

ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ مسیر تونل انتقال سد درونگر جهت طراحی سیستم نگهدارنده

محمد غفوری^{*} ۱، غلامرضا لشکری پور^۲، صادق طریق ازلی^۳

پذیرش مقاله: ۸۷/۸/۱

دریافت مقاله: ۸۶/۳/۶

چکیده:

در این مقاله پارامترهای ژئومکانیکی توده های سنگی و تمهیدات سیستم نگهدارنده مقدماتی برای تونل انتقال سد درونگر، بر اساس دو روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در روش تجربی از سه سیستم طبقه بندی RMR (طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ)، Q (شاخص کیفی تونل بری) و GSI (اندیس مقاومت زمین شناسی) به منظور برآورد کیفیت توده سنگهای در برگیرنده تونل انتقال و برآورد سیستم نگهدارنده مقدماتی استفاده شده است. همچنین در روش عددی از روش اجزای مشخص (نرم افزار UDEC) استفاده شده است. آزمایش های مقاومت فشاری تک محوره و سه محوره سنگ بکر، مدول الاستیسیته، وزن مخصوص، تخلخل و درصد جذب آب بر روی نمونه های سنگی بدست آمده از حفاری، در آزمایشگاه مکانیک سنگ انجام شد. همچنین به منظور تخمین پارامترهای مقاومتی توده سنگی (مانند مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته توده سنگ، ثابت های هوک - بران و پارامترهای مقاومتی موهر-کلمب) از معیار تجربی هوک - بران استفاده شده است. در نهایت اینکه با استفاده از دو روش تجربی و عددی بر میزان دقت و اعتمادپذیری طراحی تونل افزوده شده است.

کلید واژه ها: ژئومکانیک، توده سنگ، تونل انتقال آب، اجزای مشخص، مقاومت

۱- استاد، گروه زمین شناسی دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد ghafoori@ferdowsi.um.ac.ir

۲- استاد، گروه زمین شناسی دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد

۳- کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد

*مسئول مکاتبات

مقدمه

پروژه سد درونگر و ابنیه‌های وابسته به آن در فاصله ۳۵ کیلومتری شمال غرب شهر درگز در شمال استان خراسان رضوی در دست اجراست. این پروژه شامل تونل انتقال آب، کانال روباز و سد درونگر می‌باشد. تونل انتقال آب برای انحراف سیلاب‌ها در زمان احداث سد و انتقال آب از مخزن سد در طول عمر مفید سد طراحی شده است. تونل مزبور دارای طول ۲۰۵ متر و روباره‌ای حدود ۷۰ متر بوده و توده سنگ‌های مسیر تونل نیز عمدتاً از ماسه‌سنگ و سنگ آهک مارنی با کیفیت متوسط تشکیل شده است. در قسمتی از مسیر تونل، پهنه‌ای خرد شده همراه با یک گسل وجود دارد که توسط تونل قطع می‌گردد. مقطع تونل با توجه به نیازهای طرح به شکل D با عرض و ارتفاع ۵/۲ متر و شعاع قوس طاق ۲/۶ متر طراحی شده است. همچنین برای کنترل جریان آب ورودی، در کیلومتر ۱۴۰+ تا ۱۵۲+ اتاق شیر کنترل اضطراری پیش‌بینی شده که عرض تونل در این مقطع به ۶/۲ متر و ارتفاع آن به ۸/۲ متر افزایش می‌یابد.

زمین‌شناسی مسیر تونل

بررسی‌های زمین‌شناسی صحرایی و حفاری‌های انجام شده نشان می‌دهد که مسیر پیشنهادی جهت احداث تونل از واحدهای ماسه سنگی آهکی سازند اتامیر (Kat)، آهک‌های مارنی سازند آبدراز (Kad) متعلق به کرتاسه بالایی، کنگلومرای سست متعلق به پلیو-پلیوستوسن (PLQ) و رسوبات واریزه‌ای (Qd)، تشکیل شده است. همچنین بر اساس مطالعات صحرایی و نتایج حاصل از گمانه‌های اکتشافی، یک گسل در محدوده مسیر تونل شناسایی شده است. همانطور که در (شکل ۱) مشاهده می‌شود، گسل مذکور با راستای کلی شمال غربی- جنوب شرقی و شیبی حدود ۸۰ تا ۸۵، توده سنگی مسیر تونل را در کیلومتر ۲۰۰+ تا ۲۲۰+ به شدت تحت تاثیر قرار داده و باعث تغییر شیب لایه‌ها، خردشدگی و کاهش مقاومت توده سنگ شده است.

در محدوده مورد مطالعه، کنگلومرای پلیو- پلیوستوسن (PLQ) معمولاً از تراز ۹۱۰ متر به بالا با حداکثر ضخامت ۱۷-۱۶ متر قرار گرفته است. بنابراین با توجه به اینکه امتداد تونل در تراز ۸۶۴ قرار دارد، لذا واحد سنگی مذکور در مسیر تونل قرار نمی‌گیرد. به همین دلیل در ادامه این مطالعات از شرح ویژگی‌های ژئوتکنیکی آن صرف‌نظر شده است.

بررسی زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی توده‌های سنگی مسیر تونل

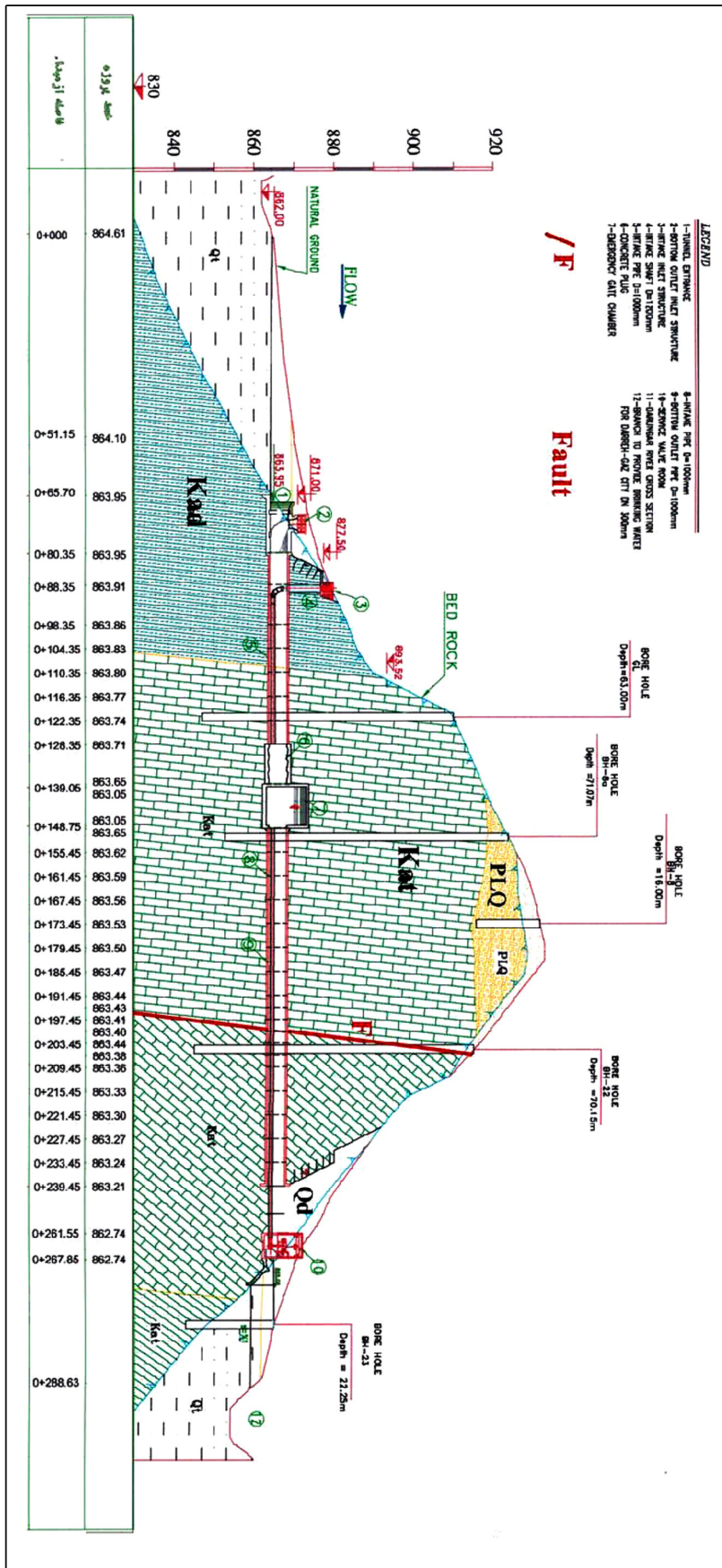
بررسی زمین‌شناسی مهندسی و مطالعات ژئوتکنیکی عمدتاً شامل: برداشت ناپیوستگی‌ها، حفاری‌های اکتشافی، آزمایش‌های تزریق آب (در محل)، آزمون‌های آزمایشگاهی و طبقه‌بندی مهندسی توده‌های سنگی می‌باشد.

برداشت ناپیوستگی‌ها

به طور کلی اطلاعات مربوط به ۱۱۸ ناپیوستگی در طول مسیر تونل (۶۷ ناپیوستگی در محدوده دهانه ورودی و ۵۹ ناپیوستگی نیز در محدوده دهانه خروجی) بر اساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1981) برداشت شده است. تجزیه و تحلیل آماری این اطلاعات به کمک برنامه کامپیوتری DIPS 2 (Diederichs & Hoek, 1989) انجام شده است. بر اساس نتایج بدست آمده سه دسته ناپیوستگی غالب (دو دسته درزه به همراه سیستم لایه بندی) به علاوه یک دسته درزه فرعی در محدوده دهانه ورودی تونل، و سه دسته ناپیوستگی غالب (دو دسته درزه به همراه سیستم لایه‌بندی) در محدوده دهانه خروجی تونل تشخیص داده شد، که نتایج آن بطور خلاصه در (جدول ۱) ارائه شده است.

حفاری‌های اکتشافی

به منظور بررسی شرایط زیرسطحی و همچنین تهیه نمونه‌های سنگی جهت انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، حفاری‌های اکتشافی در محدوده مسیر تونل انتقال آب انجام گرفته است.



شکل ۱- مقطع زمین شناسی تونل انتقال سد درونگر

جدول ۱- موقعیت ناپیوستگیها در مسیر تونل انتقال

موقعیت	نشانه درزه	نوع ناپیوستگی	جهت شیب / شیب
محدوده ورودی تونل	J ₁	لایه بندی	۸۱ / ۲۰۱
	J ₂	درزه غالب	۸۵ / ۲۹۱
	J ₃	درزه غالب	۴۲ / ۲۸۰
محدوده خروجی تونل	J ₄	درزه فرعی	۱۲ / ۷۷
	J ₁	لایه بندی	۴۹ / ۲۰۰
	J ₂	درزه غالب	۷۱ / ۵۳
J ₃	درزه غالب	۷۴ / ۳۰۶	

صفر نیز کاهش یافته است. همچنین مقدار متوسط RQD در گمانه BH-22 در رده نسبتا مناسب قرار می گیرد. در این گمانه نیز در مقاطعی مقادیر RQD بسیار پایین می باشد. همچنین بر اساس نتایج مندرج در (جدول ۲)، مقدار متوسط RQD در گمانه GL-1 در رده نسبتا مناسب قرار می گیرد، ولی لازم به ذکر است که در مقاطعی از این گمانه، به علت برخورد محور گمانه با حفرات ناشی از زون گسلی، هیچ مغزه‌ای بدست نیامده است.

همچنین در زمان حفاری گمانه‌های اکتشافی، ۳۱ آزمایش نفوذپذیری لوژن بر روی توده سنگ های در برگیرنده تونل انتقال آب انجام شد. مقادیر لوژن برای مقاطع مختلف گمانه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. بر طبق نتایج حاصل از جدول ۲، توده سنگ های دربرگیرنده تونل انتقال آب، دارای نفوذپذیری کم (۰-۳ لوژن) تا بسیار زیاد (>۱۰۰ لوژن) می باشد.

مطالعات آزمایشگاهی

به منظور تعیین ویژگی های فیزیکی و مکانیکی واحدهای سنگی دربرگیرنده تونل انتقال آب، آزمون های آزمایشگاهی بر روی نمونه های سنگی بدست آمده از حفاری های اکتشافی، انجام شده است.

بطور کلی ۲۳ گمانه در محل سد و سازه‌های مرتبط با آن حفاری شده، که از میان آنها ۴ گمانه در محدوده مسیر تونل انتقال قرار دارد. گمانه BH-8a همانطور که در (شکل ۱) مشاهده می گردد در کنگلومرای پلیو-پلیستوسن حفاری شد، که به علت خردشدگی کنگلومرا و ریزشی بودن گمانه، تا عمق ۱۶ متر حفاری و فاقد اطلاعات ژئوتکنیکی می باشد.

پارامترهای ژئوتکنیکی بدست آمده از حفاری های اکتشافی (مانند مقدار RQD و لوژن) در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج مندرج در این جدول، مقدار متوسط RQD در گمانه H-8b بر اساس رده بندی دیر (Deere & Miller, 1966) در رده نسبتا مناسب (Fair) تا خوب (Good) قرار می گیرد. لازم به ذکر است که در مقاطعی از این گمانه مقدار RQD تا

جدول ۲- پارامترهای ژئوتکنیکی حاصل از گمانه های حفاری شده در امتداد تونل انتقال درونگر

شماره گمانه	عمق (متر)	RQD %			نفوذپذیری (Lugeon)		
		حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین
BH-8b	۰-۲۵	۰	۹۸	۷۵	>۱	۷	۳
	۲۵-۵۰	۰	۹۹	۷۷	۱	۱۷	۱۰
	۵۰-۷۵	۵۷	۱۰۰	۸۶	۱۱	>۱	۷
BH-22	۰-۲۵	۱۰	۸۹	۶۰	۶۹	>۱۰۰	>۱۰۰
	۲۵-۵۰	۰	۱۰۰	۶۶	۱۶	>۱۰۰	۷۰
	۵۰-۷۵	۲۱	۱۰۰	۷۲	۴	۲۴	۱۷
GL-1	۰-۲۵	۰	۱۰۰	۶۰	۴۸	>۱۰۰	۹۰
	۲۵-۵۰	۰	۸۵	۵۲	۳۰	>۱۰۰	۸۰
	۵۰-۷۵	۰	۱۰۰	۶۵	۳۰	>۱۰۰	۷۵

جدول ۳- نتایج آزمونهای آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ بکر

واحد سنگی Kat			واحد سنگی Kad			پارامتر
Ave	Max	Min	Ave	Max	Min	
۲۵/۱	۲۵/۶	۲۴/۹	۲۵/۷	۲۶/۲	۲۴/۱	وزن مخصوص (γ) (KN/m^3)
۴۶/۱۸	۶۱/۴	۳۴/۴	۳۳/۳	۵۴/۹	۲۰/۲	مقاومت فشاری تک محوره UCS, (MPa)
۱۱/۰۳	۱۲/۹	۱۰/۰	۷/۰	۹/۴۳	۵/۴۲	مدول الاستیسیته، E (GPa)
۰/۳	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۳	۰/۳۴	۰/۲۶	نسبت پواسون (ν)
۵/۶	۸/۳	۳	۷/۳	۸/۳	۱/۳	نتایج آزمایش
۵۳/۸	۶۲/۹	۴۴/۸	۵۴/۷	۶۲/۹	۳۷/۴	مقاومت چسبندگی (c), (MPa) زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)

طبقه‌بندی RMR (Bieniawski, 1989) Q (Grimstad & Cai et al.,) و GSI (Hoek et al., 1998) و Barton, 1993) مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین برای طبقه‌بندی دقیق تر توده سنگ‌های در برگیرنده تونل انتقال آب، کل مسیر تونل بر اساس نوع لیتولوژی و ویژگی‌های ساختاری به چهار قطعه (A,B,C,D) تقسیم و هر قطعه به طور مجزا رده‌بندی شده است. مرز نواحی یاد شده با یک پدیده ساختاری (وجود یک گسل و یا تغییر در نوع سنگ) مشخص شده است (شکل ۱).

نتایج طبقه‌بندی توده سنگ‌های در برگیرنده تونل انحراف در قطعات مختلف بر اساس سیستم RMR, Q و GSI به طور خلاصه در جدول ۴ ارائه شده است.

آزمون‌های مذکور بر اساس استاندارد (ISRM, 1981) انجام شده و شامل: آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره (UCS) و سه محوره، وزن مخصوص، تخلخل و درصد جذب آب است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در (جدول ۳) ارائه شده است.

طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ

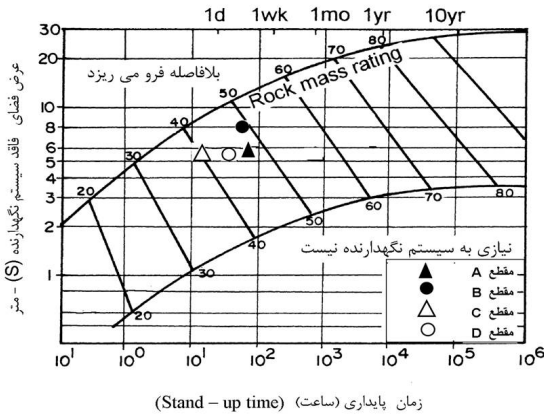
در طراحی سیستم نگهدارنده تونل‌ها، سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ (RMR, Q) توسط تعدادی از محققین مورد استفاده قرار گرفته است (Barton, 2002; Ramamurthy, 2004; Hoek & Diederichs, 2006; Gurocak et al., 2007) کیفیت توده سنگ‌های در برگیرنده تونل انتقال آب، با استفاده از سیستم‌های

جدول ۴- خلاصه ای از نتایج طبقه‌بندی توده سنگ در مسیر تونل انتقال

مقطع D	مقطع C	مقطع B	مقطع A	پارامتر
۰+۲۲۵ تا ۰+۲۶۹	۰+۲۰۰ تا ۰+۲۲۵	۰+۱۰۲ تا ۰+۲۰۰	۰+۱۰۲ تا ۰+۶۴	
۴۴	۴۰	۴۹	۴۸	مقدار RMR
۲/۶	۱	۶/۶	۳/۳	مقدار Q
۳۸-۴۹	۳۴-۴۴	۴۴-۵۶	۳۸-۵۰	مقدار GSI

طراحی سیستم نگهدارنده بر اساس روش RMR

در سال ۱۹۸۹ بنیاوسکی تمهیداتی را برای انتخاب سیستم نگهداری تونل‌ها بر اساس شاخص RMR منتشر ساخت (Bieniawski, 1989). این تمهیدات برای مقاطع مختلف تونل در (جدول ۶) ارائه شده است.



شکل ۲- ارتباط بین زمان پایداری با عرض فضای حفاری بر اساس مقدار RMR (اقتباس از Bieniawski, 1989)

طبقه بندی بر اساس شاخص کیفی تونل سازی (Q)

در این مطالعه، توده سنگ های دربرگیرنده تونل انتقال سد براساس سیستم طبقه بندی Q (Grimstad and Barton, 1993) در مقاطع مختلف تحت بررسی قرار گرفته است. بر اساس این نتایج، توده سنگ های در بر گیرنده تونل انتقال در مقاطع A و D بر طبق سیستم Q، به ترتیب دارای امتیاز ۳/۳ و ۲/۶ بوده که در رده سنگ‌های ضعیف قرار می‌گیرند، در حالیکه توده سنگ‌های مقطع B با امتیاز ۶/۶ در رده سنگ‌های نسبتاً مناسب بوده ولی توده سنگ‌های مقطع C (محدوده گسل) با امتیاز ۱ در رده سنگ‌های ضعیف و خیلی ضعیف قرار دارند.

جدول ۵- مقادیر زمان پایداری برای قطعات مختلف تونل بدون سیستم نگهدارنده

پارامتر	قطعه A	قطعه B	قطعه C	قطعه D
عرض فضای حفاری (S)- متر	۵/۲	۸	۵/۲	۵/۲
مقدار RMR	۴۸	۴۹	۴۰	۴۴
Stand-up time (ساعت)	۸۰	۷۵	۱۸	۴۰

بر اساس نتایج این جدول توده سنگ‌های در بر گیرنده تونل انتقال آب بر اساس سیستم RMR در قطعات A, B و D به ترتیب دارای امتیاز ۴۸، ۴۹ و ۴۴ بوده که در رده سنگ‌های نسبتاً خوب قرار می‌گیرند. ولی توده سنگ‌های قطعه C با امتیاز ۴۰ در رده سنگ‌های ضعیف قرار می‌گیرد. ولی از آنجاییکه عدد ۴۰ در مرز دو رده سنگ‌های نسبتاً مناسب و ضعیف (Poor Rock) قرار دارد. توصیه می‌شود چون مدت زمان استفاده از تونل طولانی است، در مراحل اولیه حفاری، تمهیدات سیستم نگهدارنده تونل بر اساس رده بندی سنگ ضعیف انتخاب شود و پس از پیشروی مقداری از تونل، در صورتی که سیستم نگهداری انتخابی مناسب بود و هیچگونه مشکلی از نظر نگهداری پیش نیاید، به تدریج می‌توان سیستم نگهداری را مطابق سنگ نسبتاً مناسب تعدیل نمود.

زمان پابرجایی تونل بدون سیستم نگهدارنده (Stand - time up)

در این مطالعه جهت ارزیابی و تعیین زمان پابرجایی تونل (بدون سیستم نگهدارنده) از نمودار (Stand-up time) از نمودار (شکل ۲) که توسط بنیاوسکی (Bieniawski, 1989) ارائه گردیده استفاده شده است. در این نمودار، زمان پا پابرجایی تونل براساس رابطه بین مقدار RMR و عرض فضای حفاری شده و یا فاصله جبهه کار تا محل پوشش گذاری شده برآورد گردیده، و نتایج حاصل از آن برای مقاطع مختلف در (جدول ۵) ارائه شده است.

جدول ۶- تمهیدات نگهداری برای قطعات مختلف تونل انتقال، منطبق با سیستم RMR (Bieniawski, 1989)

قطعه	رده توده سنگ	پیچ سنگ به قطر 20mm و کاملاً تزریق شده	شاتکرت	قابهای فلزی
A B D	نسبتاً مناسب	پیچ سنگهایی به طول ۴ متر و فاصله ۲ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره ها، با سیم توری در تاج	به ضخامت ۵۰ تا ۱۰۰ میلیمتر در تاج و ۳۰ میلیمتر در دیواره ها	احتیاجی نیست
C	ضعیف	پیچ سنگهایی به طول ۴-۵ متر و فاصله ۱/۵ تا ۱ متر در تاج و دیواره ها، با سیم توری در تاج	به ضخامت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیمتر در تاج و ۳۰ میلیمتر در دیواره	قابهای فلزی سبک تا متوسط در فاصله ۱/۵ متر، در صورت لزوم

طراحی سیستم نگهدارنده بر اساس سیستم Q

برای برآورد سیستم نگهدارنده بر اساس سیستم Q، از نمودار مربوطه (Grimstad & Barton, 1993) که بر مبنای مقدار Q و بعد معادل (D_e) ترسیم شده، استفاده گردیده است. در این مطالعه، تونل انتقال آب سد که قرار است برای مدت طولانی (در مدت عمر مفید سد) مورد بهره برداری قرار گیرد در زمره طرح های مدیریت منابع آب قرار گرفته و به همین دلیل، نسبت نگهداری فضای حفاری $SR=1.3$ به آن اختصاص داده شده است. بنابراین با معلوم بودن شاخص Q و بعد معادل (D_e) برای مقاطع مختلف تونل، تمهیدات سیستم نگهداری تونل با مراجعه به نمودار (شکل ۳) مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج آن در (جدول ۷) و وضعیت هر مقطع در این نمودار نشان داده شده است.

جدول ۷- تمهیدات سیستم نگهدارنده بر اساس سیستم Q

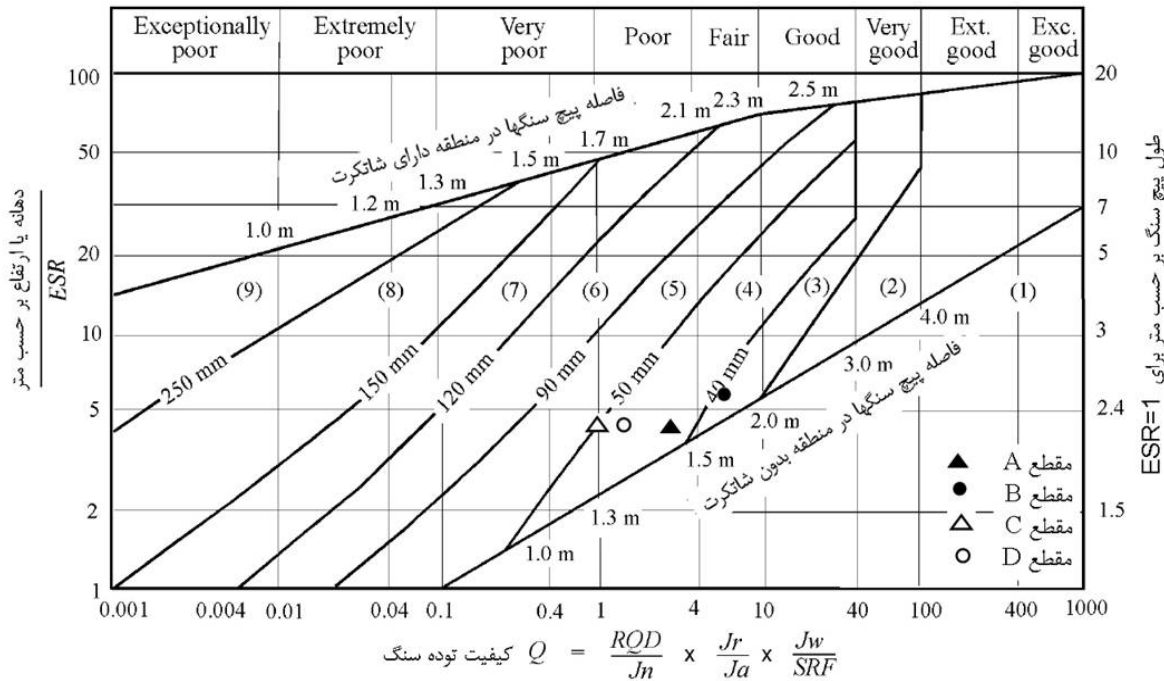
قطعات	D_e	ضخامت شاتکرت (mm)		پیچ سنگ - متر	
		مسلح	غیر مسلح	فاصله	طول
A	۴	-	۴۵	۲	۲
B	۶/۳	-	۴۰	۲	۲/۵
D	۴		۴۵	۲	۲
C	۴	۵۰	-	۱/۷	۲

اندیس مقاومت زمین شناسی (GSI)

اندیس مقاومت زمین شناسی (GSI) توسط هوک و همکارانش در طی سال های ۱۹۹۴، ۱۹۹۵ و ۱۹۹۸ معرفی شده است (Hoek et al., 1998). اندیس مقاومت زمین شناسی بر مبنای فاکتورهای ساختار توده سنگ و شرایط سطح درزه استوار می باشد. این دو فاکتور (ساختار و شرایط سطح درزه ها) بر اساس مشاهدات صحرائی مشخص شده و سپس بوسیله نمودار (شکل ۴) (Cai et al., 2004)، مقادیر عددی GSI تعیین گردیده است.

بر اساس نتایج حاصل از این بررسی (شکل ۴)، توده های سنگی مقطع A دارای مقادیر $GSI=38-50$ بوده و در رده سنگ های بلوکی با شرایط درزه متوسط تا ضعیف قرار می گیرد. مقطع B نیز از نظر ساختاری در رده بلوکی قرار دارد ولی نسبت به مقطع A دارای شرایط بهتری است. مقدار GSI برای این مقطع بین ۴۴ تا ۵۶ برآورد شده است. مقدار GSI برای مقطع C بین ۳۴ تا ۴۴ تخمین زده شده و در رده خیلی بلوکی با شرایط درزه متوسط تا ضعیف قرار دارد. توده سنگ های تشکیل دهنده مقطع D در رده سنگ های خیلی بلوکی با شرایط درزه متوسط تا ضعیف قرار گرفته اند و دارای مقدار $GSI=38-49$ می باشند.

با توجه به نتایج بدست آمده از سیستم های طبقه بندی RMR، Q و GSI، مقطع B دارای بهترین شرایط کیفی و مقطع C دارای بدترین شرایط کیفی می باشند.



تمهیدات تقویت سنگ

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1) Unsupported 2) Spot bolting 3) Systematic bolting 4) Systematic bolting with 40-100 mm unreinforced shotcrete | <ol style="list-style-type: none"> 5) Fibre reinforced shotcrete, 50 - 90 mm, and bolting 6) Fibre reinforced shotcrete, 90 - 120 mm, and bolting 7) Fibre reinforced shotcrete, 120 - 150 mm, and bolting 8) Fibre reinforced shotcrete, > 150 mm, with reinforced ribs of shotcrete and bolting 9) Cast concrete lining |
|---|---|

شکل ۳- ارزیابی تمهیدات سیستم نگهدارنده برای مقاطع مختلف تونل بر اساس سیستم Q

(اقتباس از Grimstad and Barton, 1993)

پارامترهای خطی موهر-کلمب (c و φ) لازم میباشد. با توجه به نتایج حاصل از این بررسیها، مشخص گردید که کاربردی ترین راه حل این است که مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی تمام مقیاس انجام شده و نتایج حاصل از آنها با استفاده از معیار غیر خطی هوک-بران شبیه سازی گردد. سپس تابع مور-کلمب توسط تحلیل رگرسیون خطی بر روی منحنی هوک-بران (در محدوده‌ای از مقادیر تنشهای اصلی کوچک (σ₃))، برازش گردد.

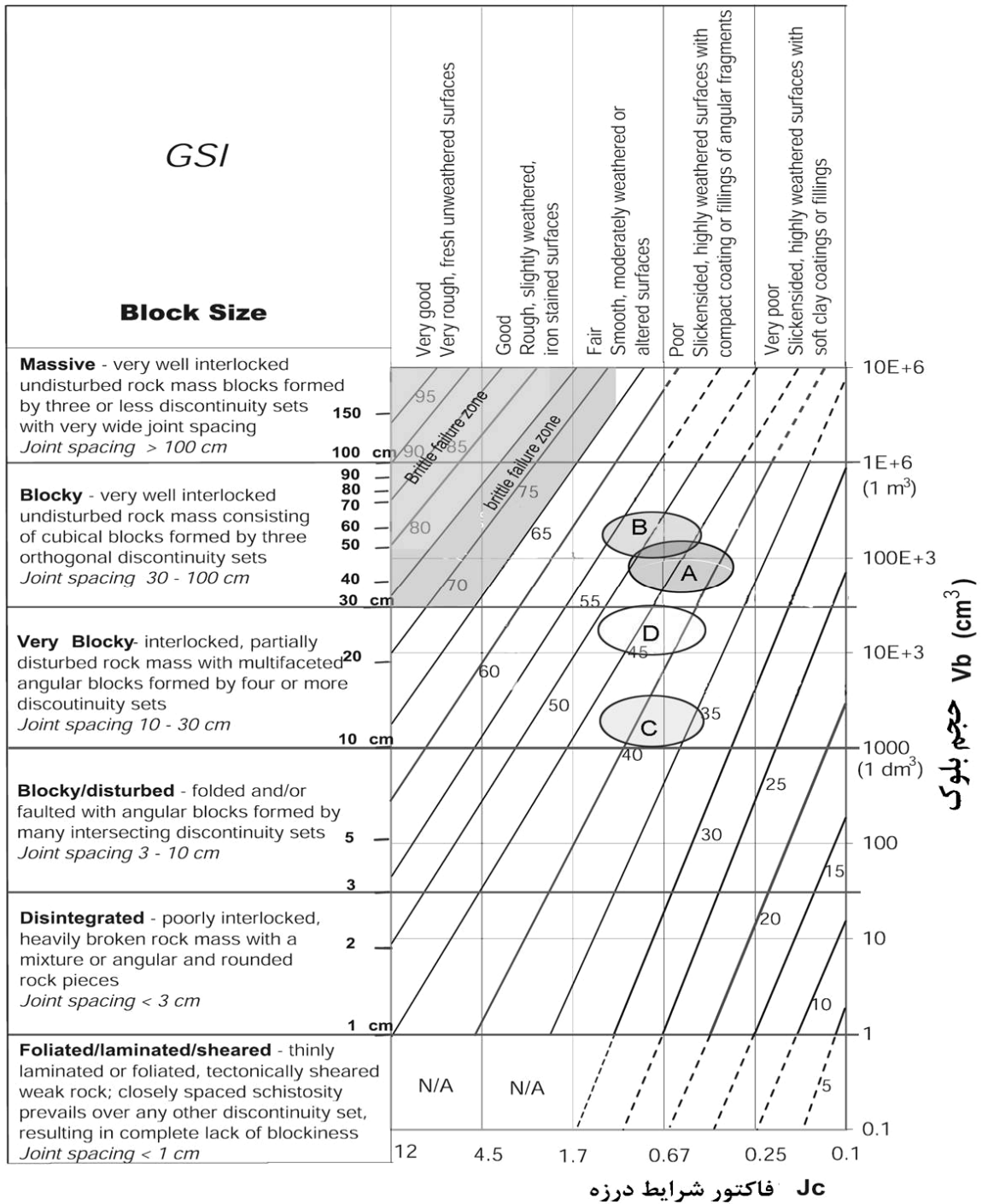
برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ

برای برآورد پارامترهای مقاومتی و برآورد مدول تغییر شکل توده سنگ از معیار هوک - بران (Hoek et al., 2002) استفاده و نتایج بدست آمده در (جدول ۸) ارائه شده است.

برآورد پارامترهای مقاومتی مور-کلمب

از آنجایی که اغلب نرم افزارهای ژئوتکنیکی، هنوز بر اساس معیار مور-کلمب نوشته می‌شوند. بنابراین برقرار نمودن رابطه‌ای بین پارامترهای غیر خطی هوک و بران (s و m) و

شرایط سطح درزه یا دیواره بلوک



شکل ۴- مقادیر GSI برای مقاطع A, B, C و D (تونل درونگر) تصویر شده بر روی نمودار اصلاح

شده سیستم GSI (اقتباس از Cai et al., 2004)

جدول ۸- نتایج پارامترهای مقاومت توده سنگ برای مقاطع مختلف تونل

مقطع D	مقطع C	مقطع B	مقطع A	پارامتر
۱۴	۱۴	۱۴	۱۰	m_i (ثابت ماده سنگ)
Kat	Kat	Kat	Kad	لیتولوژی
۱/۴۵	۱/۲۴	۱/۹۲۵	۱/۰۸	m_b
۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۱۳	S
۰/۵۰۹	۰/۵۱۲	۰/۵۰۶	۰/۵۰۹	A
۴/۰۸	۳/۲۴	۶/۰۳۷	۳/۶۶	E_m (GPa) (مدول توده سنگ)
۱/۴۵	۱/۱۱	۲/۲۱	۱/۱۱	σ_{cm} (MPa) (مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ)
-۰/۰۳۶	-۰/۰۲۶	-۰/۰۶۱	-۰/۰۳۹	σ_t (MPa) (مقاومت کششی توده سنگ)
۷/۲۱	۶/۵۵	۸/۳	۴/۴۸	σ'_{cm} (MPa) (مقاومت کلی توده سنگ)
۰/۴۲	۰/۶۷	۰/۹۲	۰/۴۱	σ_{3max} (MPa) (حد نهایی σ_3)
۰/۲۶۵	۰/۳۰۶	۰/۴۸۸	۰/۲۲۵	C (مقاومت چسبندگی توده سنگ)
۵۵/۵	۵۱	۵۱/۹	۵۰/۹	Φ (زاویه اصطکاک داخلی)

محاسبه گردد. بحث تعیین مقدار مناسب σ_{3max} بستگی به کاربرد ویژه آن دارد. به عبارت دیگر، روابط σ_{3max} برای تونل و یا دامنه های شیبدار متفاوت است. مقدار σ_{3max} برای تونلهایی که مقدار روباره آن ها بیشتر از سه برابر دهانه تونل باشد از رابطه زیر محاسبه می گردد (Hoek et al., 2002):

$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left[\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right]^{-0.94} \quad (1)$$

در معادله فوق، σ'_{cm} ، مقاومت کلی توده سنگ بوده که توسط رابطه ۲ تعریف شده است، γ ، وزن مخصوص توده سنگ و H، ارتفاع روباره می باشد. در مواردی که تنش افقی بیشتر از تنش قائم باشد، مقادیر تنش افقی باید به جای γH جایگزین گردد (Hoek et al., 2002).

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (2)$$

مقادیر σ_{3max} و پارامترهای Φ و C با توجه به بررسی های انجام شده برای مقاطع تونل بطور جداگانه محاسبه و نتایج بدست آمده در (جدول ۸) ارائه شده است.

نمودار رابطه بین تنش های اصلی (نمودار بین σ_1 و σ_3) و تنش های برشی و نرمال (نمودار بین σ_n و τ_n) براساس معیار هوک- بران و معیار برازش شده مور- کلمب، برای مقاطع A، B، C و D تونل انتقال در منطقه مورد مطالعه رسم گردید که به عنوان نمونه برای مقطع B در (شکل ۵) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، نمودار مور-کلمب بر روی نمودار هوک- بران برازش شده است. برازش منحنی مور- کلمب بر روی منحنی هوک- بران فقط در محدوده ای از تنش های اصلی کوچک (σ_3) قابل قبول است که مقدار σ_3 از σ_t (مقاومت کششی توده سنگ) بزرگتر و از σ_{3max} (حد بالایی تنش های محصور کننده) کوچکتر باشد. همانطور که در (شکل ۵) مشاهده می شود، در نموداریکه بر مبنای تنش های اصلی (σ_1 و σ_3) ترسیم شده است، مقادیر برشی و تنش نرمال رسم شده است مقادیر C و Φ بر روی نمودار مشخص شده است.

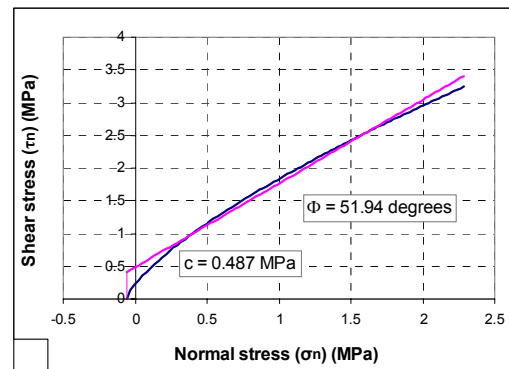
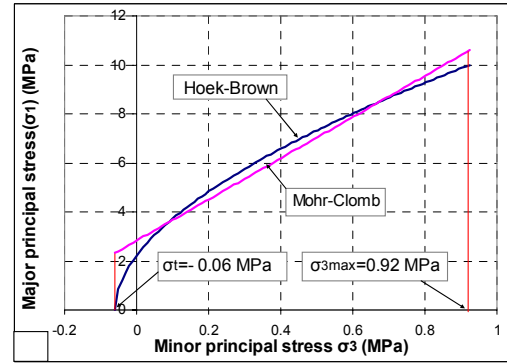
لازم به ذکر است که مقدار σ_{3max} که حد بالایی تنشهای محصور کننده (σ_3) است، برای هر مورد خاص باید تعیین و

حاکم بر سطح و شرایط مرزی مساله برآورد گردد (ITASCA, 2000).

با توجه به مطالب فوق، برای تحلیل عددی از نرم افزار UDEC (ITASCA, 2000) که یک برنامه عددی دو بعدی بر مبنای روش عددی اجزای مشخص می باشد، استفاده شده است. در این نرم افزار برای سنگ بکر مدل رفتاری الاستوپلاستیک و برای ناپیوستگی ها مدل لغزش کلمب انتخاب گردید. تنشهای اولیه بصورت ثقلی و با در نظر گرفتن نسبت تنش افقی به قائم ۱ تا ۱/۵ (بر اساس اندازه گیری تنشهای برجا و قضاوتهای مهندسی) برای مقاطع مختلف اعمال گردید. مدلسازی با نرم افزار UDEC نیازمند حل مدل قبل از حفاری و رساندن آن به تعادل اولیه است. پس از این مرحله فضای مورد نظر حفر می گردد. نتایج تحلیل الاستوپلاستیک نشان داد که تونل مزبور در مقاطع C و D ناپایدار بوده و نیازمند نگهدارنده می باشد، ولی مقاطع A و B پایدار بوده و نیاز به نگهداری مقدماتی ندارند.

تحلیل پایداری مقطع C با روش عددی

بر اساس نتایج بدست آمده از برنامه UDEC، توده سنگهای دربرگیرنده فضای حفاری شده در مقطع C ناپایدار بوده و دچار ریزش (Collapse) خواهد شد. این نتایج منطقی و قابل پیش بینی است، زیرا توده سنگهای این مقطع بسیار خرد شده (زون گسلی) بوده و پارامترهای مقاومتی و مقادیر RMR، Q و GSI بدست آمده برای این مقطع نسبت به مقاطع دیگر، کمتر است. بنابراین نصب سیستم نگهدارنده برای پایداری این مقطع لازم و ضروری است. لذا برای پایداری آن، نصب میل مهارهایی منظم در سقف به طول ۲/۵ متر و به فواصل ۱ متر، و اجرای شاتکرِت به ضخامت ۲۵ سانتیمتر در کل مقطع تونل پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که برای مدلسازی میل مهارها از المان سازه ای Cable، و برای مدلسازی شاتکرِت از المان سازه ای Beam استفاده شده است. نتایج بدست آمده برای مقادیر جابجایی در جهت های x و y و همچنین مقدار جابجایی کلی، پس از اجرای میل مهار و شاتکرِت در (جدول ۹) ارائه شده است. بر اساس



شکل ۵- نمودار برازش شده مور-کلمب بر روی منحنی

هوک-براون برای مقطع B

الف- نمودار تنشهای اصلی (نمودار بین σ_1 و σ_3)

ب- نمودار تنش برشی و نرمال (نمودار بین σ_n و τ_n)

تحلیل عددی

برای تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهدارنده مقدماتی تونل انتقال از روش عددی اجزای مشخص (Distinct Element Method) که توسط کاندل در سال ۱۹۷۱ برای حل مسائل مکانیک سنگ در توده سنگهای درزه دار ابداع شده، استفاده شده است. در این روش توده سنگ به عنوان مجموعه ای از بلوکهای مجزا فرض شده که در لبه ها و گوشه ها برهم تاثیرگذار بوده و درزه ها به عنوان مرز مشترک بلوک ها در نظر گرفته می شود (Hoek et al., 1995). وقتی محیط تحت بارگذاری داخلی و یا خارجی قرار می گیرد، باعث ایجاد جابجایی در بلوکها شده و با گذشت زمان تغییرات نیرو در سطوح همجوار شروع می شود. معادلات تعادل دینامیکی برای هر المان بصورت تکراری حل شده تا اینکه قوانین

اجرای شاتکرت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر در کل مقطع تونل استفاده شده است. مقادیر جابجایی در جهت‌های x و y و همچنین مقدار جابجایی کلی، پس از اجرای میل مهار و شاتکرت در (جدول ۱۰) ارائه شده است.

بر اساس نتایج مندرج در (جدول ۱۰) مقدار حداکثر جابجایی پس از نصب سیستم نگهدارنده در جهت x به $2/2$ میلیمتر در دیواره راست و مقدار حداکثر جابجایی در جهت y به 2 میلیمتر در سقف تونل محدود شده است که نسبت به شعاع تونل کوچک می باشد. در مورد جابجایی کلی نیز وضع به همین منوال بوده و مقدار جابجایی کلی در این مقطع پس از نصب سیستم نگهدارنده به $2/5$ میلیمتر در دیواره راست تونل محدود می گردد.

نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از سیستم های طبقه بندی RMR، Q و GSI، در بین تمام مقاطع، مقطع B دارای بهترین شرایط و کیفیت و مقطع C دارای بدترین شرایط کیفی است.

جدول ۱۰- مقادیر جابجایی در مقطع D براساس روش

اجزای مشخص (UDEc)

موقعیت	پارامتر	مقدار	
		قبل از نگهدارنده	بعد از نگهدارنده
دیواره راست	جابجایی x -(m)	collapse	-۰/۰۰۲۲
	جابجایی y -(m)	collapse	-۰/۰۰۰۵
	جابجایی کل (m)	collapse	۰/۰۰۲۵
سقف	جابجایی x -(m)	۰	۰/۰۰۱۵
	جابجایی y -(m)	-۰.۰۵	-۰/۰۰۲
	جابجایی کل (m)	۰/۰۵	۰/۰۰۲۱
دیواره چپ	جابجایی x -(m)	۰	۰/۰۰۲۲
	جابجایی y -(m)	-۰.۰۰۵	-۰/۰۰۰۵
	جابجایی کل (m)	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲۳
کف	جابجایی x -(m)	-۰/۰۱	۰/۰۰۰۵
	جابجایی y -(m)	۰	۰/۰۰۱۲
	جابجایی کل (m)	۰/۰۱	۰/۰۰۱۳

نتایج (جدول ۹) مقدار حداکثر جابجایی پس از نصب سیستم نگهدارنده در جهت x به 15 میلیمتر و مقدار جابجایی در جهت y به 20 میلیمتر در کف تونل محدود شده است که خطری برای پایداری تونل محسوب نمی شود. در مورد جابجایی کلی نیز وضعیت مشابه بوده و مقدار جابجایی کلی در این مقطع پس از نصب سیستم نگهدارنده به 32 میلیمتر در کف محدود می گردد ولی در سقف و دیواره ها، این مقدار به 10 تا 20 میلیمتر کاهش می یابد، در نتیجه تونل پایدار خواهد شد.

تحلیل پایداری مقطع D با روش عددی

براساس نتایج بدست آمده از برنامه UDEC، توده سنگهای دربرگیرنده فضای حفاری شده در محدوده این مقطع در دیواره راست ناپایدار بوده و دچار لغزش خواهد شد.

بنابراین نصب سیستم نگهدارنده برای پایدارسازی این مقطع لازم و ضروری است. لذا برای پایدارسازی آن، نصب میل مهارهایی منظم در سقف به طول 2 متر و به فواصل 2 متر، و

جدول ۹- مقادیر جابجایی در مقطع C بر اساس روش

اجزای مشخص (UDEc)

موقعیت	پارامتر	مقدار	
		قبل از نگهدارنده	بعد از نگهدارنده
دیواره راست	جابجایی x -(m)	collapse	-۰/۰۱۵
	جابجایی y -(m)	collapse	-۰/۰۱۲
	جابجایی کل (m)	collapse	۰/۰۲
سقف	جابجایی x -(m)	collapse	صفر تا -۰/۰۰۵
	جابجایی y -(m)	collapse	-۰/۰۱
	جابجایی کل (m)	collapse	۰/۰۱
دیواره چپ	جابجایی x -(m)	collapse	۰/۰۱۵
	جابجایی y -(m)	collapse	-۰/۰۱
	جابجایی کل (m)	collapse	۰/۰۲
کف	جابجایی x -(m)	-	-۰/۰۱
	جابجایی y -(m)	-	۰/۰۲
	جابجایی کل (m)	-	۰/۰۳۲

فلزی در این مقطع را توصیه کرده است. لذا با توجه به مطالب فوق، می توان برای اطمینان بیشتر از قابلهای فلزی به فواصل ۱ متر در تمام طول این مقطع استفاده نمود. در مورد مقطع D، با مقایسه بین نتایج حاصل از روشهای RMR، Q و تحلیل عددی، می توان دریافت که مقطع D کاملاً ناپایدار بوده و احتیاج به تمهیدات سیستم نگهدارنده دارد و برای پایدارسازی این مقطع، نیاز به نصب پیچ سنگ هایی به طول ۲ متر و به فواصل ۲ متر و و اجرای یک لایه شاتکرت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر می باشد.

در این مطالعه، تحلیل پایداری تونل انتقال با دو روش تجربی و عددی انجام شده است. چگونگی استفاده از این دو روش از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا، به ترتیب از روش تجربی به سوی روش عددی بر میزان دقت و اعتمادپذیری طراحی انجام شده، افزوده می شود. به عبارت دیگر این دو روش جدا از یکدیگر نبوده، بلکه با قرارگیری در راستای یکدیگر می توانند موجب تکامل روند طراحی سازه های زیرزمینی گردند و می تواند نتایج قابل اطمینان تری نسبت به حالتی که تنها از یک روش استفاده شود، ارائه نماید.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می دانند تا از همکاری صمیمانه مهندسین مشاور شرکت طوس آب در برداشت های صحرائی و ارائه اطلاعات مورد نیاز تشکر و قدردانی نمایند

همچنین بر اساس بررسی ها و محاسبات انجام شده بر مبنای معیار هوک- بران، توده سنگهای دربرگیرنده مقطع B دارای بالاترین مقادیر پارامترهای مقاومتی توده سنگ بوده در حالیکه توده سنگهای دربرگیرنده مقطع C دارای کمترین پارامترهای مقاومتی توده سنگ می باشند.

بر اساس نتایج حاصل از طبقه بندی RMR، Q و همچنین نتایج حاصل از تحلیل عددی بر روی توده سنگهای در برگیرنده تونل در مقاطع A و B، چون مدت زمان بهره برداری از تونل طولانی است، لذا پیشنهاد می گردد که در مراحل اولیه حفاری، تمهیدات لازم جهت سیستم نگهدارنده تونل بر اساس اجرا و نصب پیچ سنگ هایی به طول ۲ متر و به فواصل ۲ متر اجرا گردد. ضمن اجرای پروژه و پس از پیشروی حفاری تونل، در صورتی که سیستم نگهداری انتخابی مناسب بود و هیچگونه مشکلی از نظر نگهداری پیش نیامد، به تدریج می توان سیستم نگهداری را تعدیل نمود و از پیچ سنگهای موردی استفاده کرد.

در مورد مقطع C، با توجه به نتایج حاصل از طبقه بندی روشهای RMR، Q و تحلیل عددی، می توان دریافت که مقطع C کاملاً ناپایدار بوده و اجرای سیستم نگهدارنده ضروری است. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل عددی، با نصب پیچ سنگهایی با فواصل کم (۱ متر) و اجرای شاتکرت با مقاومت و ضخامت زیاد، میتوان تغییر شکل های زیاد در این مقطع را کنترل کرد. از طرفی سیستم RMR نصب قاب

منابع

- Barton, N. (2002). Some new Q -value correlations to assist in site characterization and tunnel design, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39, pp. 185–216.
- Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* 6, 189-236.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*, Wiley, New York, 251p.
- Cai, M., Kaiser, P.K., Uno, H., Tasaka, Y., Minami, M., (2004). Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41, 3-19
- Deere, D.U. and Miller, R.P. (1966). Engineering classification and index properties of rock. Technical Report No. AFNL-TR-65-116. Albuquerque, NM: Air Force Weapons Laboratory.
- Diederichs, M.S., Hoek, E. (1989). DIPS 2.2. Advanced Version Computer Programme, Rock Engineering Group, Department of Civil Engineering, University of Toronto.
- Grimstad, E. and Barton, N. (1993). Updating the Q-System for NMT. *Proc. Int. Symp. on Sprayed Concrete - modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Fagernes, (eds Kompen, Opsahl and Berg). Oslo: Norwegian Concrete Assn.
- Gurocak, Z., Solanki, P. and Zaman, M. M. (2007). Empirical and numerical analyses of support requirements for a diversion tunnel at the Boztepe dam site, eastern Turkey, *Engineering Geology*, 91, pp. 194–208

-
- Hoek, E. and Diederichs, M.S., (2006). Empirical estimation of rock mass modulus, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 43, pp. 203–215.
- Hoek, E., (2000). *Rock Engineering. Course Notes by Evert Hoek.* Balkema, Rotterdam. 313 p.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., and Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion –2002 edition. *Proc. North American Rock Mechanics Society Meeting in Toronto.*
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock.* Balkema, Rotterdam, 215p.
- Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M. (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bull. Engg. Geol. Env.* 57, 151-160.
- ISRM (1981). *Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. Rock Characterization, Testing and Monitoring,* London. Pergamon, Oxford, 221 p.
- ITASCA. (2000). *Universal distinct element code, Version 3.1, User's manual.* ITASCA Consulting Group, Inc., USA.
- Ramamurthy, T. (2004). A geo-engineering classification for rocks and rock masses, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, pp. 89–101.