

تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهدارنده تونل انحراف سد خرسان ۳

رسول اجل لوئیان*، رسول دادخواه، محمود هاشمی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

* مسئول مکاتبات - آدرس الکترونیکی: rasajl@sci.ui.ac.ir

(دریافت: ۸۴/۵/۴؛ پذیرش: ۸۵/۶/۲۷)

چکیده

تونل انحراف آب سد خرسان ۳ با هدف تسهیل در مراحل اجرایی سد مذکور در نظر گرفته شده است. مسیر تونل از بین لایه های آهکی سازند آسماری می گذرد. این منطقه در ناحیه زاگرس چین خورده واقع گردیده که در اثر آن گسل ها و ناپیوستگی های متعددی در توده سنگهای مسیر بوجود آمده و متحمل شکستگیهای فراوان شده است. در مقاله حاضر جهت طبقه بندی توده سنگ های مسیر تونل از طبقه بندی های ژئومکانیکی (Bieniawski 1989)، شاخص تونلسازی در سنگ (Barton et al. 1980) و شاخص مقاومت زمین شناسی (Hoek & Brown 1997) استفاده شده است. بر اساس این طبقه بندی ها سیستم نگهدارنده مناسب طراحی گردیده است. همچنین با توجه به عمق کم حفاری و ناپیوستگی های منطقه آنالیز ناپایداری ساختاری در راستای محور تونل انجام گردیده و گوه های ناپایدار احتمالی به کمک نرم افزار مربوطه شناسایی شده اند. نهایتاً با استفاده از نرم افزار که بر پایه روش اجزاء محدود می باشد، تونل مورد نظر تحلیل شده است. در طی این تحلیل مناطق دارای بیشترین و کمترین جابجائی و همچنین نقاط تمرکز تنش شناسائی شده است و بر اساس آن سیستم نگهدارنده تونل مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: خرسان، دگرشکلی پذیری، زمین شناسی مهندسی، ساختمان سد، طبقه بندی سنگ، مقاومت

مقدمه

تونل انحراف از بین لایه های آهکی سازند آسماری عبور می کند. این سازند از سنگهای کرم رنگ، توده ای و بسیار مقاوم که دارای تخلخل و شکستگی بوده که در بخش زیرین از آهکهای مارنی به همراه دولومیت و در بخش بالایی از آهک ضخیم لایه با کمی میان لایه مارنی تشکیل گردیده است. سن این سازند الیگوسن تا میوسن میانی در نظر گرفته شده است. با توجه به ساختمان زمین شناسی منطقه، حفاری این تونل ابتدا به منظور ایجاد سازه ورودی در بخش آسماری بالایی انجام خواهد شد و پس از برداشت روبره، تا متر ۹۰ متری در همین واحد سنگی حفاری می شود. پس از این متر ۶۰ تا ۷۰ متری در بخش آسماری پایینی حفاری انجام خواهد گرفت (اجل لوئیان و دادخواه ۱۳۸۳).

درزه نگاری منطقه مورد مطالعه

به منظور شناخت لایه های زیرین تعداد ۷ حلقه گمانه بر روی محور تونل اجرا گردیده است، که در مجموع ۶۲۴ متر حفاری انجام گرفته است که عمق گمانه ها بین ۲۰ تا ۱۲۰ متر می باشد. بر اساس گمانه های حفر شده در مسیر تونل، میانگین RQD برای توده سنگهای در بر گیرنده مسیر تونل معادل ۶۰ تا ۷۰٪ می باشد و شاخص کیفیت سنگ نسبتاً خوب است. همچنین ناپیوستگی های مسیر تونل اعم از

تونل انحراف یکی از سازه هایی است که باید در مراحل نخست ساخت یک سد اجرا گردد. در همین راستا جهت ساخت سد خرسان ۳ بر روی رودخانه خرسان که یکی از سر شاخه های اصلی رودخانه کارون می باشد این سازه طراحی شده است. این تونل انحراف دارای طولی برابر ۷۸۴ متر و قطری معادل ۱۳ متر طراحی گردیده است.

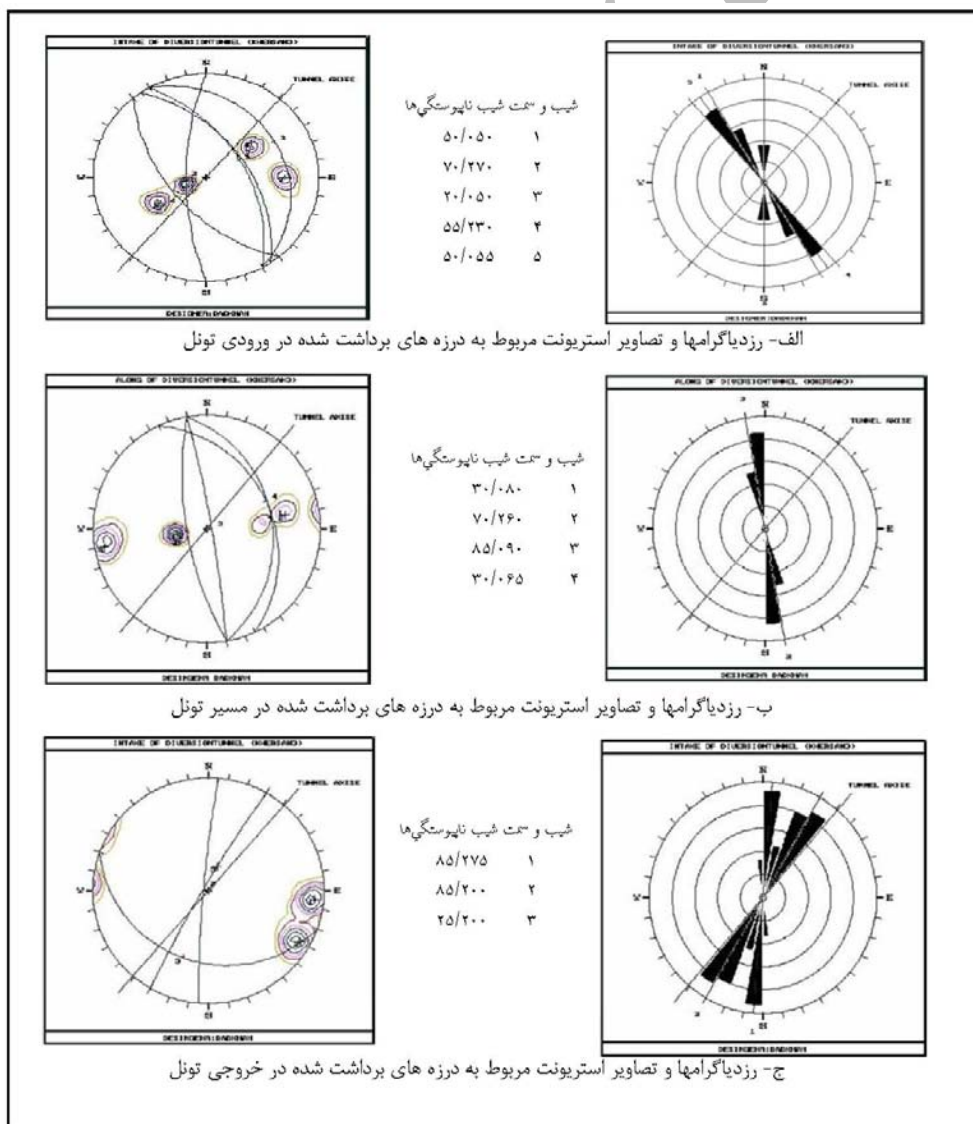
منطقه مورد مطالعه در ۵۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان لردگان از توابع استان چهار محال و بختیاری، در دامنه شمال شرق زاگرس چین خورده با طول جغرافیایی 25° ، $58'$ ، 50° و عرض جغرافیایی 31° ، $14'$ ، $50''$ واقع گردیده است. این منطقه در محدوده زاگرس چین خورده قرار دارد و از توالی ضخیمی از سنگهای رسوبی تشکیل شده است که در اثر کوهزایی آلپی در زمان پلیوسن به شکل مجموعه ای از طاقدیس و ناودیس در آمده است. چین خوردگی های این منطقه دارای روند شمال غرب- جنوب شرق می باشند. مهمترین گسل منطقه، گسل طلایه می باشد که بصورت گسل رانده دارای زاویه شیبی بسمت جنوب غرب بوده و در حدود ۲۵ کیلومتر طول دارد. سایت مورد مطالعه در فاصله یک کیلومتری شمال غرب آن واقع شده است. محل سد و تونل انحراف بر روی یال غربی یکی از طاقدیس ها بنام لکی می باشد.

خروجی تونل متفاوت می‌باشد. با توجه به جهت یافتگی درزه‌ها نسبت به امتداد حفاری و لیتولوژی منطقه و عمق کم تونل (کمتر از ۱۰۰ متر) بیشترین نوع ناپایداری لغزشی و ریزش‌های گوه‌سنگی از دیواره و سقف تونل می‌باشد (اجل لوئیان و دادخواه ۱۳۸۳). این موضوع در دیواره و سقف تونل قابل بررسی می‌باشد و در بخش‌های بعدی به تفصیل توضیح داده می‌شود.

با توجه به عمق کم حفاری تونل و شرایط توده سنگ‌های درزه دار، به نظر می‌رسد بارزترین گسیختگی از نوع سقوط گوه‌ها و یا ریزش قطعات سنگی از دیواره می‌باشد. اینگونه ریزش‌ها در اثر تقاطع چند سیستم ناپیوستگی پس از حفاری و ایجاد سطح آزاد بوجود می‌آیند. قبل از هرگونه حفاری در این مناطق بایستی در ابتدا گوه‌های احتمالی را شناسایی نموده و سپس جهت جلوگیری از سقوط گوه‌های سست سیستم نگهدارنده را بر اساس جنس سنگ، وزن گوه و دیگر شرایط زمین شناسی طراحی نمود. بر این اساس جهت تشخیص گوه‌های

درزه‌ها و لایه بندی‌ها بر اساس برداشت‌های صحرایی به روش آماری و بر اساس استاندارد ASTM D4879-89 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. به همین منظور پارامترهایی نظیر شیب، جهت شیب، بازشدگی، پرشدگی، فاصله داری، زبری، شرایط آبهای زیر زمینی و غیره مد نظر قرار گرفته شده است.

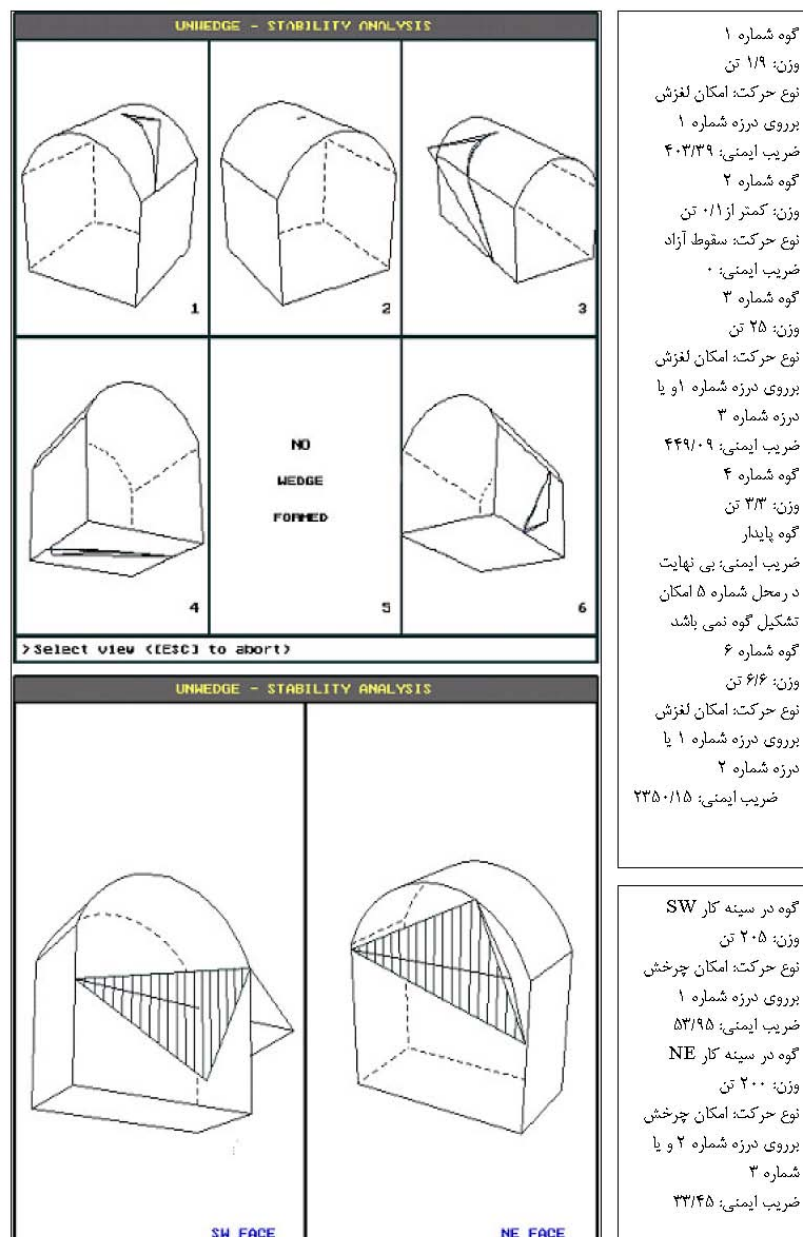
در مجموع حدود ۲۷۱ درزه در محدوده مورد مطالعه برداشت شده است. در بخش ورودی حدود ۱۰۰ درزه و در مسیر تونل ۱۲۰ درزه و در بخش خروجی حدود ۵۱ درزه مورد بررسی واقع شده است. درزه‌های برداشت شده عمدتاً از کلسیت، رس و اکسید آهن پر شده و سطح آنها مسطح و زبر و گاهی همراه خش لغزش می‌باشد و از لحاظ رطوبت به جز موارد محدود غالباً خشک و نمناک می‌باشند. تصاویر استریونت به همراه نمودارهای رزیدیاگرام درزه‌های برداشت شده در ورودی، مسیر و خروجی تونل در شکل ۱ آورده شده است. در طی برداشت درزه‌ها به علت وجود طاق‌دیس لکی سمت شیب در ورودی و



شکل ۱- رزیدیاگرامها و تصاویر استریونت مربوط به درزه‌های برداشت شده در منطقه مورد مطالعه.

گیری شوند و یا از سیم توری و یا شاتکریت استفاده گردد. بدین ترتیب نیازی به نگهداری سیستماتیک نمی‌باشد. پس از انجام محاسبات، بزرگترین گوه‌هایی که در شرایط هندسی موجود می‌توانند شکل بگیرند شناسایی گردیده و سپس مناسبترین سیستم مقاوم سازی را برای پایداری توده سنگ در برگیرنده تونل به گونه ای بر میگزینند که بیشترین پایداری و کمترین هزینه را در بر داشته باشد. عمده ترین سیستم نگهدارنده برای گوه‌های بزرگ پیچ سنگ و برای گوه‌های کوچک بتن پاشیده شده و شبکه سیمی می‌باشد (قارونی و همزه ابیازنی ۱۳۸۰).

بالقوه از نرم افزار UNWEDGE 2.21 استفاده گردیده است. در این نرم افزار داده‌های ورودی شامل شیب، سمت شیب، میزان بازشدگی، پرشدگی، زبری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد (مدنی ۱۳۷۹ و ۱۳۸۱). شکل ۲ نمونه ای از گوه های شناسایی شده در سازه زیر زمینی مورد نظر توسط این نرم افزار را نشان می‌دهد. حال با در نظر گرفتن نتایج حاصل از تحلیل توسط نرم افزار می‌توان دریافت که گوه های ناپایدار اگرچه به تعداد زیاد هستند ولی حجم آنها در مقایسه با کل توده سنگ اطراف کم بوده و دارای وزنی کمتر از یک تن می باشند که لازم است سریعاً پس از حفاری لقی



شکل ۲- نمونه از گوه های شناسایی شده در مسیر تونل.

روشهای تجربی تحلیل پایداری

سیستم‌های طبقه بندی RMR (Bieniawski 1976, 1989)، Q (Barton et al. 1980) و GSI (Hoek & Brown, 1997) جهت طبقه بندی سنگهای در برگیرنده تونل استفاده گردیده است.

طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR)

جهت رده بندی توده سنگ در بخش ورودی، مسیر تونل و خروجی از سیستم طبقه بندی اصلاح شده RMR و یا CSIR در سال ۱۹۸۹ استفاده گردیده است. جدول ۱ میزان RMR بدست آمده در بخشهای مختلف را نشان می‌دهد (اجل لوئیان و محمدی ۱۳۸۲، طاهریان ۱۳۸۱).

جدول ۱- طبقه بندی منطقه مورد مطالعه بر اساس RMR.

پارامترها	ورودی		مسیر تونل		خروجی	
	مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز
مقاومت تراکمی تک محوری (Mpa)	۶۴	۷	۷۱	۷	۶۲	۷
RQD	۶۵	۱۳	۷۰	۱۳	۶۷	۱۳
فاصله ناپیوستگی (mm)	۶۰	۹	۶۰	۸	۶۰	۹
شرایط ناپیوستگی	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
آب زیرزمینی	خشک	۱۵	خشک	۱۵	خشک	۱۵
تعدیل برای جهت یابی درزه	مناسب	-۵	مطلوب	-۲	مناسب	-۵
RMR	۶۴	۶۶	۶۶	۶۶	۶۴	۶۴
کلاس	سنگ خوب (۲)	سنگ خوب (۲)	سنگ خوب (۲)	سنگ خوب (۲)	سنگ خوب (۲)	سنگ خوب (۲)
متوسط زمان خود پایداری	برای دهانه ۱۵ متری کمتر از یک ماه	برای دهانه ۱۵ متری کمتر از یک ماه	برای دهانه ۱۵ متری کمتر از یک ماه	برای دهانه ۱۵ متری کمتر از یک ماه	برای دهانه ۱۵ متری کمتر از یک ماه	برای دهانه ۱۵ متری کمتر از یک ماه
چسبندگی توده سنگ (Kpa)	۲۰۰-۳۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۲۰۰-۳۰۰
زاویه اصطکاک (درجه)	۴۰-۴۵	۴۰-۴۵	۴۰-۴۵	۴۰-۴۵	۴۰-۴۵	۴۰-۴۵

تعیین بار مؤثر و میزان ارتفاع بار سنگ بر اساس RMR میزان بار مؤثر بر سیستم نگهدارنده و همچنین ارتفاع بار سنگ را به کمک فرمولهای زیر تعیین می‌نماییم (جدول ۲؛ Bieniawski 1989).

$$P = H \times \gamma B \quad (۱)$$

$$H = \frac{100 - RMR}{100} \quad (۲)$$

جدول ۲- میزان ارتفاع بار سنگ و فشار مؤثر بر اساس رده بندی ژئومکانیکی.

ارتفاع بار سنگ بر حسب متر	فشار مؤثر بر سیستم نگهدارنده بر حسب کیلو نیوتن	موقعیت
۵/۱	۱۴/۵۸	ورودی
۵/۴	۱۳/۷۷	مسیر تونل
۵/۱	۱۴/۵۸	خروجی

با داشتن میزان RMR و پارامترهای تعیین شده در این قسمت توصیه‌های لازم جهت حفاری و نگهداری تونل تعیین شده و نتیجه در جدول ۳ آورده شده است.

شاخص کیفی تونل زنی در سنگ (Q)

جهت رده بندی توده سنگ در بخش ورودی، مسیر تونل و خروجی از سیستم طبقه بندی Q استفاده گردیده است. جدول ۴ میزان بدست آمده Q در بخشهای مختلف را نشان می‌دهد (Barton et al. 1980). بر آورد نگهدارنده لازم بر اساس سیستم Q جهت تحلیل و توصیف سیستم‌های مورد نیاز جهت پایداری تونل پس از حفاری نیاز به بعد معادل حفاری می‌باشد و بر این اساس میزان عددی Q را به نگهدارنده تونل مرتبط می‌سازد. این پارامتر باتقسیم دهانه (قطر و یا ارتفاع دیواره حفاری) بر کمیت نسبت نگهدارنده حفاری ESR بدست می‌آید (Hoek & Brown 1980). با توجه به میزان بعد معادل بدست آمده و مقدار Q و به کمک نمودار مربوطه حداکثر دهانه بدون نگهدارنده تعیین می‌نماییم، همچنین جهت تعیین میزان دهانه بدون نگهدارنده و فشار تکیه گاهی دائمی از فرمولهای زیر استفاده می‌نماییم. نتایج این بخش در جدول ۵ آورده شده است. بر اساس میزان Q توصیه‌های لازم جهت حفاظت از تونل در جدول ۶ آورده شده است (Barton 1995, 1999, 2002).

جدول ۳- سیستم نگهداری پیشنهادی برای تونل بر اساس رده بندی ژئومکانیکی (Bieniawski 1989).

کلاس توده سنگ	حفاری	نگهدارنده
سنگ خوب RMR=80-61	حفاری به صورت تمام مقطع با پیشروی ۱ تا ۱/۵ متر در هر نوبت، به فاصله ۲۰ متری از جبهه کار سیستم نگهدارنده نصب شود	پیچ سنگ به طور موضعی در قسمت تاج تونل پیچ سنگهایی به طول ۳ متر و به فاصله داری ۲/۵ متر و گاه نیز همراه با توری فلزی نصب شود
		بتن پاشیده در صورت لزوم به ضخامت ۵۰ میلیمتر در قسمت تاج
		قاب فلزی نیازی نیست

جدول ۴- طبقه بندی شاخص کیفی تونل زنی در سنگ.

خروجی		مسیر تونل		ورودی		پارامتر
مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز	
۶۲	۶۲	۷۱	۷۱	۶۴	۶۴	RQD
۹	دو دسته درزه به اضافه درزه اتفاقی	۱۲	سه دسته درزه به اضافه درزه اتفاقی	۱۵	چهار دسته درزه	ضریب مربوط به تعداد درزه ها
۱/۵	زبر و نامنظم، مسطح	۱/۵	زبر و نامنظم، مسطح	۱/۵	زبر و نامنظم، مسطح	ضریب مربوط به زبری درزه ها
۰/۱۷۵	ماده پر کننده (کلسیت) به خوبی جوش خورده و سخت و غیر قابل نرم شدن	۰/۱۷۵	ماده پر کننده (کلسیت) به خوبی جوش خورده و سخت و غیر قابل نرم شدن	۰/۱۷۵	ماده پر کننده (کلسیت) به خوبی جوش خورده و سخت و غیر قابل نرم شدن	ضریب مربوط به دگرسانی درزه ها
۱	حفاری در محیط خشک و کمتر از ۵ لیتر در دقیقه بطور موضعی	۱	حفاری در محیط خشک و کمتر از ۵ لیتر در دقیقه بطور موضعی	۱	حفاری در محیط خشک و کمتر از ۵ لیتر در دقیقه بطور موضعی	ضریب مربوط به کاهش آب درزه ها
۱	تنش متوسط	۱	تنش متوسط	۱	تنش متوسط	ضریب مربوط به کاهش تنش
۱۳/۷۷		۱۱/۸۳		۸/۵۳		Q
خوب		خوب		متوسط		کلاس

سنگهای مسیر تونل، از لحاظ ساختاری به صورت بلوکی تا خیلی بلوکی که قفل شدگی قطعات خوب بوده کمی دست خورده که از تقاطع ۴ سری ناپیوستگی تشکیل شده است و سطوح درزهها زبر با هوازگی خیلی کم میباشند (شکل ۳). به این ترتیب دامنه مقادیر GSI در حدود ۴۶-۵۸ است که تفاوت کمی با برآورد GSI از طبقه بندی های RMR و Q قابل مقایسه است.

تحلیل عددی به کمک نرم افزار Phase²

جهت بررسی میزان پایداری توده سنگ در بر گیرنده تونل و مدلسازی رفتار توده های سنگی پس از شکستگی و نیز بر هم کنش سنگ و سیستم نگهداری بهترین روش استفاده از روشهای عددی کامپیوتری به نظر می رسد. در این راستا از نرم افزار Phase² کمک گرفته شده است که بر پایه اجزای محدود (Finite Element) می باشد. در این روش توده سنگ مورد مطالعه را به قطعات کوچکتری تقسیم می کنند که هر کدام به عنوان یک عنصر نام می گیرند. همچنین فرض می گردد که این عناصر دارای خواص مخصوص به خود بوده و در نقاط مشخصی که گره نامیده می شوند به یکدیگر متصل می شوند. جابجایی ها در محل گره ها اتفاق می افتد، بنابراین در این روش توده سنگی که بی نهایت درجه آزادی دارد به جسمی شبیه سازی می شود که تنها ۲ تا ۳ برابر تعداد گره ها درجه آزادی دارد. (مدنی-۱۳۸۱؛ قارونی و همکاران ۱۳۸۰، مدنی ۱۳۷۹، Varadarajan et al. 2001). شکل ۴ توده سنگ در بر گیرنده فضای حفاری شده که به عناصر کوچکتری المان بندی شده است را نشان می دهد.

به طور کلی برای تحلیل و بررسی سازه های زیر زمینی محاسبه تنشهای بر جا از ابتدایی ترین مراحل می باشد. مقدار عددی تنش

$$D_{max} = 2ESR.Q^{0.4} \quad (۳)$$

$$P_{roof} = \frac{200}{J_r} . Q^{1/3} \quad (۴)$$

همانگونه که پیش بینی می شد برآورد کیفیت توده سنگ از طریق Q تقریباً یک درجه ضعیف تر از روش RMR نشان می دهد که به این ترتیب سیستم نگهداری پیش بینی شده توسط Q از RMR کمی سنگین تر است.

جدول ۵- میزان فشار تکیه گاهی و ماکزیمم دهانه بدون نگهدارنده بر اساس رده بندی Q.

موقعیت	ماکزیمم دهانه بدون نگهدارنده (متر)	فشار تکیه گاهی دائمی (Mpa)	موقعیت
۷/۵	۰/۶۴	ورودی	
۸/۶	۰/۵۷	مسیر تونل	
۹/۱	۰/۵۴	خروجی	

جدول ۶- سیستم نگهدارنده پیشنهادی برای تونل بر اساس رده بندی Q.

موقعیت	سیستم نگهدارنده
ورودی	پیچ سنگ کششی به طور منظم و گسترده به فاصله ۱/۵-۱/۳ متری یا شاتکریت به ضخامت ۴-۵ سانتیمتر
مسیر تونل	پیچ سنگ کششی به طور منظم و گسترده و به فاصله ۲-۱/۵ متری یا شاتکریت به ضخامت کمتر از ۴ سانتیمتر
خروجی	پیچ سنگ کششی به طور منظم و گسترده و به فاصله ۲-۱/۸ متری یا شاتکریت به ضخامت کمتر از ۴ سانتیمتر

اندیس مقاومت زمین شناسی

این سیستم توسط هوک و براون (۱۹۹۷) ابداع شده است (Hoek & Brown 1997). در این روش بر حسب تعداد دسته درزه و شرایط درزهها (از قبیل زبری و درجه هوازگی و دگرسانی) توده سنگ اندیس مقاومت زمین شناسی GSI را تعیین می نمائیم. با توجه به شرایط توده

$$K = 0.25 + 7E_i \left(1 + \frac{1}{Z}\right) \quad (5)$$

بنابراین میزان تنش افقی ۱/۱۴ برابر تنش قائم در نظر گرفته می‌شود.

مدل سازی توده سنگهای در بر گیرنده تونل انحراف

جهت بررسی و مدل سازی تونل نیاز به پارامترهای مقاومتی توده سنگ از قبیل میزان مدول تغییر شکل پذیری، نسبت پواسان، ثابت های هوک-براون و غیره می‌باشد. با توجه به اینکه روش حفاری به صورت انفجاری می‌باشد و نتیجتاً خواص ژئومکانیکی توده سنگ را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد لذا بایستی این تغییرات در حین مراحل تحلیل مد نظر قرار گیرد. حال با توجه به شرایط زمین شناسی توده سنگ و وجود ناپیوستگی ها میزان فاکتور تاثیر انفجار (رهایی تنش بر روی توده سنگ) معادل $D=0.5$ در نظر گرفته می‌شود.

بر آورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ

در این راستا بر روی تعدادی نمونه حاصل از مغزه های حفاری آزمایش تراکمی تک محوری، آزمایش تراکمی ۳ محوری، آزمایش کشش برزیلین و آزمایش بارنقطه‌ای بر اساس استانداردهای ISRM انجام گردیده است. در این سایت به دلیل عدم انجام آزمایشات برجا مدول الاستیسیته توده سنگ و سایر پارامترهای توده سنگ تعیین نشده است که بر اساس اطلاعات صحرائی و برداشت‌های این پارامترها برداشت شده است. حال به کمک اطلاعات حاصل از طبقه بندی و انجام آزمایشات بر روی مغزه های حفاری می‌توان خواص مقاومتی و تغییر شکل توده سنگها را در محل تعیین نمود. در این راستا معیار هوک و براون برای سنگ های دست خورده (مؤثر از انفجار) مورد استفاده قرار گرفته که بصورت معادله زیر بیان می‌شود (Hoek 2002). جدول ۷ پارامترهای مقاومتی در حالت دست خورده را نشان می‌دهد.

جدول ۷- پارامترهای مقاومتی در حالت دست خورده ($D=0.5$).






پارامتر موقعیت	m_b	m_i	s	a	E_m (Gpa)	δ_C (Mpa)	δ_t (Mpa)	c (Mpa)	ϕ (deg)
ورودی	1.2	12	0.002	0.5	7.287	3	-0.1	0.5	53.9
مسیر تونل	1.2	12	0.001	0.5	6.880	2.8	-0.1	0.5	53.6
خروجی	1.1	12	0.001	0.5	6.131	2.4	-0.1	0.5	53

$$\delta_1 = \delta_3 + \delta_C \left[m_b \frac{\delta_3}{\delta_C} + S \right]^a \quad (7)$$

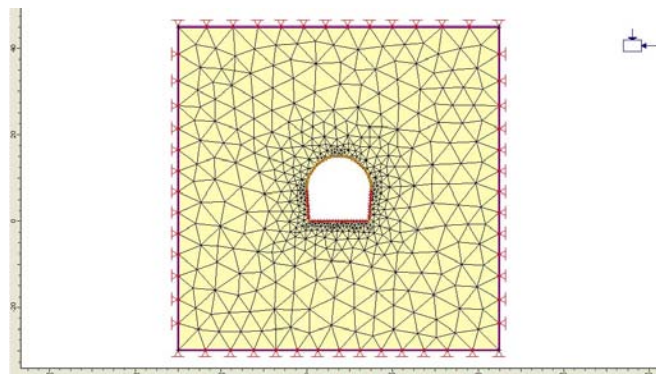
در رابطه بالا m_b مقدار ثابت m برای توده سنگ می‌باشد و توسط رابطه ذیل بدست می‌آید.

$$m_b = m_i \exp \left[\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right] \quad (8)$$

در رابطه بالا s و a ثابت های توده سنگ می‌باشد که توسط روابط زیر

Geological Strength Index From the description of structure and surface conditions of the rock mass, pick an appropriate box in this chart. Estimate the average value to the Geological Strength Index (GSI) from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range of GSI from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38. It is also important to recognize that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of individual blocks is small compared with the size of the excavation under consideration.	Surface conditions				
	Very good Very rough and fresh unweathered surfaces	Good Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Fair Smooth, moderately weathered and altered surfaces	Poor Stick-slicked or highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	Very poor Stick-slicked, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
Structure	Decreasing surface quality →				
	80	70			
		60	50		
			40		
				30	20
	N/A	N/A			10
					5

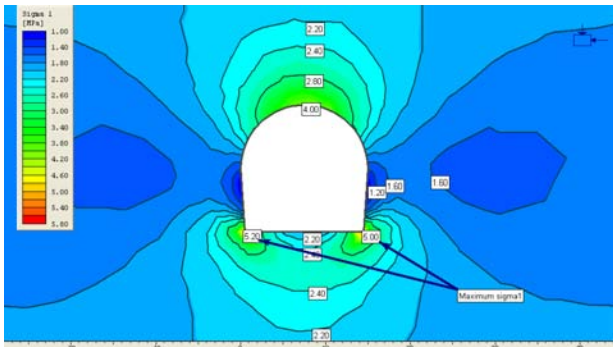
شکل ۳- تعیین شاخص GSI بر اساس بررسی های صحرائی منطقه مورد مطالعه.



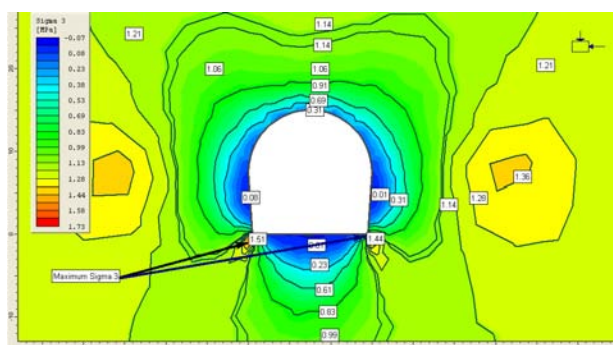
شکل ۴- شبکه المان بندی شده در اطراف فضای حفاری شده.

عمودی δ_v را با در نظر گرفتن میزان روباره و همچنین وزن واحد حجم ذرات قابل محاسبه می‌باشد. تعیین تنش افقی δ_H به دلیل وجود تنشهای حاصل از فرآیندهای تکتونیک؛ زمین‌شناسی و تغییرات توپوگرافی بسیار مشکل می‌باشد. جهت تعیین مقدار تنش افقی (با در نظر گرفتن گسل رانده طلایه که در فاصله یک کیلومتری سایت مورد نظر می‌باشد) می‌توان از فرمول ذیل استفاده نمود.

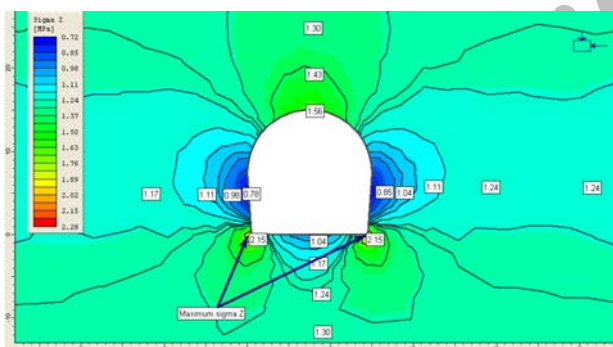
تعیین می گردد. زدن را انجام داد و در صورت نیاز می توان تحلیل مجدد تونل را با در نظر گرفتن پیچ سنگ مذکور بعمل آورد.



شکل ۵- میزان تنش حداکثر القایی در اثر حفاری فضای زیرزمینی.



شکل ۶- میزان تنش حداقل در اثر حفاری فضای زیرزمینی.



شکل ۷- میزان تنش متوسط در اثر حفاری فضای زیرزمینی.

با استفاده از نرم افزار $Phase^2$ چگونگی جابجایی در نقاط مختلف اطراف تونل قابل ارزیابی است. مقدار جابجایی حداکثر افقی (دیواره جانبی) و حداکثر عمودی (کف تونل) تقریباً همخوانی دارند (۳/۳ میلیمتر افقی و ۲/۲۸ میلیمتر عمودی). دلیل این را می توان شکل تقریباً متقارن تونل در نظر گرفت. مقایسه جابجایی کل با جابجایی عمودی و افقی نشان می دهد که بیشترین جابجایی در دیواره به صورت افقی و در کف و تاج ناشی از جابجایی عمودی است (اشکال ۸، ۹ و ۱۰). در مورد محدوده بحرانی نیز همانگونه که در بخش تنش اصلی ذکر شد، نقاط بحرانی تونل از لحاظ تسلیم و گسیختگی بخشهای تاج

$$s = \exp\left[\frac{GSI - 100}{28}\right] \quad (9)$$

$$a = \frac{1}{2} - \frac{1}{6} \left[e^{GSI/15} - e^{-20/3} \right] \quad (10)$$

در روابط بالا m_i ، GSI عبارتند از ثابت هوک-براون و اندیس مقاومت زمین شناسی می باشند.

همچنین مقاومت فشاری تک محوری (با فرض $\delta_3 = 0$) و مقاومت کششی (با فرض $\delta_1 = \delta_3 = \delta_t$) سنگ با استفاده از فرمول های ذیل قابل محاسبه می باشد.

$$\delta_1 = \delta_c \cdot S^a \quad (11)$$

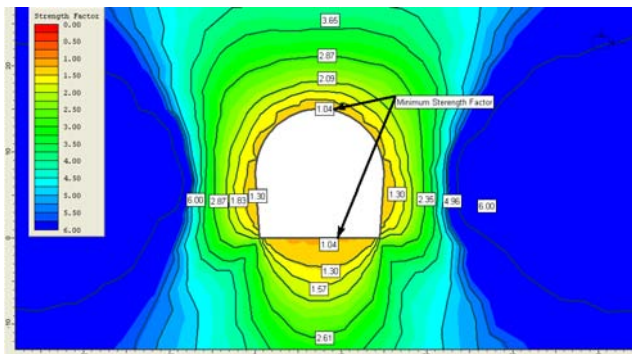
$$\delta_t = \frac{s \delta_c}{m_b} \quad (12)$$

لازم به ذکر است مقدار مدول الاستیک از روابط مختلف تجربی قابل حصول می باشد. از طریق رابطه بنیادسکی حداقل مقدار (دست پائین) و از طریق رابطه Q مقدار حداکثر (دست بالا) بدست می آید. تحلیل عددی به کمک نرم افزار $Phase^2$ نیازمند اطلاعات ورودی (خواص توده سنگ) است که این خواص نیز عمدتاً به صورت ثابت های معیار هوک-براون می باشد، بنابراین در این مقاله ترجیح داده شده تا از رابطه هوک-براون برای تعیین مدول الاستیسیته که بر مبنای GSI است، استفاده گردد.

نتایج تحلیل عددی توسط نرم افزار $Phase^2$

با استفاده از نرم افزار $Phase^2$ چگونگی توزیع تنشهای اصلی در نقاط مختلف اطراف تونل نشان داده شده است (اشکال ۵، ۶ و ۷). همانطور که مشاهده می گردد بیشترین تمرکز تنش در گوشه های پایینی فضای حفاری شده است. این حالت می تواند ناشی از تمرکز تنش و رها شدن ناگهانی و شدیدتر تنش در این قسمتها باشد. بنابراین بایستی در جهت کاهش این تنش ها در گوشه های پایینی مقطع تمهیدات ترمیمی اندیشیده شود. همچنین در سقف تونل نیز مقادیر تنش های اصلی حداکثر قابل توجه میباشد، در حالیکه در دیواره ها کمترین مقدار تنش مشاهده می شود. چنانچه مقادیر تنش اصلی حداکثر را با مقادیر σ_c توده سنگ مقایسه شود، بطور تخمینی می توان در مورد رفتار توده سنگهای مسیر تونل اظهار نظر نمود. لازم به ذکر است که مقادیر تنش های اصلی متوسط و حداقل در گوشه های تیز تونل نیز قابل توجه می باشد (به ترتیب ۲/۱۵ و ۱/۵۱ مگا پاسکال)، اما در بخش تاج تونل مقدار تنش اصلی حداقل پایین بوده و لذا خطر تسلیم مصالح وجود دارد. برای جلوگیری از این خطر می توان یکسری پیچ سنگ حداقل (مثلاً به فاصله یک متر) در تاج در نظر گرفت به این دلیل که شعاع زون پلاستیک کمتر از یک متر می باشد و در مورد گوشه های تیز تونل نیز می توان عملیات ترمیمی نظیر پخ

آستانه گسیختگی است. لذا بایستی برای این نقاط نگهدارنده و حایل مناسب در نظر گرفته شود. البته نصب یک حایل حداقل (در حد چند پیچ سنگ) کافی می‌باشد. از طرف دیگر چنانچه مشاهده می‌شود فاکتور مقاومت در جداره جانبی تونل معادل $1/3$ می‌باشد که نسبت به تاج و کف تونل بیشتر است و جداره تونل در محدوده نسبتاً مطمئن تری قرار دارد. اگر چه یک حفاظت حداقل (چند پیچ سنگ) می‌تواند جهت اطمینان مفید باشد.



تمهیدات پیشنهادی بنیواسکی در این پروژه در نقاط مورد نیاز کمک گرفته شود.

۳- تحلیل پایداری به کمک نرم افزار $Pahse^2$ ، که بر اساس ویژگیهای مقاومتی توده سنگ و شرایط تنش موجود در منطقه می باشد، انجام گردید. طبق نتایج بدست آمده مشاهده می گردد که بیشترین جابجایی افقی و عمودی در دیواره تونل و به میزان ۳/۴ میلیمتر و در کف تونل به مقدار ۲/۲۸ میلیمتر می باشد که بسیار جزئی می باشد. همچنین تمرکز تنش در گوشه های فضای حفاری شده بوجود آمده است. به این ترتیب احتیاج به نصب نگهدارنده سیستماتیک نمی باشد و تنها در نقاطی از تاج که گسیخته می شوند پیچ سنگ با طول ۴ متر در صورت نیاز پیش بینی می گردد. در نهایت از دید روشهای تجربی نگهداری مورد نیاز است اگرچه روش عددی آنرا توصیه نمی کند. در حقیقت روش تجربی سیستم نگهداری را به صورت محافظه کارانه در نظر می گیرد.

طراحی سیستم نگهدارنده استفاده گردیده است.

۱- به کمک نرم افزار $unwedge$ تحلیل پایداری انجام گردیده و گوه هایی در مسیر تونل شناسایی شد. اگرچه تعداد این گوه ها زیاد هستند ولی حجم آنها بسیار کم بوده و دارای فاکتور مقاومت کمی می باشند. اصولاً دارای وزنی کمتر از یک تن بوده و برای تثبیت آنها می توان از شاتکریت استفاده کرده و یا لقی گیری نمود. بنابراین نیاز به نگهداری سیستماتیک نمی باشد (Bhasin & Grimstad, 1996).

۲- توجه به سیستم نگهدارنده پیشنهادی توسط دو روش تجربی RMR و Q ملاحظه می گردد که در سیستم پیشنهادی بنیواسکی به شرایط توده سنگ در برگیرنده به صورت واقع بینانه تری توجه می گردد که این موضوع با توجه به داده ها و نتایج حاصل از تحلیل توسط روش عددی به کمک نرم افزار $Pahse^2$ به وضوح دیده میشود. در روش پیشنهادی بارتن شرایط بحرانی تر و ارائه پیشنهادات جهت سیستم نگهدارنده محتاطانه تر می باشد. حال با در نظر گرفتن شرایط پروژه و فاکتور مقاومت مورد نیاز به نظر می رسد که بهتر است از

منابع

- اجل لوثیان ر.، محمدی س.د. ۱۳۸۲: رده بندی توده سنگ، ترجمه، انتشارات فن آوران.
- اجل لوثیان ر.، دادخواه ر. ۱۳۸۳: بررسی علل ریزش در تونل چشمه لنگان، بیست و دومین گردهمایی علوم زمین.
- اجل لوثیان ر.، دادخواه ر.، شیریان ف. ۱۳۸۳: بررسی ویژگیهای زمین شناسی مهندسی سد خرسان ۳ هشتمین همایش زمین شناسی ایران، شاهرود. طاهریان ع. ۱۳۸۱: مهندسی سنگ کاربردی، ترجمه، انتشارات دهخدا.
- قارونی نیک م.، همزه ایبازی م. ۱۳۸۰: نگهداری حفاریات زیر زمینی در سنگهای سخت، ترجمه، انتشارات نص.
- مدنی ح. ۱۳۸۱: تونلسازی (طراحی و اجرای سیستم نگهدارنده)، جلد چهارم، تالیف، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- مدنی ح. ۱۳۷۹: تونلسازی (تحلیل پایداری)، جلد سوم، تالیف، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- Bieniawski Z.T. 1976: Rock mass classification in rock engineering. *In Exploration for Rock Engineering*. **1**: 97-106.
- Bieniawski Z.T. 1989: Engineering Rock Mass Classifications. Wiley, New York. 251 pages.
- Bieniawski Z.T. 1984: Rock Mechanics Design in Mining & Tunneling: A. A. Balkema, 269 pages.
- Barton N., Loset-Lien R., Lunde J. 1980: Application of the Q-system in design decisions. *In Subsurface spsce*. **2**: 553-561.
- Barton N. 1995: The influence of joint properties in modeling jointed rock masses. Keynote lecture, Proc. 8th ISRM Cong., Tokyo. **3**: 1023-1032.
- Barton N. 1999: General report concerning some 20th Century lessons and 21st Century challenges in applied rock mechanics, safety and control of the environment. Gen. Rept., Theme 1, Proc. 9th ISRM Cong., Paris. **3**: 21.
- Barton N. 2002: Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics.*, Vol. 39, 2002. pp. 185-216.
- Bhasin R., Grimstad E. 1996: The use of stress- strength relationships in the assessment of tunnel stability. *Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics.* Vol. 33. No. 7. pp. 93-98.
- Hoek E., Brown E.T. 1997: Practical estimates or rock mass strength. *Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts*. **34**: 1165-1186.
- Hoek E., Brown E.T. 1980: Underground Excavations in Rock. London, The Institute of Mining and Metallurgy, London, England.
- Hoek E., 2002: A Brief History of the Hoek-Brown Failure Criterion. Accessed through the program RocLab, pp. 4.
- Varadarajan A., Sharma K.G., Desai C.S., Hashemi M. 2001: Analysis of a powerhouse cavern in the Himalaya. *Int. J. Geomech.* **1**: 109-127.