

تحلیل پایداری تونل، ترانشه ورودی و گوه‌های داخل تونل راه آهن قزوین-رشت-انزلی کیلومتر ۴۰۰+۴۷، با استفاده از استریونت و شبیه‌سازی رایانه‌یی

حسین حسینی (استادیار)
دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
شیرو ارشدنژاد (مربی)
گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد محلات

رعایت شیب مجاز در مسیر راه آهن، استفاده از تونل در مناطق کوهستانی را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. تونل کیلومتر ۴۰۰+۴۷ مسیر قزوین-رشت-انزلی در ناحیه البرز غربی در دامنه ارتفاعات مشرف به رودخانه سفیدرود در مجموعه سنگ‌های آندزیت و تراکی آندزیت به سن انوسن در دست مطالعه است. مسیر تونل و ترانشه (گودال) ورودی آن در توده سنگ‌هایی درزه‌دار با لایه‌بندی ضخیم که توسط گسلی ناحیه‌یی قطع شده قرار گرفته است. ترانشه خروجی آن نیز در سری رسوبات آبرفتی دوران چهارم واقع شده است. در این پژوهش لغزش‌های موضعی در سطح دامنه، احتمال وجود لغزش و ایجاد نگرانی در مورد امنیت تونل، موضوع پایداری توده سنگ‌های درزه‌دار در ترانشه ورودی و بخش میانی تونل مدنظر است.

طول این تونل ۴۹۰ متر، و بیشینه ارتفاع روباره‌ی آن حدود ۱۵۰ متر با روند تقریبی شرقی و غربی است. نتایج برداشت‌های زمین‌شناسی مهندسی و درزه‌نگاری آماری استریوگرام‌ها حاکی از وجود حداقل سه سیستم ناپیوستگی در توده سنگی است. به‌منظور تحلیل پایداری گوه‌های سنگی داخل تونل و ترانشه ورودی، در طول مسیر تونل چندین مقطع در نظر گرفته شد و پس از تهیه اطلاعات ژئومکانیکی و مشخصات هندسی درزه‌ها، بخش داخلی تونل با استفاده از نرم‌افزار Unwedge و ترانشه ورودی با استفاده از روش ساختاری تحلیل شده است. علاوه بر آن، بحرانی‌ترین مقطع با بیشترین روباره با استفاده از نرم‌افزار Phase^۲ مدل‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد که در محل‌های یادشده در داخل تونل احتمال وقوع گسیختگی‌های گوه‌یی، گسیختگی‌های صفحه‌یی و نیز واژگونی در دیواره‌ی ترانشه‌های ورودی وجود دارد. شیب پایدار برای دیواره‌ی سمت راست ترانشه ۷۲ درجه و برای سمت چپ ترانشه ۵۶ درجه است. از آنجا که تونل به‌منظور احداث خط آهن ساخته خواهد شد، بررسی نشست کف آن بسیار با اهمیت است. بنابراین مؤلفین براساس داده‌های محققین پیشین، یک رابطه‌ی ریاضی برای تعیین حداکثر ظرفیت باربری مجاز پی‌سنگی بر مبنای RMR ارائه کرده و نشست کف تونل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که با ضریب اطمینان بالا می‌توان نسبت به پایداری کف تونل مطمئن بود.

۱. مقدمه

تراس‌های آبرفتی رودخانه‌یی واقع شده است. در محدوده‌ی توده‌های سنگی در مسیر تونل و ترانشه‌ی ورودی برداشت کامل و جامعی از درزه‌ها و شکستگی‌های این واحدها صورت گرفته و ضرایب ژئومکانیکی براساس ارزیابی توده سنگ برحسب رده‌بندی ژئومکانیکی RMR و RSR و Q به دست آمده است.

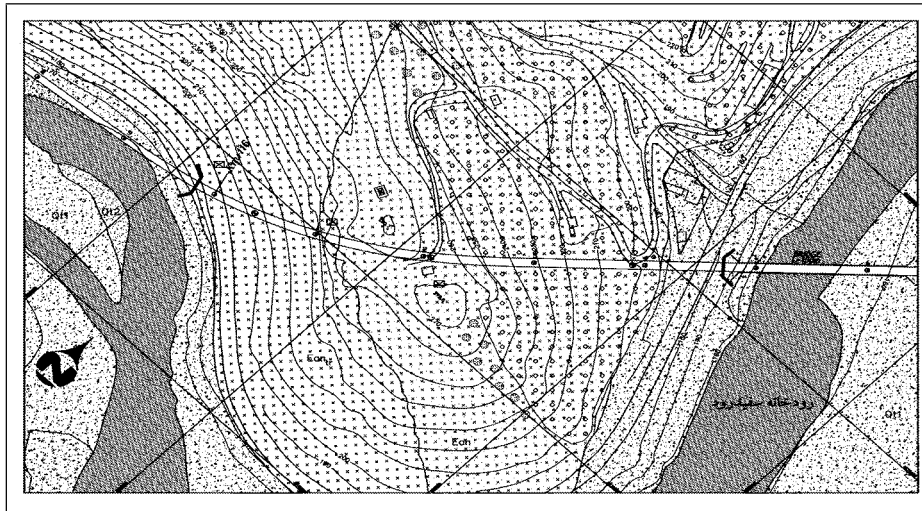
تونل کیلومتر ۴۰۰+۴۷ راه آهن قزوین-رشت-انزلی در موقعیت جغرافیایی حدود ۴۹°، ۴۲' طول شرقی و ۱۰'، ۳۷° عرض شمالی و در فاصله‌ی تقریبی ۱۱۶ کیلومتری شمال غرب قزوین قرار دارد. تونل به‌طول ۴۹۰ متر، با امتداد تقریبی شرقی - غربی، و واقع در ارتفاع ۲۱۰ متری سطح دریا است. مسیر تونل دارای قوس افقی به شعاع تقریبی ۵۰۰ متر و شیب طولی آن حدود ۱۲ در هزار، سطح مقطع تونل به‌شکل نعل اسبی با عرض دهانه‌ی تونل ۶/۵ متر و ارتفاع ۹/۵ متر است. در حال حاضر تونل در دست مطالعه است و هنوز عملیات اجرایی آن شروع نشده است.

۲. جایگاه زمین‌شناسی

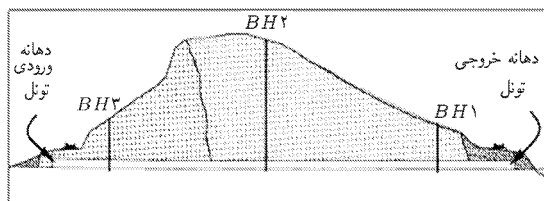
راه آهن قزوین-رشت-انزلی در بخش جنوبی ناحیه البرز غربی قرار گرفته است. تونل مورد مطالعه بعد از گردن‌های کوهین، در فاصله‌ی تقریبی ۱۱۶ کیلومتری شهر قزوین، و به‌طول ۴۹۰ متر ساخته خواهد شد.

قسمت اعظم مسیر تونل و ترانشه‌ی ورودی آن از میان واحدهای سنگی آندزیتی و تراکی آندزیتی می‌گذرد و دهانه‌ی خروجی تونل در

در این بخش از رشته‌کوه البرز سری سنگ‌های ولکانو-سدیمتی



شکل ۱. نقشه توپوگرافی و زمین‌شناسی محدوده‌ی تونل (مقیاس ۱:۵۰۰۰).



شکل ۲. نیم‌رخ طولی زمین‌شناسی تونل و محل گمانه‌های پیشنهادی (مقیاس ۱:۴۰۰۰).

لایه‌بندی^۱، درزه‌ها^۲ و گسل‌ها^۳ در مسیر تونل مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه تقریباً تمامی محدوده‌ی دهانه‌ی خروجی تونل با رسوبات آبرفتی رودخانه یا رسوبات تخریبی و خاک حاصل از فرسایش دامنه‌های اطراف پوشانده شده است، عملاً رخنمون سنگی خاصی برای برداشت‌های لازم وجود نداشت و تحلیل‌های پایداری تنها در بخش‌های سنگی انجام شده است.

۱.۳. لایه‌بندی

سنگ‌شناسی کلی مسیر تونل مشتمل است بر توالی‌های آندزیت هوازده، تراکیت و تراکی آندزیت، که در بخش خروجی به رسوبات آبرفتی تبدیل می‌شوند. سن تشکیل این سنگ‌های آتشفشانی اتوسن میانی تا بالایی است. سنگ‌های آذرین مذکور اغلب به‌صورت توده‌یی رخنمون داشته و لایه‌بندی خاصی از خود بروز نمی‌دهند.

۲.۳. درزه‌ها

با توجه به پلان زمین‌شناسی و نیم‌رخ طولی زمین‌شناسی تهیه شده، مشاهده می‌شود که بخشی از ترانسه‌ی دهانه‌ی ورودی و تاج تونل درون توده‌سنگ‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی تشکیل نشده است که این واحدهای آذرین درزه‌های مشخص و قابل برداشت دارند. قابل ذکر

شامل آندزیت، تراکی آندزیت، توف، کنگلومرا، و آگلومرا به سن اتوسن همراه با توده‌های نفوذی و دیگر سنگ‌های آتشفشانی با همان سن دیده می‌شود^[۱] و روی آنها سنگ‌های رسوبی الیگومیوسن که به‌وسیله‌ی رسوبات نئوژن پوشیده شده‌اند، قرار دارد. ساختگاه تونل در امتداد مسیر راه آهن قزوین-رشت-انزلی، درون سنگ‌های آندزیت و تراکی-آندزیت پوشیده با قشری از مواد هوازده و خاک نباتی قرار دارد.

شکستگی‌های موجود در سنگ‌های میزبان تونل، با گسلی سراسری با راستای N۲۰ در ارتباط است که از فاصله‌ی ۲ کیلومتری از محل تونل عبور می‌کند. در توده سنگ‌های محدوده‌ی تونل و ترانسه‌ی ورودی آن سه سیستم شکستگی در استریوگرام‌های برداشت صحرایی مشخص شده است. از اطلاعات فوق همراه با پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها در خصوص طبقه‌بندی توده سنگ استفاده شده است. در شکل ۱ وضعیت نقشه‌برداری و واحدهای سنگ‌شناختی مختلف به‌همراه موقعیت مسیر تونل مشخص شده است. لایه‌بندی مشخص در این سنگ‌ها دیده نمی‌شود و در نیم‌رخ طولی (شکل ۲) حد بین واحدهای سنگی دیده می‌شود.

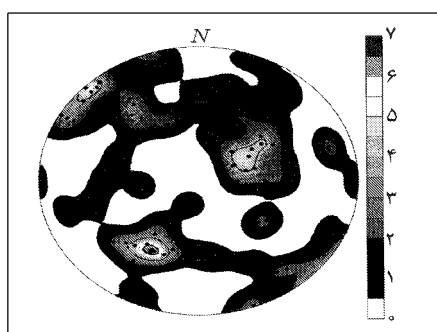
همان‌طور که پیش از این بیان شده، مطالعات انجام شده تاکنون منحصر به برداشت‌های صحرایی و نمونه‌برداری از سطح زمین بوده است. نیم‌رخ طولی از تونل و محل گمانه‌های پیشنهادی که قرار است در آینده حفر شود در شکل ۲ دیده می‌شود.

۳. درزه‌نگاری تونل و ترانسه‌ی ورودی

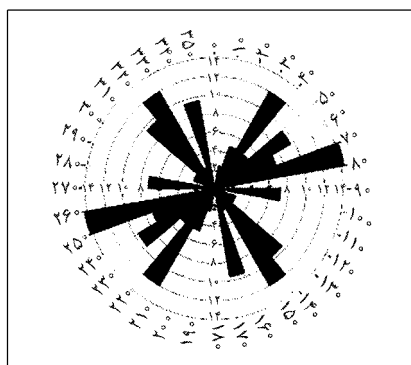
کلیه‌ی سطوح انفصال موجود در واحدهای سنگی مسیر تونل و ترانسه‌ی ورودی تحت عنوان «نایبوستگی» بیان شده و در این بخش به ترتیب

جدول ۱. خصوصیات مهندسی (صحرایی) ناپیوستگی‌های موجود در کلیه‌ی بخش‌ها براساس استاندارد LAEG [۴].

Amount%		Wetness	Infilling%	Weathering ISRM	roughness		Spacing (m)	Aperture (mm)	Length (m)	Dip/ Dip dir	Dip/ Dip dir	Joint set
Total	Pole				Kind	JRC						
۲۲	۵/۵	Dry	٪۹۵Empty ٪۵Soil	W۱-W۲	Slightly Rough	۸-۱۰	۰/۳-۰/۵	۲-۱۵	۱-۲	۲۰ - ۴۵ ۲۲۵-۲۵۵	۳۵/۲۳۵	۱
۲۶	۶	Dry	٪۹۵Empty ٪۵Soil	W۱-W۲	Slightly Rough	۸-۱۰	۰/۴-۰/۶	۱-۱۰	۰/۵-۲	۸۰ - ۹۰ ۱۲۰-۱۴۰	۸۵/۱۳۵	۲
۲۰	۷	Dry	٪۹۵Empty ٪۵Soil	W۱-W۲	Slightly Rough	۸-۱۰	۰/۳-۰/۵	۱-۱۰	۲-۴	۴۵ - ۵۵ ۲۰-۴۵	۵۰/۳۰	۳
۳۲	درزه‌های اتفاقی											



شکل ۳. نمودار تراکم قطب سطوح درزه‌ها.



شکل ۴. نمودار گل سرخی.

امتداد و شیب درزه‌ها و تعمیم آنها به مقطع تونل و امتداد و شیب مسیر پروژه می‌توان پایداری بلوک‌های تشکیل شده در نتیجه‌ی تلاقی شکستگی‌های موجود و فضای زیر زمینی را مدل‌سازی کرد. شکل ۵ نمایی از موقعیت مقطع تونل در دامنه‌ی مشرف به رودخانه‌ی سفیدرود را نشان می‌دهد.

۳.۳. گسل‌ها

با توجه به مشاهدات و مطالعات صحرایی صورت گرفته، فقط یک گسل شاخص در محدوده‌ی نزدیک به مسیر تونل شناسایی شده است که

است که علاوه بر دسته درزه‌های توصیف شده و برداشت شده در این محدوده درزه‌های فراوان دیگری نیز در سطح محدوده‌ی مورد مطالعه وجود دارند که پراکنندگی تصادفی دارند که عوامل به‌وجود آورنده‌ی آنها هوازدگی، نیروی وزن و ... هستند و مستقیماً تحت تأثیر عوامل زمین‌ساختی - ساختاری نبوده‌اند و بنابراین در مقطع تونل کم‌تر دیده می‌شوند. نهایتاً در این پژوهش سعی بر آن بوده که تا حد امکان از دسته درزه‌هایی که مستقیماً بر اثر عوامل زمین‌ساختی به‌وجود آمده‌اند و در مقطع تونل به احتمال زیاد با آنها مواجه هستند برداشت شده و در تهیه‌ی جداول مربوطه از درزه‌های متفرقه صرف‌نظر شده است.

۱.۲.۳. دسته‌بندی درزه‌ها

درزه‌های توصیف شده در این بخش از میان واحدهای آندزیتی و تراکی آندزیتی برداشت شده‌اند و حتماً تونل مورد نظر نیز از درون همین واحد عبور خواهد کرد. در جدول ۱ مشخصات کامل دسته درزه‌های اصلی مسیر مورد مطالعه ارائه شده است. همچنین در جدول الف موجود در پیوست، فهرست کلیه‌ی درزه‌های برداشت شده درج شده است.

نمودار تراکم قطب سطوح درزه‌ها (شکل ۳) و نیز نمودار گل سرخی (شکل ۴) آنها تهیه شده است. با توجه به موقعیت ایستگاه‌های برداشت درزه‌ها و نوع درزه‌های برداشت شده، به احتمال فراوان سه دسته درزه‌ی اصلی یعنی درزه‌هایی با شیب و امتداد میانگین ۳۵/۲۳۵، ۸۵/۱۳۵ و ۵۰/۳۰ در مقطع تونل مشاهده خواهد شد که دلیل این مسئله فراوانی این دسته درزه‌ها و کمی فاصله‌ی ایستگاه‌های برداشت با محور تونل است.

حال با در نظر گرفتن اطلاعات مربوط به این دسته درزه‌های اصلی و با استفاده از نرم‌افزار Unwedge در واحدهای آندزیتی و تراکی آندزیتی، وضعیت بلوک‌های احتمالی در مقطع تونل مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در این تجزیه و تحلیل، با توجه به فاصله، راستا،

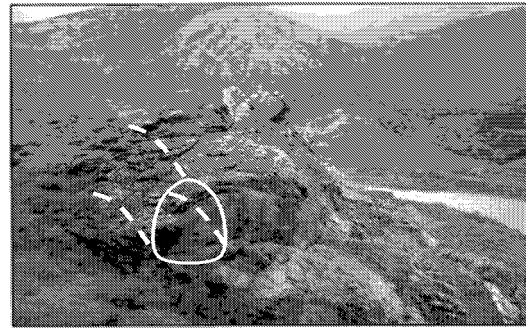
از نرم‌افزار Unwedge کمک گرفته شده، و برای تعیین تغییر شکل‌های ایجاد شده در جدار تونل و همچنین طراحی سیستم نگه‌داری مناسب برای تأمین پایداری تونل از نرم‌افزار Phase² استفاده شده است.

بررسی گوه‌ها حاکی از آن است که از مجموع گوه‌هایی که تشکیل آن‌ها در طول تونل مورد انتظار است، نوعی از گوه‌ها به دلیل تشکیل کف تونل فاقد هرگونه خطری است. از میان چهار نوع گوهی دیگر که امکان سقوط یا لغزیدن آنها بر روی یک یا دو سطح ناپیوستگی وجود دارد، گوه‌هایی که از وزن و حجم بیشتر و همچنین ضریب اطمینان کم‌تر نسبت به بقیه‌ی گوه‌ها برخوردارند، خطرناک‌ترین هستند. با توجه به این که این گوه‌ها اغلب در سقف تونل تشکیل می‌شوند، احتمال تشکیل ۲ گوه کلیدی در تونل وجود دارد (شکل ۶). بزرگترین گوه سقفی در محدوده‌ی میانی تونل تشکیل می‌شود که مشخصاتی به شرح زیر دارد:

- مساحت سطح رخنمون گوه در مقطع تونل: $278 (m^2)$ ؛
- حجم گوه: $0.7525 (m^3)$ ؛
- وزن تقریبی: $1.74 (ton)$ ؛
- نوع حرکت: چرخش بر روی سطح درزه 72° ؛
- ضریب ایمنی: 0.61 .

دومین گوه کلیدی در محدوده ورودی تونل و در دیواره‌ی سمت راست قابل تشکیل است. این گوه با وزن 0.7 تن، از قابلیت لغزش بر روی سطح دسته درزه $J3$ با مشخصات $50/30$ را دارد و با برخورداری از ضریب ایمنی پایین (در حد 0.48) یک گوه کلیدی و ناپایدار محسوب می‌شود (گوه شماره ۶ از سری ۱ در شکل ۶). البته گوه‌های دیگری که در سقف و دیواره‌های تونل از قابلیت و خطر ریزش و لغزش بر روی سطوح ناپیوستگی برخوردارند (شکل ۶) نیز گوه‌های خطرناک و ناپایداری هستند که به‌خودی خود به دلیل داشتن ضریب ایمنی پایین، یا هندسه و جاگیری نامناسب پایدار نیستند ولی نمی‌توان آنها را جزو گوه‌هایی کلیدی دانست در حقیقت کنترل‌کننده‌ی میزان و نوع استحکامات و لوازم پایدارسازی هستند.

این گوه‌ها را می‌توان به‌عنوان گوه‌های اصلی در نظر گرفت، و آن‌ها را به دو دسته با عنوان «سری یک» و «سری دو» تقسیم کرد. گوه‌های سری ۱ مربوط به محدوده‌ی دهانه‌ی ورودی تونل، و گوه‌های سری ۲



شکل ۵. نمایی از موقعیت تونل در سری سنگ‌های ولکانیکی.

با روندی تقریباً شرقی - غربی از فاصله‌ی حدوداً ۲ کیلومتری جنوب دهانه‌ی ورودی تونل عبور می‌کند، و مستقیماً بر تونل تأثیر نداشته و تنها باعث توسعه‌ی شکستگی‌ها در محدوده‌ی تونل شده است.

۴. طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ

به‌منظور ارزیابی کمی و امتیاز دادن به توده سنگ‌های مسیر تونل برحسب رده‌بندی ژئومکانیکی (RMR)، ارزیابی توده‌سنگ با استفاده از مفهوم RSR و ارزیابی توده‌سنگ برحسب سیستم Q [۳۰] نیازمند حفاری‌های ژئوتکنیکی و کسب اطلاعاتی در مورد شاخص کیفی سنگ، مقاومت فشاری، مشخصات درزه‌ها، میزان آب موجود و پارامترهای متعدد دیگری است که این اقدامات تا این مرحله انجام نشده است. بدین لحاظ از طریق برداشت‌های صحرائی و تعیین مقاومت سنگ، و نیز برداشت درزه‌ها و ارزیابی شرایط آنها نسبت به رده‌بندی ژئومکانیکی سنگ‌های مسیر تونل اقدام شده است [۴].

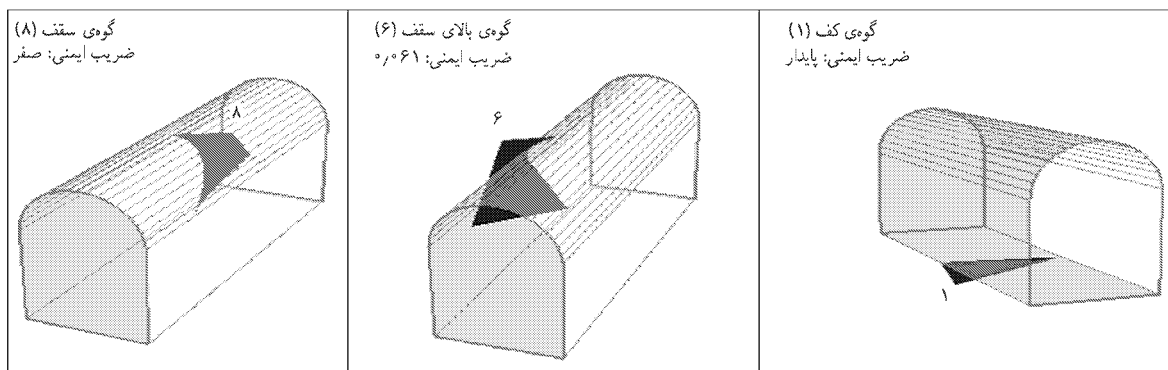
با توجه به مشاهدات و نتایجی که از بررسی‌های ساختگاه این تونل حاصل شده، ارزیابی توده‌سنگ برحسب رده‌بندی ژئومکانیکی (RMR)، براساس مفهوم RSR، و همچنین برحسب سیستم Q انجام شده و به‌همراه سایر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی توده سنگ با استفاده از نرم‌افزار Roclab، مطابق جدول ۲ ارائه می‌شود.

۵. ارزیابی ناپایداری توده‌سنگ

به‌منظور ارزیابی دقیق چگونگی و شکل ناپایداری‌هایی که می‌تواند توسط دسته درزه‌های اصلی در تونل مورد مطالعه امکان بروز یابد

جدول ۲. مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ براساس برداشت‌های صحرائی [۴] و با استفاده از تحلیل نرم‌افزار Roclab.

E_m (MPa)	ν	σ_{tm} (MPa)	σ_{cm} (MPa)	σ_c (MPa)	S	m_b	m_i	$(MN/m^3)\gamma$	نوع سنگ
5788.4	0.22	0.066	4.370	175	0.0007	1.866	25	0.0265	آندزیت
ϕ	C(MPa) <td>h</td> <td>k</td> <td>D</td> <td>RSR</td> <td>Q</td> <td>RMR₈₉</td> <td>GSI</td> <td>و تراکی</td>	h	k	D	RSR	Q	RMR ₈₉	GSI	و تراکی
55.82	1.133	150	0.561	0.5	71	4.81	50.5	45.5	آندزیت



شکل ۶. موقعیت و وضعیت برخی از گوه‌های تشکیل شده در اطراف تونل.

در طول تونل ما را با شرایط ناپایداری ساختاری (به این معنی که کل ساختار تونل در معرض ناپایداری و خرابی قرار گیرد) مواجه نخواهد ساخت و ناپایداری‌های توده سنگ در این تونل بیشتر به صورت تشکیل بلوک‌های سنگی کوچک است.

با استفاده از شاتکریت با ضخامت بیشینه‌ی ۱۰ سانتی‌متر و میل مهارهای مناسب، ضریب ایمنی گوه‌ها عملاً افزایش قابل ملاحظه‌ی خواهد یافت که این مسئله علاوه بر اینکه در خروجی‌های برنامه‌ی Unwedge کنترل شده است، در نتایج و تحلیل‌های حاصل از روش‌های مختلف طبقه‌بندی توده‌سنگ برای این تونل نیز قابل لمس و مشاهده است.

جبهه‌ی حفاری مناسب با توجه به تحلیل‌های صورت پذیرفته روی سیستم‌های درزه و سطوح ناپیوستگی قابل تشخیص است. به این صورت که در هر دو قسمت تونل که درزه‌ها و سیستم‌های ناپیوستگی آنها شناسایی شده‌اند، در صورتی که حفاری از کیلومتر کم‌تر به بیشتر صورت پذیرد - یعنی جبهه‌ی حفاری به سمت NE باشد - به دلیل آنکه شیب دسته درزه‌های J۲ و J۳ هم‌راستا با حفاری است و فقط دسته درزه‌ی J۱ با شیب ملایم در مقابل جبهه‌ی حفاری قرار می‌گیرد، انجام عملیات حفر تونل در این وضعیت از ارجحیت برخوردار است؛ در حالی که حفر تونل از کیلومتر بیشتر به کم‌تر، یعنی به سمت جنوب غرب، شرایط را معکوس می‌کند و احتمال حرکت گوه‌های ایجاد شده در سینه‌ی کار را به سمت داخل تونل افزایش می‌دهد.

این مسئله را می‌توان به خوبی در تحلیل‌های صورت پذیرفته توسط برنامه‌ی Unwedge ملاحظه کرد. در حالتی که جبهه‌ی حفاری رو به سمت NE (شمال شرق) باشد به دلیل این که حرکت گوه‌های ایجاد شده فقط بر روی یک سطح با شیب ملایم یعنی دسته درزه J۱ وجود دارد، ضریب ایمنی نسبت به حالتی که جبهه‌ی حفاری رو به سمت SW باشد بیشتر می‌شود. چرا که در حالت اخیر در دو امتداد J۲ و J۳ احتمال حرکت گوه‌ها به سمت داخل تونل وجود دارد. نهایتاً پیشنهاد

مربوط به محدوده‌ی دهانه خروجی تونل هستند. لیست مشخصات گوه‌های اصلی که در طول مسیر تونل قابل تشکیل‌اند عبارت‌اند از:

- گوه شماره ۱ از سری ۱، به وزن ۲۰۰ کیلوگرم در سقف تونل با قابلیت شدیداً ریزشی (ضریب ایمنی صفر است).

- گوه شماره ۲ از سری ۱، در سقف تونل به وزن ۱۰۰ کیلوگرم با قابلیت چرخش بر روی سطح درزه J۲، با مشخصات ۸۵/۱۳۵ و گوه شماره ۳ در دیواره‌ی سمت چپ تونل (دیواره‌ی غربی) با قابلیت لغزش در امتداد سطوح دسته درزه J۱ به مشخصات ۳۵/۲۳۵ و J۲ با مشخصات ۸۵/۱۳۵.

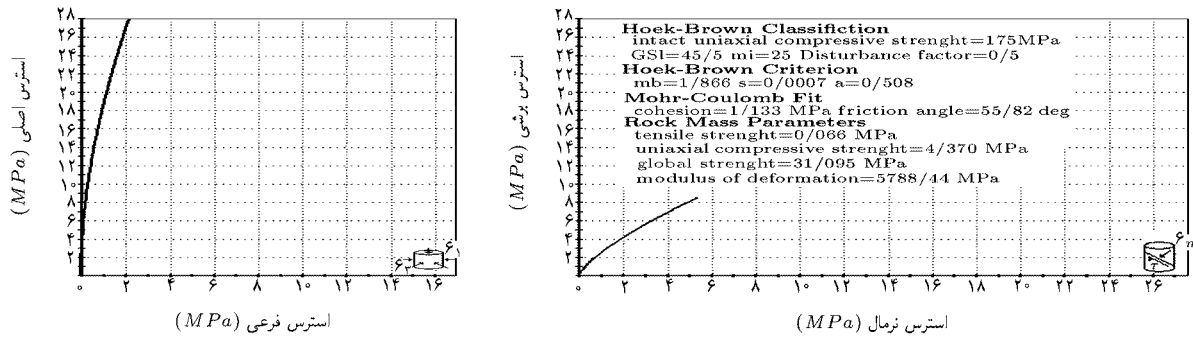
- گوه شماره ۱ از سری ۲، با ضریب ایمنی صفر و قابلیت ریزش از سقف تونل؛ گوه شماره ۲ که این گوه نیز در سقف تونل قرار گرفته و با چرخش روی سطح ناپیوستگی J۲، با مشخصات ۸۵/۱۳۵ از قابلیت ریزشی فراوانی برخوردار است؛ و گوه شماره ۳ در دیواره‌ی غربی تونل با ضریب ایمنی ۰/۹۶ که از قابلیت حرکت لغزشی بر روی سطوح دسته درزه J۲، با مشخصات ۸۵/۱۳۵ و J۱ با مشخصات ۳۵/۲۳۵ برخوردار است. وزن تقریبی این گوه ۴۰۰ کیلوگرم است.

- گوه شماره ۶ از سری ۲، با وزن ۲۰۰ کیلوگرم و ضریب ایمنی ۰/۴۸ که در دیواره‌ی سمت راست و با خاصیت لغزشی تشکیل می‌شود.

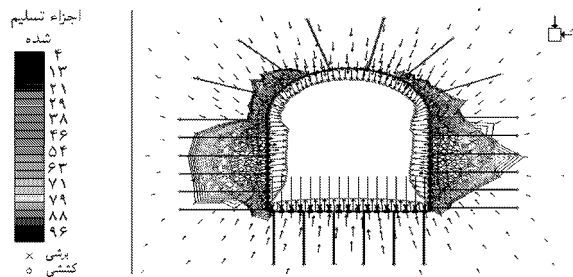
۱.۵. ارزیابی نهایی گوه‌ها

گوه‌های تشکیل شده در تونل به لحاظ وزنی در گستره‌ی محدودی جای می‌گیرند که از کمینه‌ی وزن ۱۰۰ کیلوگرم تا بیشینه‌ی ۵/۲ تن را شامل می‌شوند. البته با توجه به اینکه نرم‌افزار Unwedge همیشه بزرگ‌ترین وزن ممکن از هر نوع را معرفی می‌کند، در عمل انتظار می‌رود که وزن گوه‌ها اندکی از اعداد و ارقام ارائه شده کم‌تر باشد. با این وجود شرایط موجود مؤید این نکته است که عدم تشکیل بلوک‌های بسیار حجیم

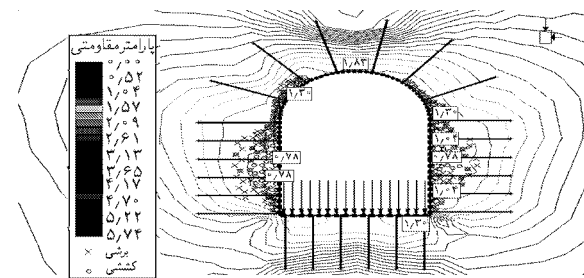
تحلیل مقاومتی سنگ با استفاده از نرم‌افزار Rocklab



شکل ۷. پوش مور و خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ براساس آخرین نسخه‌ی اصلاح شده‌ی معیار شکست [۵]



شکل ۸. المان‌های تسلیم شده و گستره‌ی نقاط کششی و برشی در جدار تغییرشکل یافته‌ی تونل.



شکل ۹. توزیع ضریب ایمنی و گستره‌ی نقاط کششی و برشی در جدار تونل.

۰/۷۸) کاهش یافته که این امر نشان‌گر ناپایداری تونل است. پیشنهاد می‌شود برای جلوگیری از تغییر شکل زیاد در جدار تونل، حفاری جبهه کار به صورت ۲ مقطع و به شکل پلکانی انجام گیرد. بنابراین، در سیستم نگه‌داری اصلاحاتی انجام گرفت؛ میل مهارهای سقف با همان مشخصات، اما با نیروی پیش‌تندگی $0/50 MN$ بلافاصله پس از حفر مقطع فوقانی تونل به‌کار گرفته شدند. میل مهارهای دیواره با فاصله‌داری ۱/۲ متر و همچنین نیروی پیش‌تندگی $0/65 MN$ مورد استفاده قرار گرفتند. از آنجا که نشست یا آماس کف در تونل‌های راه آهن بسیار با اهمیت است، از همین میل مهارها با فاصله‌داری ۱/۲ متر در کف تونل استفاده شد. اما برای کنترل کردن تمرکز تنش در دو گوشه‌ی کف تونل از نیروی پیش‌تندگی $0/65 MN$ ، و برای سایر میل مهارهای کف از همان نیروی پیش‌تندگی میل مهارهای دیواره‌ها (یعنی $0/50 MN$) استفاده شد. علاوه بر این، ضخامت شاتکریت مورد

می‌شود که حتی‌المقدور عملیات حفر تونل چنان طراحی شود که امتداد پیشروی تونل به سمت شمال شرق باشد تا ضریب ایمنی بالاتری در عملیات تأمین شود.

۲.۵. تحلیل پایداری تونل با روش اجزای محدود

برای تعیین چگونگی رفتار توده سنگ در برگیرنده‌ی تونل، و به دنبال آن انتخاب سیستم نگه‌داری مناسب برای تونل از نرم‌افزار اجزای محدود Phase^۲ استفاده شد. قبل از مدل‌سازی تونل، داده‌های ژئومکانیکی تونل از طریق برداشت‌های صحرائی [۴] و با استفاده از نرم‌افزار Rocklab آماده شد. شکل ۷ پوش مور و سایر خصوصیات مکانیکی توده سنگ را براساس آخرین نسخه‌ی اصلاح شده‌ی معیار شکست [۵] نشان می‌دهد.

سپس به منظور مدل‌سازی تونل، مقطعی که بیشترین روبراه (۱۵۰ متر) را در بر دارد، انتخاب شد. برای مدل‌سازی و تعیین چگونگی حفر، و نیز تعیین سیستم نگه‌داری مناسب، از راهنمایی‌های ارائه شده در رده‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR) و همچنین سیستم Q [۶-۸] استفاده شد.

بنابراین از یک لایه‌ی شاتکریت به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر در سقف و ۷۰ میلی‌متر در دیواره‌ها، و همچنین از میل مهارهای تمام درگیر با طول ۴ متر و فاصله‌داری ۱/۵ متر با قطر ۲۲ میلی‌متر و فولاد St.۳۷ با بیشینه ظرفیت باربری $0/76 MN$ و همچنین نیروی پیش‌تندگی $0/8 MN$ پس از نصب، استفاده شد. نسبت تنش افقی به قائم براساس رابطه‌ی موجود [۹] برابر $0/56$ تعیین شد. علاوه بر داده‌های فوق، به منظور مدل‌کردن بار اعمالی توسط لوکوموتیو در کف تونل یک بار گسترده‌ی یکنواخت معادل $0/26 MN/m$ اعمال شد. نتیجه‌ی شبیه‌سازی تونل پس از اجرای نرم‌افزار در شکل‌های ۸ و ۹، ارائه شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود گستره‌ی المان‌های تسلیم شده کاملاً قابل رؤیت است و در نتیجه مقادیر ضریب ایمنی به کم‌تر از ۱ (یعنی

پوسته‌ی بتنی به‌کار رفته در کف تونل و همچنین لایه بالاست و ریل، با اعمال یک ضریب ایمنی معمول (در مهندسی پی مقدار این ضریب ۵ است) تعیین می‌شود. در ادامه ظرفیت باربری حداکثر توده‌سنگ بنا بر رابطه‌ی پیشنهادی مؤلفین [۱۹] معین می‌شود. سپس با مقایسه‌ی آن‌ها می‌توان به پایداری کف در مقابل نشست پی برد.

بر اساس داده‌های حاصل از ۳۹ آزمایش بارگذاری صفحه‌یی برای عرض پی ۶ متر، توسط مهرتزا (۱۹۹۳) ظرفیت باربری مجاز پی‌های سنگی بر مبنای RMR به صورت تعدادی داده به دست آمده است. [۱۱] مقدار جابه‌جایی یا نشست مجاز ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مؤلفین با استفاده از تحلیل رگرسیون غیرخطی با کمک داده‌های مهرتزا (جدول ب پیوست) رابطه‌ی زیر را با ضریب همبستگی $r^2 = 0.9357$ به دست آورده و پیشنهاد می‌کنند.

$$q_u = 0.70029 RMR^{1.768} \quad (1)$$

که در آن:

q_u : ظرفیت باربری مجاز توده‌سنگ پس از اعمال ضریب ایمنی (MPa)

RMR: رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (نسخه‌ی ۱۹۸۹ بیناوسکی) است.

نتایج حاصل از این رابطه با جداول ارائه شده توسط سینگ (۱۹۹۱) و مهرتزا (۱۹۹۳) [۱۱] انطباق بسیار مطلوبی دارد. بنا بر رابطه‌ی ۱ ظرفیت باربری مجاز توده‌سنگ ساختگاه تونل راه آهن قزوین-رشت-انزلی کیلومتر ۴۰۰+۴۷، چنین محاسبه می‌شود:

$$q_u = 0.70029(50.75)^{1.768} = 2.108 \text{ (MPa)}$$

لوکوموتیوی که پس از احداث راه آهن از این خط عبور می‌کند، باید از نوع GT۲۶CW با ابعاد ۱۹٫۵۰۷ متر (طول)، ۲٫۸۱۹ متر (عرض)، ۳٫۹۰۳ متر (ارتفاع) و وزن کل ۱۱۹٫۶ تن باشد. اگر کف تونل به ضخامت ۱٫۵ متر بالاست‌ریزی شود، (با سنگ آهک خردشده به وزن حجمی $19/2 \text{ KN/m}^3$) بیشینه‌ی بار اعمالی به کف عبارت است از:

$$1.5 \times 6.5 \times 19.5 \times 19.2 = 3650.4 \text{ KN}$$

بار ناشی از جرم لوکوموتیو، در شرایطی که دو لوکوموتیو در داخل تونل و در مسیر رفت و برگشت همزمان وارد تونل شوند، عبارت است از:

$$2 \times 119.6 \times 9.81 = 2346.55 \text{ KN}$$

بار ناشی از وزن پوسته‌ی بتنی کف تونل با وزن حجمی $23/5 \text{ KN/m}^3$ عبارت است از:

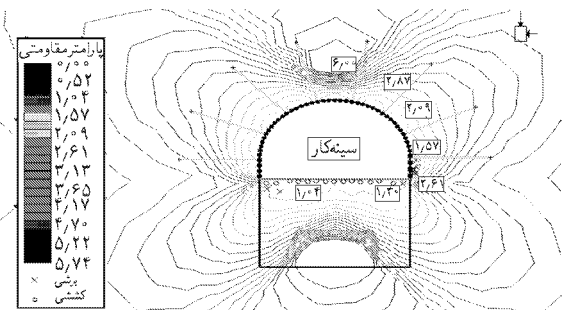
$$0.8 \times 6.5 \times 19.5 \times 23.5 = 297.9 \text{ KN}$$

استفاده در سقف و دیواره و کف، یکسان و برابر با 100 میلی‌متر و البته با افزایش مقاومت فشاری از ۲۵ به $MN30$ منظور، و در مدل اعمال شد. لازم به ذکر است که نتایج حاصله در پی ساخت ۱۲ مدل و تغییر وضعیت آن‌ها به دست آمده است، و به شرایط ایمنی و پایداری تونل را تأمین کرد. بیشینه جابه‌جایی نهایی از $18/6$ میلی‌متر در مدل اول، به $3/8$ میلی‌متر در آخرین مدل کاهش یافت. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ وضعیت تونل را در آخرین مدل نشان می‌دهند.

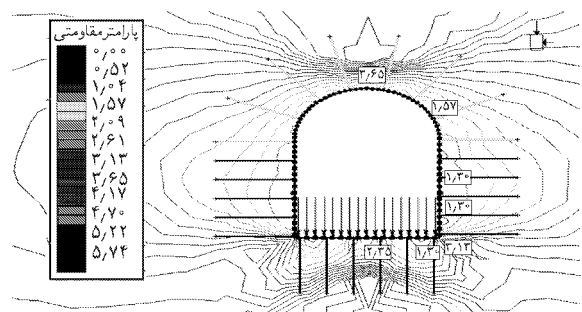
چنان‌که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص است، مقدار ضریب ایمنی از $1/30$ کم‌تر نشده است، و نیز هیچ یک از میل مهارها و هیچ بخشی از پوسته‌ی شاتکریت تسلیم نشدند. بررسی مقادیر جابه‌جایی و عدم وجود المان‌های تسلیم شده، متضمن پایداری تونل با شرایط اخیر است.

۳.۵. نشست کف تونل

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، خطوط راه آهن به شیب و همچنین همواری مسیر بسیار حساس‌اند. اندکی نشست نامساوی در خط آهن باعث ایجاد ضربه در حین عبور قطار می‌شود. این ضربات، در طول عمر تونل که معمولاً آن را 100 سال در نظر می‌گیرند، سبب اعمال بار دینامیکی مداوم به ریل‌ها و جدار تونل می‌شود. این امر می‌تواند در دراز مدت باعث کاهش چسبندگی بین جدار تونل و توده‌سنگ و همچنین دوغاب میل مهارها و توده‌سنگ و خستگی در ریل‌ها شود. بنابراین در این قسمت بیشینه‌ی تنش اعمالی ناشی از بار قطار، وزن



شکل ۱۰. توزیع ضریب ایمنی در جدار تونل (نیمه بالایی مقطع) در مدل ۱۲.



شکل ۱۱. توزیع ضریب ایمنی در جدار تونل (تمام مقطع) در مدل ۱۲.

محدوده‌ی ناپایداری قرار دارد و پایدار می‌ماند. از لحاظ ناپایداری‌های واژگونی یا نگون‌سازی (Toppling) نیز مسئله‌ی در ترانشه‌ی مذکور وجود ندارد. در نتیجه عامل کنترل‌کننده‌ی شیب شیروانی در این ترانشه گوه ۲۳ است که برای مهار این نوع گوه‌ها چنان که پیش‌تر بیان شد، بیشینه‌ی شیب مجاز ۳ به ۱ است. اعمال این شیب، حرکت گوه‌ی درزه‌های گوه‌ساز را خنثی می‌کند و باعث پایداری ترانشه می‌شود.

۲.۴.۵. ترانشه‌ی ورودی، دیواره‌ی سمت چپ

قطب گوه ۱۲ به دلیل قرار گرفتن در خارج از مخروط پایداری دارای قابلیت حرکت از نوع گوه‌ی است. گوه مذکور را می‌توان با اعمال شیب بیشینه‌ی ۵۶ درجه یا ۱/۵ به ۱ پایدار کرده و مانع از حرکت آن شد. قطب صفحه‌ی ۱ نیز (مربوط به دسته درزه J۱) با قرار گرفتن در خارج از عناصر مشخص‌کننده‌ی ناپایداری صفحه‌ی، عملاً پایدار مانده و حرکتی از این نوع نخواهد داشت. از دیدگاه حرکت نگون‌سازی نیز مشکل خاصی در این دیواره مشاهده نمی‌شود. لذا عامل نهایی تعیین‌کننده‌ی شیب در دیواره‌ی سمت چپ دسته درزه‌های گوه‌ساز J۱ و J۲ هستند که با در نظر گرفتن شیب ترانشه‌ی ۵۶ درجه یا ۱/۵ به ۱ هر دو نوع حرکت گوه‌ی و صفحه‌ی این درزه‌ها کنترل شده و اتفاق نمی‌افتد.

۳.۴.۵. سر در ورودی

قطب گوه‌های ۱۲ و ۱۳ از قابلیت ناپایداری نوع گوه‌ی برخوردار است که در این میان قطب گوه ۱۳ با قرار گرفتن در محدوده‌ی مخروط پایداری عملاً بدون حرکت و پایدار می‌ماند، ولی قطب گوه ۱۲ با قرار گرفتن در زیرپوش لغز ۴۵ درجه و در محدوده‌ی پوش لغز ۴۲ درجه از قابلیت کمی برای پایدارسازی از طریق اعمال شیب شیروانی برخوردار است و برای مهار و کنترل حرکت آن باید از تمهیدات دیگر نظیر شاتکریت و میل مهارهای کششی نیز استفاده کرد.

به لحاظ ناپایداری صفحه‌ی نیز قطب صفحه‌ی شماره ۱ مربوط به دسته درزه J۱، در شرایط تعادلی مشابه قطب گوه ۱۲ قرار داشته و با استفاده از وسایل و روش‌های پایدارسازی مرسوم که برای مورد قبل به‌کار رفته است، به راحتی قابل کنترل است. به لحاظ دیدگاه ناپایداری نوع نگون‌سازی مشکل خاصی در محدوده‌ی پرتال ورودی این تونل مشاهده نمی‌شود. در نتیجه به نظر می‌رسد که پرتال ورودی تونل مورد بحث را بتوان با اعمال شیب شیروانی در حد ۳ به ۱ و اجرای همزمان شاتکریت و نصب میل مهارهای تمام فولادی و کششی مناسب به طول حداکثر ۳ متر و قطر ۲۰ میلی‌متر پایدار ساخت. ضخامت تخمینی شاتکریت در این مرحله از مطالعات بر روی پرتال ورودی ۱۰ سانتی‌متر در دو مرحله همراه با یک شبکه تور سیمی به مشخصات $10 \text{ cm} @ \phi 6$ به منظور ایمنی و پیوستگی بیشتر توده‌سنگ بالای پرتال، پیش‌بینی شده است.

و بنابراین تنش اعمالی به کف عبارت است از:

$$\frac{(365074 + 2346755 + 29779) \times 10^{-3}}{675 \times 1975} = 0.05 \text{ (MPa)}$$

با مقایسه‌ی بیشینه ظرفیت باربری مجاز پی سنگی و بیشترین تنش اعمالی به کف تونل می‌توان به پایداری کف تونل در مقابل نشست اطمینان داشت، یعنی: $0.05 > 27108$.

۴.۵. تحلیل پایداری ترانشه‌ی ورودی و سر در تونل

تحلیل‌های سینماتیک پیرامون سه نوع پایداری گوه‌ی (wedge)، صفحه‌ی (Planar) و واژگونی (Toppling) [۱۴-۱۶] برای ترانشه‌های ورودی و خروجی این تونل با استفاده از روش ویلی‌دانکن [۱۵] انجام گرفته است. سنگ‌شناسی ترانشه‌ی ورودی تونل از نوع گدازه‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی تفکیک نشده است و در قسمت خروجی تونل با توجه به وجود یادگانه‌های آبرفتی رودخانه‌ی سفیدرود و عملکرد عوامل فرسایش در محل، رسوبات آبرفتی و سیمانی شده ملاحظه می‌شود که عملاً نمی‌توان درزه‌برداری خاصی را در آنها انجام داد. در این مرحله به علت عدم وجود نتایج آزمایشگاهی در هر دو سنگ‌شناسی زاویه‌ی اصطکاک داخلی را می‌توان بر مبنای اطلاعات جدول ۲ به میزان ۵۵/۸۲ درجه فرض کرد. در روش حاضر، ابتدا با استفاده از شیب و امتدادهای برداشت شده از درزه‌ها و سطوح لایه‌بندی در محدوده‌ی ترانشه‌ها و نیز با استفاده از نرم‌افزار «Rock Work ۹۹» قطب درزه‌ها به همراه قطب بردار برخورد درزه‌ها با یکدیگر، بر روی استریونت هم مساحت (Schmidt net) پیاده شد. سپس با استفاده از الگوی ویلی‌دانکن پوش‌های لغزش گوه‌ی، مخروط اصطکاک داخلی و پوش‌های لغزش صفحه‌ی بر روی شبکه‌ی اشمیت رسم شد. در تونل مورد مطالعه با توجه به آذین بودن سنگ‌شناسی و عدم شناسایی لایه‌بندی خاص در سنگ‌های در برگیرنده‌ی تونل، عملاً سطوحی بنام لایه‌بندی در تحلیل‌ها در نظر گرفته نشده است.

برای تحلیل ناپایداری از نوع نگون‌سازی از رابطه‌ی گودمن [۱۷] استفاده شده است که بر اساس آن در صورت برقراری رابطه‌ی شیب ترانشه $Fi \leq$ شیب لایه - ۹۰ ناپایداری از نوع نگون‌سازی رخ خواهد داد.

۱.۴.۵. ترانشه‌ی ورودی، دیواره‌ی سمت راست

قطب گوه‌های ۱۳ و ۲۳ از قابلیت لغزش از نوع گوه‌ی برخوردارند که در این میان قطب گوه ۱۳ به دلیل قرار گرفتن در مخروط پایداری عملاً فاقد هر نوع حرکتی است و پایدار می‌ماند. قطب گوه ۲۳ نیز به دلیل قرار گرفتن در مرز پوش لغزش ۷۵ درجه با اعمال شیب‌های کم‌تر از این مقدار پایدار می‌ماند، و لذا شیب ۳ به ۱ یا ۷۲ درجه را برای مهار حرکت و ناپایداری این گوه می‌توان منظور کرد. از دیدگاه ناپایداری نوع صفحه‌ی قطب صفحه ۳ مربوط به دسته درزه J۳، خارج از

۶. نتیجه‌گیری

حرکات غیرقابل پیش‌بینی شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود تا حد امکان و در حد مقدرات اقتصادی و فنی پروژه از ایجاد شیب‌های تند شیروانی در این منطقه جلوگیری کرده و عملیات پایدارسازی را به سمت استفاده از شیب‌های کم‌تر سوق داد. علاوه بر این با کمک نرم‌افزار Phase^۲، سیستم نگه‌داری مناسب با استفاده از میل مهار (فولاد St. ۳۷، به‌قدر ۲۲ میلی‌متر و به طول ۴ متر از نوع دوغابی) و شاتکریت (با مقاومت فشاری ۳۰ MPa و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر در تمام سطح تونل) و حفر ۲ مقطعی تونل، پس از ساخت ۱۲ مدل، تعیین و ارائه شد. از آنجا که این تونل به‌منظور احداث خط آهن و عبور قطار ساخته می‌شود، نشست کف تونل از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. بنابراین مؤلفین براساس داده‌های محققین پیشین، اقدام به ارائه‌ی یک رابطه ریاضی به‌منظور تعیین بیشینه‌ی ظرفیت باربری مجاز پی سنگی بر مبنای RMR کردند.

بر این اساس، با تعیین نوع لوکوموتیو عبوری از تونل و بیشینه بار اعمالی به کف، ظرفیت باربری مجازی با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی مؤلفین مورد بررسی قرار گرفته و پایداری کامل آن تأیید شد.

در این تحقیق تحلیل پایداری تونل و ترانشه‌ی ورودی و گوه‌های داخل تونل راه آهن قزوین-رشت‌سازلی کیلومتر ۴۰+۴۷ توسط نرم‌افزار Unwedge و Phase^۲ به‌منظور طراحی سیستم نگه‌داری مناسب انجام گرفت. با توجه به سنگی‌بودن ترانشه‌ی ورودی در این تونل و مقاومت فشاری بالایی که در بخش سنگ بکر این قسمت توسط بررسی‌های صحرایی ملاحظه شده است، در نگاه اول شاید بتوان نتیجه گرفت که می‌توان به‌راحتی با استفاده از میل مهار و شاتکریت بر میزان شیب شیروانی ترانشه‌ها برای کاهش حجم عملیات حفر ترانشه و کوه‌بری افزود. اما در این مطالعه به‌استثنا یک مورد، استفاده از چنین روشی توصیه نشده است، زیرا با توجه به سابقه‌ی بروز انواع حرکت‌های لغزشی و توده‌یی در این منطقه شاید به جرأت بتوان گفت عامل اصلی تمامی آن‌ها فعالیت و حرکت گسل‌های منطقه است. ایجاد شیب‌های تند با استفاده از شاتکریت و میل مهار به‌دلیل تشکیل مورفولوژی قائم و صخره‌یی در ترانشه‌ها می‌تواند خود عاملی برای افزایش تنش‌های مؤثر در پای دیواره‌ها شده و در نتیجه باعث بروز

پانویس

1. bedding
2. joints
3. faults

منابع

1. Alavi, M. "Tectono stratigraphic synthesis and structural style of the alborz mountain system in iran", *J. Geodynamic*, **21**(1), pp. 1-33 (1996).
2. Ortigao, J., Sayao, A., "Handbook of slope stabilization", Springer, p. 478 (2004).
3. Sakurai, S., "Lessons learned from field measurements in tunneling", *Tunneling and underground space technology*, **12**(4), pp. 453-460 (1997).
۴. دفتر فنی امور طرح‌ها- وزارت راه و ترابری ایران گزارش مرحله یک تونل کیلومتر ۴۰+۴۷ راه آهن قزوین-رشت‌سازلی، ۱۴۰ ص (۱۳۸۳).
5. Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B., Hoek-Brown failure criterion-2002 Edition, Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto in July (2002).
6. Bieniawski, Z.T., "Engineering rock mass classification", *John Wiley & Sons*, p. 251 (1989).
۷. گودمن، ر. «مکانیک سنگ»، ترجمه‌ی محمد دانش، انتشارات فولاد، ۶۴۵ ص (۱۳۷۴).
8. Hoek, E., strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, **2**(2), pp. 4-16 (1994).
9. Sheory, P.R., Epirical Rock Failure Criteria, John Wiley & Sons Ltd (1997).
10. Raymond, L., Lowrie, P., "SME mining reference Handbook", SME, p. 447 (2002).
۱۱. سینگ، گوپل. «رده‌بندی توده‌سنگ»، ترجمه‌ی رسول آجل لوییان و داوود محمدی، انتشارات فن‌آوران، ۳۴۹ ص (۱۳۸۲).
۱۲. بلودن، کیسره، هوک. «نگه‌داری حفاریات زیرزمینی در سنگ‌های سخت»، ترجمه‌ی مرتضی قارونی نیک، انتشارات مؤسسه علمی فرهنگی نص، ۲۷۰ ص (۱۳۸۰).
۱۳. هراتی، محمد رضا. «طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها در ارتباط با طراحی فضاهای زیرزمینی»، شرکت انتشارات فنی تهران، ۱۶۸ ص (۱۳۷۴).
۱۴. هوک، اورت. «مهندسی سنگ کاربرد»، ترجمه عبدالرضا طاهریان، انتشارات دهخدا، ۵۱۲ ص (۱۳۸۱).
15. Wyllie, D., Mah, C., "Rock slope engineering", Spon Press, p. 431 (2004).

پیوست

جدول الف. فهرست مشخصات کلیه درزه‌های برداشت شده در محدوده‌ی تونل راه آهن قزوین-رشت -انزلی کیلومتر ۴۰+۴۷.۴۷^[۱]

شماره	عمق	d/Dip	شماره	عمق	d/Dip	شماره	عمق	d/Dip
۱	۵۰	۳۵۰	۲۷	۷۵	۲۵۳	۵۳	۴۵	۲۱۵
۲	۶۲	۳۵	۲۸	۴۲	۱۶۰	۵۴	۷۵	۳۲۰
۳	۶۳	۲۹	۴۶	۱۸۵	۵۵	۴۵	۱۱۰	۱۹۵
۴	۶۵	۲۰۰	۳۰	۵۰	۲۲	۵۶	۸۵	۱۶۵
۵	۳۵	۳۱	۶۰	۲۱۵	۵۷	۶۵	۱۴۵	۲۷۰
۶	۵۰	۳۰	۳۲	۷۵	۱۴۵	۵۸	۸۷	۱۴۰
۷	۸۵	۱۳۵	۳۳	۲۵۵	۴۵	۵۹	۲۵	۸۰
۸	۶۰	۵۰	۳۴	۵۵	۴۵	۶۰	۳۴	۲۳۵
۹	۷۲	۲۲۰	۳۵	۸۰	۱۲۰	۶۱	۷۳	۱۶۵
۱۰	۴۵	۰	۳۶	۷۰	۱۲۵	۶۲	۴۰	۳۵
۱۱	۷۸	۲۹۵	۳۷	۵۲	۳۰	۶۳	۴۰	۲۳۵
۱۲	۵۳	۴۰	۳۸	۷۵	۲۵۴	۶۴	۴۳	۲۳۰
۱۳	۹۰	۱۲۰	۳۹	۸۲	۳۴۰	۶۵	۸۸	۲۷۰
۱۴	۸۵	۱۲۰	۴۰	۴۵	۲۰۳	۶۶	۹۰	۳۴۰
۱۵	۵۰	۱۴۳	۴۱	۵۸	۳۳۲	۶۷	۶۰	۱۲۵
۱۶	۳۰	۸۵	۴۲	۸۰	۲۱۵	۶۸	۷۵	۷۵
۱۷	۴۵	۱۳۵	۴۳	۷۳	۳۲۵	۶۹	۲۰	۲۴۲
۱۸	۹۰	۱۳۵	۴۴	۲۵	۲۲۴	۷۰	۵۴	۲۳۰
۱۹	۴۸	۳۵	۴۵	۸۴	۱۳۰	۷۱	۲۰	۲۷۰
۲۰	۵۷	۱۸۰	۴۶	۳۳	۲۵	۷۲	۴۵	۲۴۰
۲۱	۵۰	۲۸	۴۷	۸۵	۱۳۸	۷۳	۳۰	۲۵۵
۲۲	۵۵	۱۴۰	۴۸	۲۵	۲۲۵	۷۴	۲۵	۲۵۵
۲۳	۴۵	۱۸	۴۹	۱۵	۲۰	۷۵	۵۸	۷۵
۲۴	۴۵	۲۷۰	۵۰	۲۸	۱۹۵	۷۶	۳۰	۲۴۰
۲۵	۳۹	۱۵۵	۵۱	۸۰	۳۱۰	۷۷	۴۰	۳۱۰
۲۶	۴۳	۳۰۵	۵۲	۵۰	۹۰			

جدول ب. فهرست داده‌های ظرفیت باربری مجازی‌های سنگی بر مبنای RMR (مهره‌ترا! ۱۹۹۳).^[۲]

شماره	RMR	qa (MPa)	شماره	RMR	qa (MPa)	شماره	RMR	qa (MPa)
۱	۲۰,۰۰۰	۰,۴۲۵	۱۴	۴۱,۳۰۴	۱,۵۱۱	۲۷	۵۶,۳۰۴	۲,۶۷۷
۲	۲۰,۰۰۰	۰,۵۷۳	۱۵	۴۵,۰۰۰	۱,۶۸۷	۲۸	۵۶,۳۰۴	۲,۷۵۰
۳	۲۴,۳۴۸	۰,۵۸۳	۱۶	۴۴,۳۴۸	۱,۸۳۳	۲۹	۵۶,۳۰۴	۲,۸۳۳
۴	۲۷,۱۷۴	۰,۴۷۹	۱۷	۴۶,۳۰۴	۲,۶۲۵	۳۰	۱,۸۹۶	۵۵,۴۳۵
۵	۲۵,۲۱۷	۰,۸۹۶	۱۸	۴۸,۲۶۱	۱,۸۹۶	۳۱	۵۳,۲۶۱	۲,۵۰۰
۶	۲۸,۹۱۳	۰,۷۰۸	۱۹	۵۰,۰۰۰	۱,۸۶۲	۳۲	۵۱,۳۰۴	۲,۶۸۷
۷	۳۱,۹۵۷	۰,۸۳۳	۲۰	۴۸,۲۶۱	۲,۵۴۲	۳۳	۵۸,۴۷۸	۲,۱۰۴
۸	۳۰,۲۱۷	۰,۹۱۶	۲۱	۴۸,۲۶۱	۲,۲۹۲	۳۴	۵۸,۴۷۸	۲,۷۰۸
۹	۳۰,۲۱۷	۱,۰۸۳	۲۲	۵۳,۹۱۳	۱,۹۱۷	۳۵	۶۰,۰۰۰	۲,۴۵۸
۱۰	۳۴,۳۴۸	۱,۲۷۱	۲۳	۵۳,۹۱۳	۲,۲۹۲	۳۶	۶۰,۰۰۰	۲,۸۷۵
۱۱	۳۸,۲۶۱	۱,۱۲۵	۲۴	۵۵,۴۳۵	۲,۲۵۰	۳۷	۶۰,۰۰۰	۳,۰۰۰
۱۲	۳۸,۰۴۴	۱,۳۴۴	۲۵	۵۶,۳۰۴	۲,۲۷۱	۳۸	۶۰,۰۰۰	۳,۲۵۰
۱۳	۴۲,۳۹۱	۱,۳۱۳	۲۶	۵۶,۳۰۴	۲,۴۱۷	۳۹	۵۹,۱۳۰	۳,۰۸۳