشته باشد. مسأله مهم دیگر تخمین نگهداری مورد نیاز برای پایدارسازی تونل است. منحنی مشخصه زمین با استفاده از روشی جدید به نام روند کاهشی مدول تغییر شکل^۱ و با کمک نرم‌افزار Phase^۲ رسم می‌شود و میزان نرخ ناهمجواری از روی نمودار ولاکوپولوس- دایدیریکس^۲ تعیین می‌گردند و اعمال تریخس 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 روش مختلف و دو نرم‌افزار Phase^۲ و FLAC صورت گیرد.

مشخصات زمین‌شناسی و ژئومکانیکی ساختمان تونل انحراف آب

سد گرین

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 به وسیله یک کانال دوزنقه ای با رقم کف ۱۷۹۰ متر از سطح دریا به داخل دهانه ورودی تونل هدایت خواهد شد. مقطع تونل انحراف به شکل نعل اسبی با قطر ۶ و ارتفاع ۵/۵ متر و کف صاف در نظر گرفته شده است طول تونل ۴۹۰ متر و به همراه کانال‌های ورودی و خروجی تونل تقریباً 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 دوزنقه ای شکل به سمت پایین دست هدایت می‌شود. با توجه به قرارگیری تونل انحراف در تکیه گاه راست، وضعیت عمومی زمین‌شناسی محل آن از شرایط زمین‌شناسی این تکیه گاه تبعیت می‌نماید یعنی تونل به ترتیب از واحدهای آندزیت (Kan)، آذرآواری (توف و آگلومرا) (Kv)، اسلیت- فیلیت (Ks-p)، متادایباز (Kmd) و آذرآواری- رسوبی (Kv-s) عبور می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱- مقطع طولی مسیر تونل انحراف آب سد گرین

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

³ Yielded Elements

¹ modulus reduction method

² Vlachopoulos-Diederichs

تحلیل پایداری توده‌سنگ اطراف 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.

$$\epsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \quad (1)$$

در این رابطه؛ σ_c : مقاومت فشاری تک محوره توده‌سنگ (MPa)، E: مدول یانگ (MPa)، ϵ_c : کرنش بحرانی بر حسب درصد

ساکورایی با ارتباط دادن نتایج آزمایشگاهی و داده های صحرایی، رابطه بین کرنش بحرانی و مقاومت فشاری و مدول یانگ را بدست آورد و سه تراز هشدار خطر به صورت زیر ارائه داد:

$$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad \text{تراز هشدار خطر I} \quad (2)$$

$$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad \text{تراز هشدار خطر II} \quad (3)$$

$$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad \text{تراز هشدار خطر III} \quad (4)$$

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 به عنوان دو حد بالایی و پایینی برای پایداری تونل‌ها بر اساس کرنش مجاز می‌باشند. به عبارتی دیگر تراز هشدار خطر I پایداری بلندمدت را نشان داده 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:

$$\epsilon_c = \frac{u_c}{a} \quad (5)$$

در این رابطه؛ a: شعاع تونل، u_c : جابجایی مجاز یا در سقف

مقادیر جابجایی‌های مجازی که براساس تراز هشدار خطر محاسبه گردید، در جدول ۵ ارائه شده است.

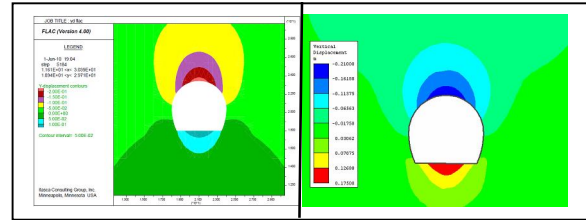
جابجایی مجاز براساس تراز هشدار خطر III (cm)	جابجایی مجاز براساس تراز هشدار خطر II (cm)	جابجایی مجاز براساس تراز هشدار خطر I (cm)
۱/۳	۳	۷/۱۶

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

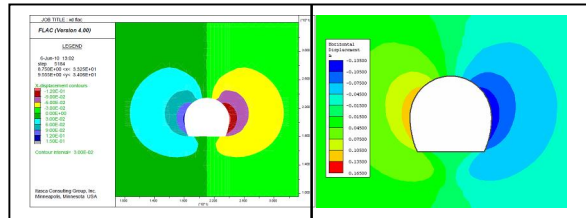
مقایسه مقادیر جابجایی که از مدلسازی عددی بدست آمده (جدول ۳) با جابجایی‌های مجاز (جدول ۵)، نشان دهنده ناپایداری شدید تونل در واحد اسلیت- فیلیت می‌باشد.

ترسیم منحنی اندرکنش زمین GRC

برای رسم منحنی اندرکنش زمین می‌توان از نرم‌افزارهای دو بعدی FLAC و Phase² استفاده نمود. هرکدام از این نرم‌افزارها قابلیت ترسیم منحنی اندرکنش زمین را دارند که به راحتی می‌توان با انجام عملیاتی بیشتر در طی مراحل مدلسازی



شکل ۳- توزیع جابجایی‌های قائم اطراف تونل واقع در واحد اسلیت- فیلیت، نرم‌افزار FLAC و Phase²



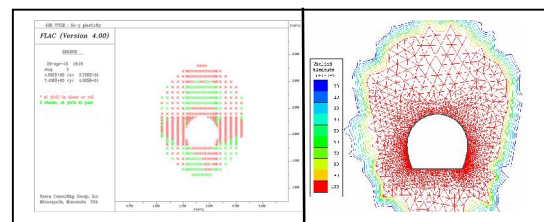
شکل ۴- توزیع جابجایی‌های افقی اطراف تونل واقع در واحد اسلیت- فیلیت، نرم‌افزارهای FLAC و Phase²

مقادیر جابجایی‌های قائم و افقی در قسمت‌های مختلف تونل واقع در واحد اسلیت- فیلیت که با استفاده از دو نرم‌افزار FLAC و Phase² حاصل گردیده، در جدول ۳ ارائه شده است.

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

جدول ۳- مقادیر جابجایی در واحد اسلیت- فیلیت

در شکل ۵ ضخامت ناحیه گسیخته شده در اطراف تونل واقع در واحد اسلیت- فیلیت نمایش داده شده است.



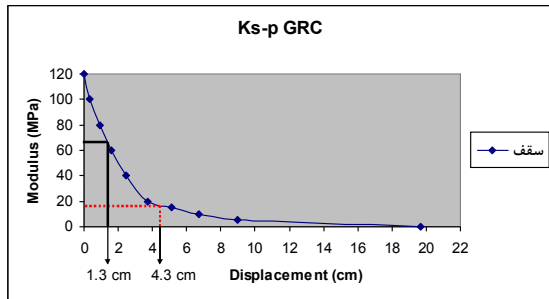
شکل ۵- ضخامت ناحیه پلاستیک در واحد اسلیت- فیلیت، نرم‌افزارهای FLAC و Phase²

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

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

جدول ۴- شعاع ناحیه پلاستیک در واحد اسلیت- فیلیت

شد که از مقدار $4/3$ کوچکتر می‌باشد. لذا جهت تعیین مقدار مناسب جابجایی به وجود آمده قبل از نصب سیستم نگهداری در واحد اسلیت- فیلیت به این طریق عمل می‌گردد که با رسم منحنی اندرکنش زمین با کمک نرم‌افزار $Phase^2$ مقدار ماکزیمم جابجایی در سقف تونل با توجه به ترخیص کامل تنش برابر $19/676$ سانتیمتر تعیین شد. در ادامه $1/3$ 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 می‌شود. مدول تغییر شکل معادل با $1/3$ سانتیمتر جابجایی، 68 مگاپاسکال بدست می‌آید (شکل ۸).



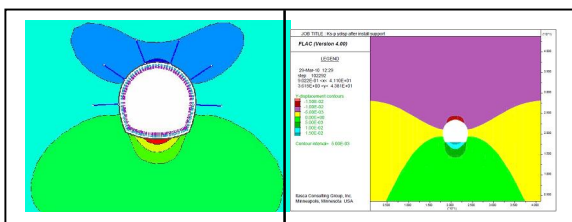
شکل ۸- منحنی اندرکنش زمین در واحد اسلیت- فیلیت

نصب پوشش اولیه و ارزیابی پایداری

در تحلیل پایداری و نصب نگهداری از جابجایی مجاز استفاده شده است. 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 توده سنگ را ندارد. نگهداری باید در بازه جابجایی مجاز توده‌سنگ که از تراز هشدار خطر II بدست می‌آید (مقدار آن ۳ سانتیمتر محاسبه شد) و جابجایی کوتاه مدت که از تراز هشدار خطر III تعیین می‌شود (مقدار آن $1/3$ سانتیمتر محاسبه شد)، نصب شود. تعیین دقیق جابجایی مزبور با ابزار دقیق امکان پذیر می‌باشد. در این بخش با بررسی‌های به عمل آمده در نهایت جهت پایداری تونل در واحد اسلیت- فیلیت، اجرای شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر همراه با نصب تور سیمی ($diameter=6mm$)، حائل فولادی از نوع HE 160A با کف بند در فواصل ۱ متری و پیچ سنگ‌های ۲ متری در شبکه 2×1 متر در نظر گرفته شد. مشخصات سیستم نگهداری پیشنهادی و معادل آنها در جدول ۶ ارائه گردیده است.

سیستم نگهداری	بتن (شاتکریت)	تیرآهن HE 160A	خصوصیات
معادل	۲۱	۲۰۰	مدول (GPa)
$19/8$	$1 \times 0/1$	$2/01 \times 10^{-3}$	سطح مقطع (m^2)
$1 \times 0/13 \times 02$			

جدول ۶- خصوصیات سیستم نگهداری پیشنهادی

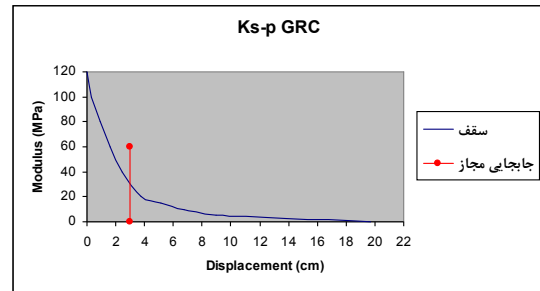


شکل ۹- توزیع جابجایی قائم دیواره تونل پس از اعمال تحکیمات در واحد اسلیت-

فیلیت، نرم افزار Phase2 و FLAC

در شکل‌های ۹ و ۱۰ وضعیت جابجایی‌ها پس از اعمال نگهداری نمایش داده شده است.

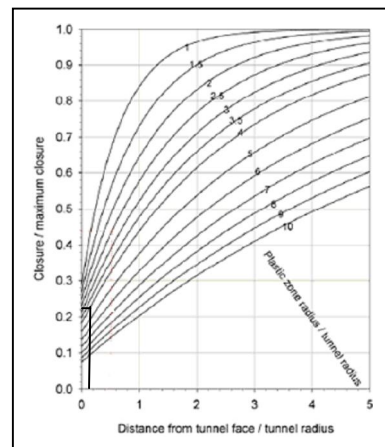
به این مهم دست یافت. به دلیل محدودیت فضا، منحنی اندرکنش ترسیم شده بوسیله نرم افزار $Phase^2$ ارائه می‌گردد. با استفاده از این نرم‌افزار، نوع جدیدی از منحنی اندرکنش زمین قابل ترسیم است که در آن محور X نشانگر جابجایی و محور Y روند کاهشی مدول تغییر شکل را نشان می‌دهد. نقطه صفر بر روی محور Y نشان دهنده حفر کامل تونل می‌باشد. منحنی اندرکنش زمین در واحد اسلیت- فیلیت، مطابق شکل ۶ می‌باشد.



شکل ۶- منحنی اندرکنش زمین در واحد اسلیت- فیلیت

تعیین مقدار جابجایی قبل از نصب سیستم نگهداری

در این طرح میزان گام پیشروی و فاصله جبهه کار از پوشش به ترتیب برابر ۱ و $0/5$ متر در نظر گرفته شد. در تعیین نقطه جابجایی قبل از نصب سیستم نگهداری از نمودار ولاکوپولوس و دایدریکس استفاده می‌شود (شکل ۷). جهت استفاده از این نمودار، بایستی مقادیر شعاع تونل، فاصله جبهه کار 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 (Closure) را تعیین نمود. بر این اساس شعاع تونل ۳ متر، فاصله جبهه کار از پوشش $0/5$ متر، شعاع ناحیه پلاستیک در سقف تونل $12/475$ متر (جدول ۴) و حداکثر جابجایی در سقف تونل برابر با $19/676$ سانتیمتر (جدول ۳) در نظر گرفته شد.



شکل ۷- نمودار ولاکوپولوس و دایدریکس

در ادامه با استفاده از نمودار ولاکوپولوس و دایدریکس مقدار جابجایی به وجود آمده قبل از نصب سیستم نگهداری با توجه به ضریب ناهمجواری

($\frac{closure}{max imum closure}$) برابر $4/3$ سانتی متر محاسبه شد. سپس با توجه به شکل

۸، مدول تغییر شکل معادل با $4/3$ سانتی متر جابجایی، ۱۸ مگاپاسکال تعیین می‌شود. این مقدار جابجایی بایستی از جابجایی مجاز که از روابط ساکورایی محاسبه می‌شود کوچکتر باشد. از طرفی مقدار جابجایی مجاز براساس تراز هشدار خطر II و III که برای واحد اسلیت- فیلیت محاسبه گردید به ترتیب برابر ۳ و $1/3$ سانتیمتر

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 جبهه کار 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.

جهت تحلیل و بررسی سیستم نگهداری پیشنهاد شده برای واحد اسلیت-فیلیت از روش روند کاهشی مدول تغییر شکل استفاده گردید. در این روش،

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

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

به منظور 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 160A با کف بند در فواصل ۱ متری و نصب پیچ‌سنگ‌های ۲ متری در شبکه ۱ × ۲ با تزریق در تمام طول در محدوده سقف توصیه می‌گردد.

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

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

مراجع

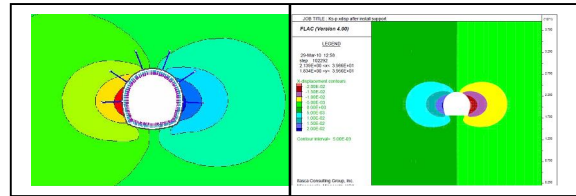
شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۷، "مطالعات مرحله دوم، گزارش میانکار مطالعات زمین‌شناسی مهندسی"

شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۷، "مطالعات مرحله دوم، آلبوم نقشه‌ها و برش‌های زمین‌شناسی و مهندسی محل سد و مخزن"

فردوسی بهنام، عطایی محمد، رضا میکائیل، وثوق امیرحسین، ۱۳۸۶، "تحلیل پایداری و طراحی پوشش نهایی تونل راه آهن کوهین محور قزوین-رشت"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

محمدی حمید، رحمان نژاد رضا، سعیدی علی، ۱۳۸۷، "بررسی امکان‌پذیری حذف پوشش بتنی تونل‌های انتقال آب مطالعه موردی: تونل انتقال آب کرمان"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

Zulphu Gurocak, Pranshoo Solanki, Musharraf M. Zaman, 2007, "Empirical and numerical analyses of support requirements for a diversion tunnel at the Boztepe dam site", eastern Turkey, Engineering Geology 91 (2007) 194-208

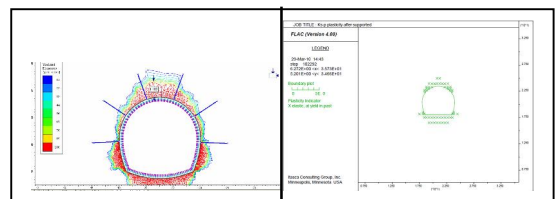


شکل ۱۰- توزیع جابجایی افقی دیواره تونل پس از اعمال تحکیمات در واحد اسلیت-فیلیت، نرم‌افزار Phase² و FLAC

مقادیر جابجایی‌های قائم و افقی در قسمت‌های مختلف تونل پس از اعمال تحکیمات واقع در واحد اسلیت-فیلیت که با استفاده از دو نرم‌افزار Phase² و FLAC حاصل گردیده، در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- مقادیر جابجایی پس از اعمال تحکیمات در واحد اسلیت-فیلیت

در شکل ۱۱ ضخامت ناحیه گسیخته شده پس از اعمال تحکیمات در اطراف تونل واقع در واحد اسلیت-فیلیت نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- ضخامت ناحیه پلاستیک در واحد اسلیت-فیلیت، نرم‌افزارهای Phase² و FLAC

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

ضخامت ناحیه پلاستیک (m)	نرم‌افزار FLAC	نرم‌افزار Phase ²
در بالای تونل	۱/۵۲	۱/۱۸۲

جدول ۸- ضخامت ناحیه پلاستیک پس از اعمال تحکیمات در واحد اسلیت-فیلیت

جهت ارزیابی پایداری از روش تنش مجاز استفاده شده است. نیروها و گشتاور خمشی بوجود آمده در مقطع پوشش اولیه به همراه ضریب ایمنی در جدول ۹ ارائه شده است.

تنش محوری مجاز (MPa)	تنش محوری وارده (MPa)		ضریب ایمنی
	سقف	دیواره	
۲۰	۸/۷۷	۶/۲۹۱	۲/۲۸

جدول ۹- ضریب ایمنی سیستم نگهداری در واحد اسلیت-فیلیت

همانگونه که در جدول ۹ مشاهده می‌شود نقاطی از سیستم نگهداری در دیواره و سقف تونل، ضریب ایمنی بین بیشتر از ۲ دارند که این موضوع بیانگر ایمن بودن سیستم نگهداری پیشنهادی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

به منظور تخمین مقدار نسبت تنش‌های برجا (K) 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 انجام شده و با

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

FLAC User's Manual, Ver. 4.00, Itasca Consulting Group, Inc.

Phase² Tutorials Pdf, 2009, Ver. 7.009, Tunnel Lining Design