

بررسی زمین شناسی مهندسی توده سنگ‌های قطعه جنوبی قطار شهری اصفهان و تحلیل سیستم نگهدارنده با توجه به ناپایداری‌های ساختاری

رسول اجل لوئیان^۱، رسول دادخواه^۲، محمود هاشمی اصفهانیان^۱

پذیرش مقاله : ۸۶/۶/۴

دریافت مقاله : ۸۵/۸/۱

چکیده:

به منظور رده‌بندی مهندسی توده سنگ‌های دربرگیرنده تونل‌های قطعه جنوبی (خط ۱) قطار شهری اصفهان حد فاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه از رده‌بندی ژئومکانیکی RMR، شاخص کیفی تونل زنی در سنگ Q و شاخص مقاومت زمین شناختی GSI استفاده شد. با توجه به اینکه شایعترین ریزش در تونل‌های حفاری شده در توده سنگ‌های درزه‌دار و کم عمق لغزش گوه‌ها از سقف و دیواره‌ها می‌باشد، لذا برای شناسایی گوه‌های ناشی از تقاطع دسته درزه‌های موجود در این محدوده از نرم افزار Unwedge استفاده شد. پس از شناسایی گوه‌های احتمالی سیستم نگهدارنده مناسب جهت پایداری آنها تخمین زده شد. تحلیل و بررسی سیستم‌های نگهدارنده نیازمند شناخت پارامترهای ژئومکانیکی و تغییر شکل پذیری توده سنگ‌های در برگیرنده است، به همین منظور با استفاده از روش GSI این پارامترها تعیین گردیده‌اند. پس از تعیین این پارامترها به کمک روش عددی با بکارگیری نرم افزار Phase²، تونل‌های مذکور مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و میزان جابجایی حداکثر در آنها تعیین شده است.

کلید واژه ها: زمین شناسی مهندسی، سیستم نگهدارنده، توده سنگ، اصفهان

۱- گروه زمین شناسی دانشگاه اصفهان

۲- کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی

مقدمه:

با افزایش جمعیت شهری و محدودیت‌های موجود در شهرهای بزرگ، اجرای سازه‌های زیرزمینی نظیر تونل از جمله راهکارهای مناسب برای افزایش سرعت حمل و نقل و کاهش ترافیک می‌باشد. در تونل‌هایی که در توده سنگ‌های درزه‌دار و در عمق کم حفر می‌شوند، متداولترین و شایعترین نوع گسیختگی، به سقوط گوه‌ها از سقف و یا لغزش بلوک‌های منفرد از دیوارها مربوط می‌گردد. این گوه‌ها در اثر تقاطع مشخصات ساختاری موجود در سنگ، نظیر سطوح لایه بندی و درزه‌ها که توده‌های سنگی را به تکه‌های مجزا اما در هم قفل شده، جدا می‌کنند به وجود می‌آیند. هنگامی که در اثر حفر فضای زیرزمینی سطح آزاد معینی به وجود آید، بعضاً شماری از این گوه‌ها می‌توانند سقوط کنند و یا به طریقی در امتداد سطح درزه لغزش نمایند (قارونی نیک و همزه، ۱۳۸۰). یکی از اهداف اصلی، تعیین مناسبترین و اقتصادی ترین سیستم نگهدارنده به همراه بهترین روش حفاری می‌باشد. در این میان ویژگی‌های مهندسی توده‌های سنگی مانند مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نقش مهم و اساسی جهت تخمین ظرفیت باربری سیستم نگهدارنده و تحلیل پایداری تونل‌ها ایفا می‌نمایند. در بسیاری موارد حتی یک سوء تعبیر کوچک در تعیین پارامترهای مقاومتی توده سنگی می‌تواند منجر به صرف هزینه و زمان اضافی در مرحله اجرای پروژه گردد (مدنی، ۱۳۷۹).

لذا مهمترین مرحله از مطالعات اولیه جهت تحلیل پایداری تونل، ارزیابی ویژگی‌های ساختاری و برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ‌ها می‌باشد. در مقاله حاضر، سعی شده است ویژگی‌های مهندسی و پارامترهای مقاومتی توده‌های سنگی در مسیر به دقت مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. لازم به ذکر است محدوده مورد مطالعه بخشی از قطعه جنوبی در حد فاصل ایستگاه آزادی تا ایستگاه دانشگاه است، که دارای مقطع نعل اسبی به ارتفاع ۶/۵ متر و عرض ۷ متر می‌باشد.

زمین شناسی:

منطقه مورد مطالعه شامل تناوبی از شیل و ماسه‌سنگ بوده، که این توده‌های سنگی جزو سازند شمشک با سن ژوراسیک می‌باشند. این سازند در اکثر نواحی ایران به جز مکران و زاگرس شناسایی شده است و کم و بیش نشان دهنده یک محیط رسوبی کم عمق کولابی - دریا کناری می‌باشد. در این سازند لایه‌های ذغالی با گستردگی کم مشاهده می‌گردد ولی در ناحیه اصفهان تاکنون گزارش نشده است (دادخواه، ۱۳۸۵).

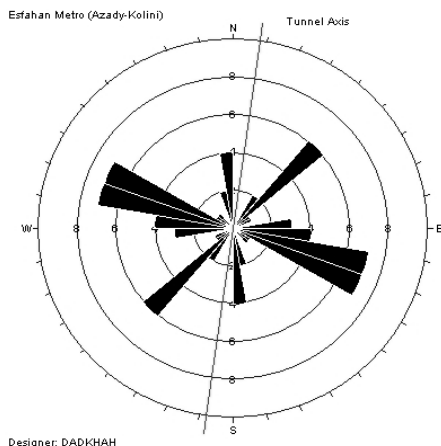
بررسی زمین شناسی مهندسی توده‌سنگ‌های حد فاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

به منظور شناسایی ویژگی‌های توده‌های سنگ و پارامترهای ژئومکانیکی نیاز به بررسی و برداشت‌های ناپیوستگی‌ها و دیگر پارامترهای زمین شناسی می‌باشد. در این راستا از برداشت‌های در حین حفاری، گمانه‌های اکتشافی حفاری شده و رخنمون‌های موجود در ترانشه‌های نزدیک به محور تونل کمک گرفته شده است. در حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه توده‌سنگ‌های دربرگیرنده عمدتاً شیلی است که، شامل انواع شیل سیاه‌رنگ، شیل روشن، شیل‌های ماسه‌ای می‌باشد. در این مقطع از تونل اطلاعات مربوط به ۹۳ ناپیوستگی برداشت شده است که، شامل چهار دسته ناپیوستگی غالب (۳ دسته درزه و لایه‌بندی) به همراه ناپیوستگی اتفاقی می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱: مشخصات ناپیوستگی‌های در توده‌سنگ‌های

حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه (دادخواه، ۱۳۸۵)

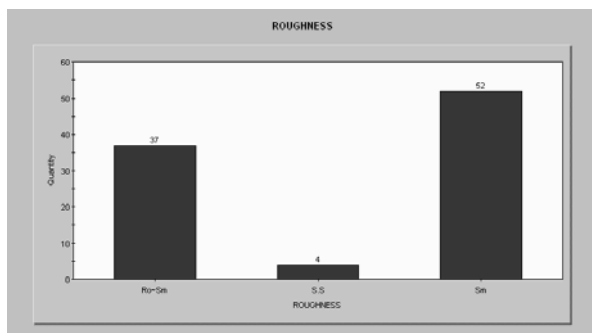
| ردیف | ناپیوستگی | شیب | سمت شیب |
|------|-------------|-------|---------|
| ۱ | دسته درزه ۱ | ۷۰-۸۰ | ۸۰ |
| ۲ | دسته درزه ۲ | ۷۰-۸۰ | ۱۳۰ |
| ۳ | دسته درزه ۳ | ۶۰-۷۰ | ۲۰ |
| ۴ | لایه بندی | ۶۰-۸۰ | ۱۷۰-۲۰۰ |
| ۵ | | ۵۵-۷۵ | ۰-۴۰ |



شکل ۲: نمودار رزدياگرام ناپيوستگي ها در توده سنگ هاي حدفاصل ايستگاه آزادي-دانشگاه

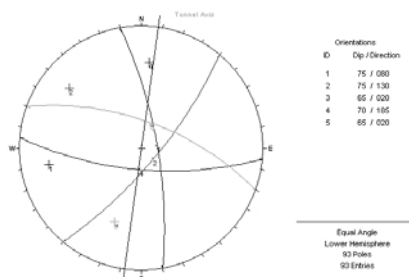
بر اساس داده هاي حاصل از برداشت هاي انجام شده خصوصيات ظاهري ناپيوستگي ها در حد فاصل ايستگاه آزادي-دانشگاه توسط نرم افزار Dips v.5.1 آناليز گردیده است. در اشكال شماره (۳) تا (۶) اين خصوصيات نشان داده شده است.

از لحاظ هوازدگي سطح ناپيوستگي ها عمدتاً متوسط به بالا مي باشند به صورتيکه بيش از ۹۰ درصد آنها در رده متوسط به بالا قرار مي گيرند (شکل ۴).



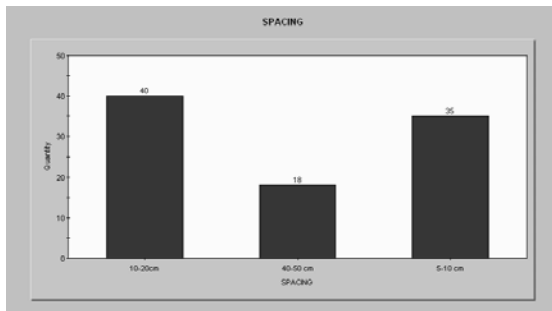
شکل ۳: آناليز آماری زبري ناپيوستگي ها در توده سنگ هاي حدفاصل ايستگاه آزادي-دانشگاه (Ro=Rough Sm=Smooth S.S=Slikensided)

همانگونه که در جدول (۱) نشان داده شده است، لایه بندی دارای دو سمت شیب می باشد که هر کدام با همدیگر اختلاف ۱۸۰ درجه دارند. علت این امر را می توان بدین گونه بیان نمود که به دلیل وجود نیروهای تکنونیکي و خاصیت شکل پذیری بالا در لایه های شیلی در این محدوده چین خوردگی بوجود آمده است که این چین ها حالت پخ مانند داشته و راستای محور این چین ها تقریباً عمود بر امتداد و راستای تونل در حد فاصل میدان آزادی تا ایستگاه دانشگاه می باشد. بر همین اساس در فاصله کمی (با توجه به دامنه کم چین ها) سمت شیب لایه بندی با اختلاف ۱۸۰ درجه رخنمون می یابد (شکل ۱).



شکل ۱: تصویر استریوگرافي ناپيوستگي هاي موجود در توده سنگ هاي حدفاصل ايستگاه آزادي-دانشگاه

در شکل ۲ نمودار رزدياگرام ناپيوستگي ها نشان داده شده است. در این شکل امتداد تونل عمود بر راستای عمده ترین ناپيوستگي با روند شرقي- غربی است. در این نمودار راستای دسته درزه ها در سه جهت نسبت به محور چین خوردگی در منطقه است. دسته درزه های عمده دارای روند شرقي - غربی بوده و تقریباً عمود بر محور تونل و به موازات محور چین ها می باشند و ساز و کار تشکیل آنها بدین صورت است که در راستای عمود بر راستای تنش اصلی شکل گرفته اند (دادخواه، ۱۳۸۵).



شکل ۶: آنالیز آماری فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ‌های حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

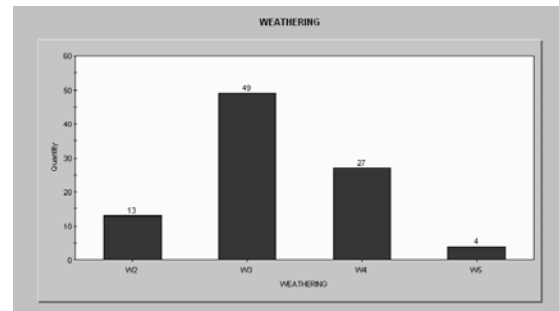
بر اساس اصول اولیه زمین‌شناسی مهندسی اجرای سازه در توده‌سنگ‌هایی که دارای ناپیوستگی با فاصله‌داری کم هستند، اولاً بدلیل ایجاد آنومالی و ایجاد ناهمگونی و ثانیاً افزایش هوازگی در اثر ایجاد مجاری برای حرکت آب‌های زیرزمینی همراه با مشکل است.

رده بندی ژئومکانیکی توده سنگ‌های حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

توده‌سنگ‌های موجود در این قسمت از تونل به صورت غالب از انواع شیل تشکیل شده‌اند. خصوصیات ناپیوستگی‌های غالب و شرایط زمین‌شناسی توده‌سنگ‌ها بر اساس داده‌های در حین برداشت نشان دهنده غالب بودن دسته درزه‌های ۱ و ۳ می‌باشد که می‌توان بیان نمود این درزه‌ها دارای هوازگی کم تا خیلی زیاد، وضعیت رطوبت از حالت مرطوب تا جریانی، دارای پرکننده‌های رس و سیلت و کمی کلسیت، حالت صاف تا کمی زبر و با فاصله‌داری عمده بین ۵ - ۵۰ سانتیمتر می‌باشد. بر همین اساس مقدار عددی RMR_{89} بین ۴۰ تا ۱۸ و میانگین ۳۰ می‌باشد (جدول ۲) (اجل لوئیان و داوودی، ۱۳۸۲)، (Bieniawski, 1989).

تعیین سیستم نگهدارنده توده‌سنگ‌های حدفاصل ایستگاه آزادی- دانشگاه بر اساس روش RMR_{89}

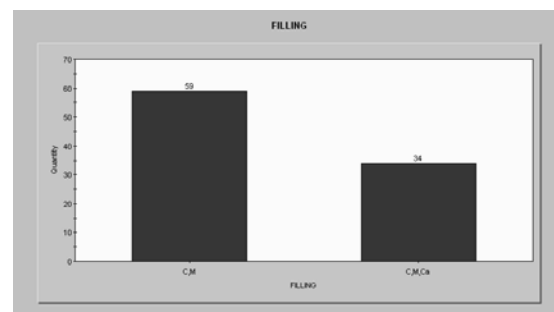
بر اساس مقدار عددی RMR_{89} سیستم نگهدارنده پیشنهادی و روش حفاری به صورت حفاری با روش سینه‌کار بالایی و سکوی پایینی که مقدار پیشروی در سینه کار بالایی ۱ تا ۱/۵



شکل ۴: آنالیز آماری هوازگی ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ‌های حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

(w2=low weathering, w3= moderately weathering, w4=high weathering, w5=very high weathering)

با توجه به لیتولوژی عمده منطقه و فراوانی لایه‌های شیلی سطوح ناپیوستگی‌ها عمدتاً از رس و سیلت به همراه کمی کلسیت پر شده است، به گونه‌ای که بیش از ۸۰ درصد پرکننده‌های ناپیوستگی‌ها رس و سیلت می‌باشد (شکل ۵). با توجه به شکل (۶) و بر اساس داده‌های برداشت شده می‌توان بیان نمود که بیش از ۸۰٪ ناپیوستگی‌ها دارای فاصله‌داری کمتر از ۲۰ سانتیمتر می‌باشند. در این محدوده کمترین آمار فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها در محدوده ۵۰ - ۴۰ سانتیمتر است. بر اساس اصول اولیه زمین‌شناسی مهندسی اجرای سازه در توده‌سنگ‌هایی که دارای ناپیوستگی با فاصله‌داری کم هستند، در این محدوده کمترین آمار فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها در محدوده ۵۰ - ۴۰ سانتیمتر است.



شکل ۵: آنالیز آماری پرشدگی ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ‌های حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه
(Ca=Calcite M=Silt C=Clay)

تعیین شاخص Q توده سنگ های حد فاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

دسته درزه های شماره ۱ و ۳ در این محدوده حالت غالبدارند که با توجه به شرایط این ناپیوستگی ها و دیگر پارامترهای مؤثر در تعیین این اندیس میزان Q بین ۰/۷۵ - ۰/۱۳ و میانگین ۰/۳۸ برآورد شده است که در این صورت توده سنگ را می توان در حالت ضعیف تا به شدت ضعیف در نظر گرفت (جدول ۳) (اجل لوئیان و داوودی، ۱۳۸۲)، (Barton et al, 1974).

متر و پس از ۱۰ متر پیشروی، سیستم نگهداری کامل اجرا شود و سپس سکوی پائینی حفاری گردد. سیستم نگهدارنده شامل پیچ سنگ هایی تزریقی به طول ۵ - ۴ متر و فاصله ۱/۵ تا ۱ متر به همراه سیم توری و بتن پاشیده به ضخامت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیمتر در تاج و ۳۰ میلیمتر بتن پاشیده در صورت لزوم قاب های فلزی سبک تا متوسط به فاصله ۱/۵ متر در دیواره می باشد (مدنی، ۱۳۷۹).

جدول ۲: رده بندی ژئومکانیکی توده سنگ های حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

| امتیاز | مقدار | پارامتر |
|-------------|---|--|
| ۲ - ۴ | ۹/۴ - ۳۶ | مقاومت تراکم تک محوری (MPa) |
| ۳ - ۸ | < ۲۵٪ - ۴۵٪ | شاخص کیفی سنگ (RQD) |
| ۸ | ۶۰ - ۲۰۰ | فاصله داری (میلیمتر) |
| ۱۰ - ۱۲ | سطح درزه با بازشدگی ۱ تا ۵ میلیمتر و هوازدگی بالا | وضعیت ناپیوستگی |
| ۰ - ۱۰ | مرطوب تا جریانی | وضعیت آب های زیرزمینی |
| (-۲) - (-۵) | مطلوب تا نسبتاً خوب | برآورد تاثیر جهت ناپیوستگی های روی تونل ها |
| | ۱۸ - ۴۰ ۳۰ | امتیاز توده سنگ (RMR) |
| | خیلی ضعیف تا ضعیف | کلاس توده سنگ |
| | ۱۰ ساعت برای دهانه ۵ متری | میانگین زمان ایستایی سقف |
| | ۰/۲ - ۰/۱ | چسبندگی توده سنگ (MPa) |
| | ۲۵ - ۱۵ | زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ (درجه) |

جدول ۳: اندیس Q توده سنگ های حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

| امتیاز | توصیف | پارامتر |
|----------|--|--------------------------|
| ۲۰ - ۴۵ | ۲۰ - ۴۵ | شاخص کیفی سنگ |
| ۹ - ۱۲ | سه دسته درزه به همراه درزه های اتفاقی | تعداد دسته درزه (Jn) |
| ۱ - ۱/۵ | صاف، مسطح تا کمی زبر | عدد زبری درزه (Jr) |
| ۲ - ۸ | هوازدگی متوسط تا بالا و سطح درزه ها دارای هوازدگی متوسط تا بالا | عدد دگرسانی درزه (Ja) |
| ۰/۳۳ - ۱ | محیط حفاری خشک یا دارای جریان کم آب تا جریان شدید آب | فاکتور کاهش آب درزه (Jw) |
| ۵ | منطقه ضعیف حاوی رس یا سنگ تجزیه شده (عمق حفاری کمتر یا مساوی ۵۰ متر می باشد) | فاکتور کاهش تنش (SRF) |
| | ۰/۱۳ - ۰/۷۵ ۰/۳۸ | اندیس Q |
| | خیلی ضعیف تا به شدت ضعیف | کلاس توده سنگ |

تعیین سیستم نگهدارنده توده سنگ‌های حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه با استفاده از اندیس Q

به منظور تعیین سیستم نگهدارنده با استفاده از اندیس Q نیاز به تعیین بعد معادل (D_e) می‌باشد، با توجه به درصد اهمیت ناپایداری فضای زیرزمینی ($ESR=1$) و دهانه یا قطر حفاری (که برابر با ۷ متر در نظر گرفته می‌شود) میزان بعد معادل برابر با ۷ تعیین می‌گردد. بر اساس مطالب ارائه شده سیستم نگهدارنده مورد نیاز برای این کیلومتر از تونل به صورت ذیل پیشنهاد می‌گردد:

۹۰ - ۱۲۰ میلیمتر بتن پاشیده تقویت شده با فیبر فلزی به همراه پیچ سنگ‌هایی تزریقی با فاصله‌داری ۲/۳ - ۲/۵ متری در منطقه شاکریت شده مورد نیاز است (مدنی، ۱۳۷۹).

اندیس مقاومت زمین‌شناسی حدفاصل ایستگاه آزادی- دانشگاه

با توجه به شرایط توده سنگ‌های این کیلومتر از تونل که حاوی چهار دسته درزه ناپیوستگی (سه دسته درزه غالب به همراه لایه بندی) و ناپیوستگی‌های اتفاقی و شرایط سطح ناپیوستگی می‌توان میزان اندیس مقاومت زمین‌شناسی را بر اساس روش مشاهده ای بین ۳۵ - ۲۵ در نظر گرفت (Hoek, 1994). همچنین بر اساس میزان RMR_{89} می‌توان میزان GSI را توسط فرمول ذیل تعیین نمود البته با فرض اینکه محیط را خشک و یک جهت مناسب برای درزه‌ها در نظر گرفت که بر همین اساس مقدار عددی GSI معادل ۴۲ - ۳۳ تعیین می‌گردد.

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

همچنین برای تعیین مقدار عددی GSI از روش پیشنهادی (Cai et al, 2004) استفاده شده است. بر همین اساس میزان حجم بلوک شکل گرفته در اثر تقاطع ناپیوستگی‌ها برابر m^3 $4/21 \times 10^3$ بدست آمده است و میزان فاکتور شرایط درزه معادل $0/31$ بدست می‌آید. حال با در نظر گرفتن حجم بلوک و فاکتور شرایط درزه مقدار عددی GSI معادل ۳۰ خواهد بود (Cai et al, 2004).

برآورد خواص مقاومتی توده سنگ‌های حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

استفاده از معیار هوک- براون بر اساس گراف ارائه شده توسط هوک تنها در مورد سنگ‌های بکر یا توده سنگ‌های شدیداً درزه دار صادق است (قارونی نیک و همزه ایبازنی، ۱۳۸۰). حال با توجه به وجود چند دسته ناپیوستگی با فاصله‌داری کم می‌توان بیان نمود که این توده سنگ‌ها شدیداً درزه‌دار بوده و از این معیار جهت تخمین پارامترهای ژئومکانیکی استفاده نمود.

با توجه به اینکه در اکثر روش‌های تحلیل سازه‌های زیرزمینی میزان مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از جمله پارامترهای ورودی می‌باشند، نیاز به برازش معیار موهر- کلمب بر روی معیار هوک- براون جهت تعیین این دو پارامتر است. به منظور تعیین خواص مقاومتی توده سنگ‌های مورد نظر میزان اندیس مقاومت زمین‌شناسی با توجه به شرایط بین ۲۵ - ۳۵ و میانگین ۳۰ تخمین زده شده و همچنین بر اساس انجام آزمایشات مکانیک سنگ بر روی مغزه‌های حاصل از حفاری‌های اکتشافی مقاومت تراکمی تک محوری و خصوصیات فیزیکی ماده سنگ تعیین شده است که، نتایج حاصله در جدول (۴) آمده است.

گوه‌های محتمل در حد فاصل ایستگاه آزادی- دانشگاه

بر اساس نظریه هوک جهت تشخیص گوه‌های ناپایدار در مناطقی که دارای بیش از ۳ دسته ناپیوستگی می‌باشند، بهتر است از ۳ دسته ناپیوستگی بحرانی جهت تشخیص و شناسایی گوه‌های ناپایدار استفاده نمائیم (۴). با توجه به وجود چهار دسته ناپیوستگی در این مقطع می‌توان بیان نمود که ناپیوستگی‌های شماره ۱، ۳ و ۴ بزرگترین گوه را تشکیل می‌دهند. پس از اجرای حفاری در صورتیکه سطح مقطع گوه تماماً در فضای آزاد ناشی از حفاری قرار گیرد امکان سقوط و یا لغزش گوه محتمل امکان پذیر خواهد بود. با در نظر گرفتن

جدول (۴): برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ های حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه بر اساس GSI

| پارامتر | حداقل | حداکثر | میانگین | |
|--|---|--------|---------|---------|
| مقاومت تراکمی تک محوری ماده سنگ (MPa) | ۹/۴ | ۳۶ | ۲۲ | |
| اندیس مقاومت زمین شناسی GSI | ۲۵ | ۳۵ | ۳۰ | |
| ثابت ماده سنگ (m_i) | ۵ | ۷ | ۶ | |
| ثابت های هوک-براون | m_b | ۰/۳۴۳ | ۰/۶۸۷ | |
| | s | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۷ | |
| | a | ۰/۵۱۶ | ۰/۵۳۱ | |
| چگالی ماده سنگ (Kn/m^3) | ۲۶/۴۸ | ۲۶/۲۸ | ۲۶/۴۸ | |
| حد بالایی تنش محصور کننده σ_{3max} (MPa) | ۰/۱۹۱۸ | ۰/۲۱۲۶ | ۰/۲۰۴۸ | |
| چسبندگی توده سنگ (MPa) | ۰/۰۴۷ | ۰/۱۴۹ | ۰/۰۸۹ | |
| زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ (درجه) | ۳۵/۹۵ | ۵۱/۹۰ | ۴۵/۷۵ | |
| پارامترهای توده سنگ | مقاومت کششی توده سنگ (MPa) | -۰/۰۰۷ | -۰/۰۳۸ | -۰/۰۱۹ |
| | مقاومت تراکم تک محوری توده سنگ (MPa) | ۰/۱۱۲ | ۰/۸۶۷ | ۰/۳۷۸ |
| | مقاومت تراکمی توده سنگ (MPa) | ۰/۶۲۴ | ۳/۷۴۰ | ۱/۸۵۶ |
| | مدول الاستیسیته توده سنگ (E_m) (MPa) | ۷۲۷/۰۵ | ۲۵۳۰/۱۸ | ۱۴۸۳/۲۴ |

و پس از حفاری سیستم نگهدارنده نصب گردیده و حفاری ادامه می یابد که در این صورت نیز در ادامه حفاری قسمتی از قاعده گوه بر روی سیستم نگهدارنده نصب شده قرار می گیرد و بدین صورت عملاً از حرکت و لغزش گوه جلوگیری بعمل می آید (شکل ۷، جدول ۵).

گام حفاری پیش بینی شده که حداکثر ۲/۵ متر است و بر اساس تحلیل های انجام شده می توان بیان نمود که عملاً گوه های بزرگ شکل گرفته در این مقطع از تونل به طور کامل در فضای آزاد قرار نمی گیرند. بطوریکه بعد از حفاری قسمتی از سطح قاعده گوه بر روی توده سنگ های سینه کار قرار دارد

جدول (۵): ویژگی های گوه های احتمالی شناسایی شده در حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

| جانمایی | شماره گوه | وزن گوه (تن) | نوع حرکت | ضریب اطمینان |
|-------------|-------------|--------------|------------------------|--------------|
| دیواره راست | گوه شماره ۴ | ۳۵۱ | لغزش بروی درزه شماره ۱ | کمتر از ۱ |
| سقف | گوه شماره ۸ | < ۰/۱ | سقوط | کمتر از ۱ |
| دیواره چپ | گوه شماره ۶ | < ۰/۱ | لغزش بروی درزه شماره ۳ | کمتر از ۱ |

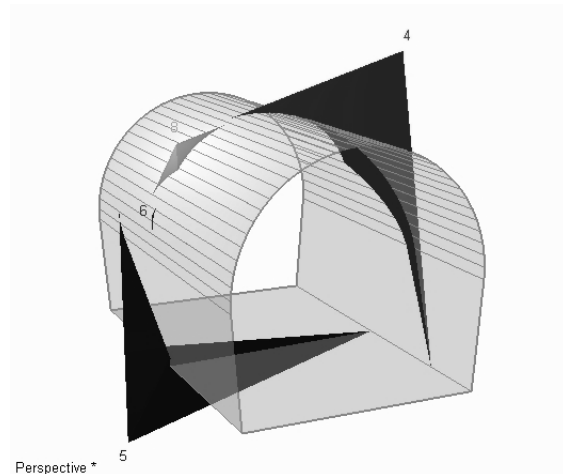
و با فاصله‌داری $2/5 \times 2/5$ و همچنین بتن پاشیده با مقاومت برشی 200 تن بر متر مربع به ضخامت 50 میلیمتر است.

آنالیز عددی توده سنگهای در برگیرنده تونل های قطار

شهری اصفهان در حد فاصل ایستگاه آزادی - دانشگاه

به منظور تحلیل پایداری، تعیین نقاط بحرانی، میزان جابجایی و دیگر پارامترهای موثر در طراحی سیستم نگهدارنده نیاز به مدلسازی تونل به کمک نرم افزارهای عددی است. در این مطالعه بر اساس شرایط لیتولوژیکی و عوامل زمین شناسی پس از تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توسط روش RMR و GSI مدلسازی تونل به کمک نرم افزار Phase انجام شده است (مدنی، ۱۳۸۱).

در این کیلومتر از تونل توده سنگ‌های دربرگیرنده تونل شامل شیل سیاه، شیل روشن و انواع شیل با هوازگی متوسط تا زیاد است. پارامترهای ژئومکانیکی مورد نیاز از جدول (۴) قابل استنتاج است. برای استفاده از معیار هوک-براون توده سنگ باید به صورت هموزن و ایزوتروپ در نظر گرفته شود که با توجه به درزه‌داری توده سنگ‌ها و سطحی بودن این پروژه می‌توان این شرایط را در نظر گرفت. در شکل (۸) تونل‌های مدلسازی شده قطار شهری اصفهان در حد فاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه نشان داده شده است. با توجه به نفوذ ناپذیر بودن شیل‌ها و بررسی‌های محلی می‌توان سطح ایستایی را در مرز بین توده سنگ و آبرفت‌های سطحی در نظر گرفت. در سقف تونل به دلیل ایجاد فضای آزاد تنش‌ها از همدیگر فاصله گرفته و بر همین اساس تنش کششی ایجاد می‌گردد و در نهایت در سقف تونل گسیختگی کششی توسعه خواهد یافت. در اطراف و خصوصاً دیواره‌های تونل به علت تمرکز تنش‌ها شرایط فشارشی ایجاد می‌شود که در نقاطی که این تنش بالاتر از مقاومت فشارشی توده سنگ باشد گسیختگی برشی ایجاد می‌گردد. در شکل (۹) گسیختگی‌های شکل گرفته در اطراف تونل‌های قطار شهری نشان داده شده است. پس از اجرای حفاری وضعیت تنش‌های موجود برهم خواهد خورد. به منظور رسیدن به حالت تعادل در منطقه تمرکز تنش

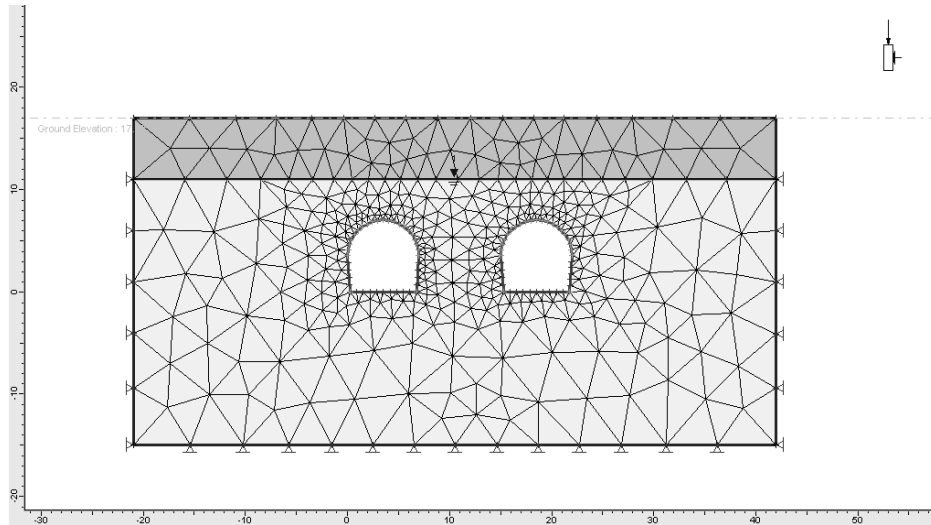


شکل (۷): گوه‌های شناسایی شده در امتداد تونل در حد فاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

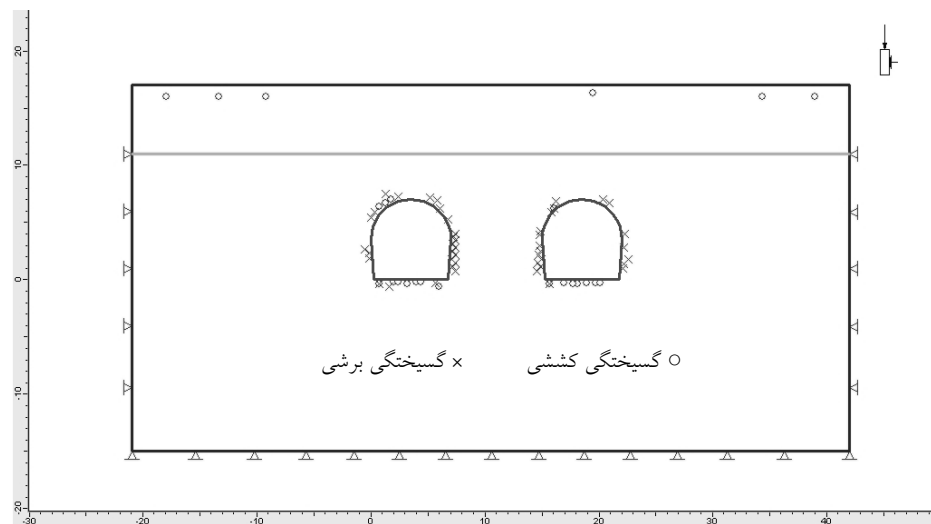
گوه‌های شماره ۶ و ۸ نیز دارای وزنی کمی بوده و به راحتی از طریق لق گیری برطرف می‌شوند. گوه شماره ۴ که دارای حرکتی از نوع چرخش و بر روی ناپیوستگی اول است دارای وزنی معادل 351 تن می‌باشد که در عمل تشکیل چنین گوه‌ای بعید به نظر می‌رسد و همچنین باید به این نکته توجه نمود که میزان روباره حداکثر 15 متر است که از این مقدار بیش از 2 متر ضخامت آبرفت و زیر سازی جاده می‌باشد. بنابراین تشکیل گوه‌ای با ارتفاع بیش از 12 متر بی مفهوم خواهد بود. حال با در نظر گرفتن این موضوع گوه شماره ۱ تغییر کرده و به گوه‌ای با وزنی معادل 75 تن و ضریب اطمینان کمتر از یک تبدیل خواهد شد. نوع حرکت گوه مذکور لغزش بر روی درزه ۱ است که با توجه به موقعیت قرارگیری گوه مذکور و پایین بودن ضریب اطمینان نیاز به سیستم نگهدارنده مناسب جهت پایداری این گوه می‌باشد. این گوه دارای سطح مقطعی در حدود 24 متر مربع می‌باشد که با توجه به توضیحات ارائه شده و کوتاه بودن گام حفاری (کمتر از $2/5$ متر) امکان حرکت و لغزش در این گوه بسیار پائین است. ولی در حالت کلی در صورتیکه گام حفاری بیش از $2/5$ متر باشد به منظور پایدار سازی گوه مذکور (با در نظر گرفتن ضریب اطمینان بیش از یک و حجم گوه) نیاز به پیچ سنگ‌هایی به طول 3 متر

مگاپاسکال می باشد. با توجه به مقاومت تراکمی توده سنگ که برابر با ۱/۸ مگاپاسکال است می توان دریافت که این مقطع از پایداری نسبتاً خوبی برخوردار خواهد بود.

ایجاد خواهد شد. همانگونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است پس از حفاری بیشترین تمرکز تنش در گوشه های مقطع حفاری بدلیل زاویه دار بودن ایجاد خواهد شد. در این شکل بالاترین میزان تنش القایی حداکثر بین ۰/۸۱ تا ۱/۰۸



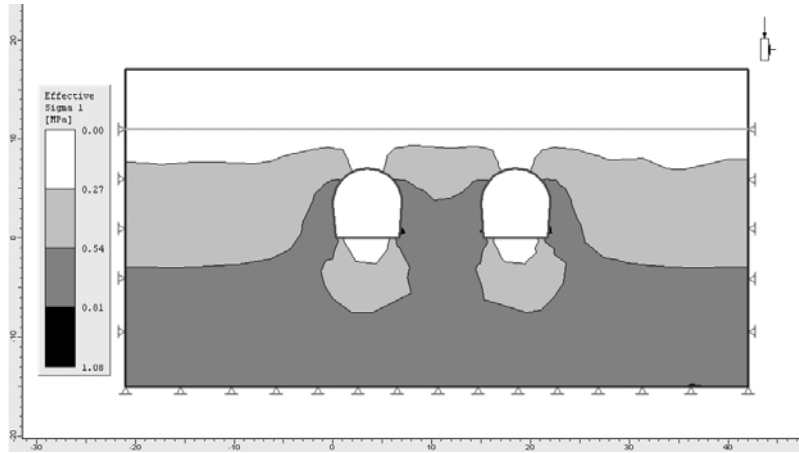
شکل (۸): مدل سازی تونل های قطار شهری به منظور تحلیل عددی



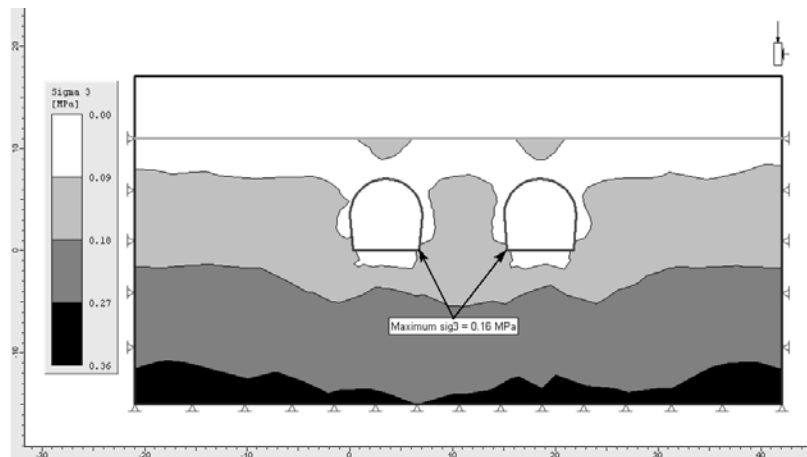
شکل (۹): گسیختگی های برشی و کششی در تونل های قطار شهری در حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

تنش های موجود که در اثر حفاری در منطقه ایجاد شده است و به منظور جلوگیری از تمرکز زدایی بهتر است در پاشنه های تونل خم ایجاد شود.

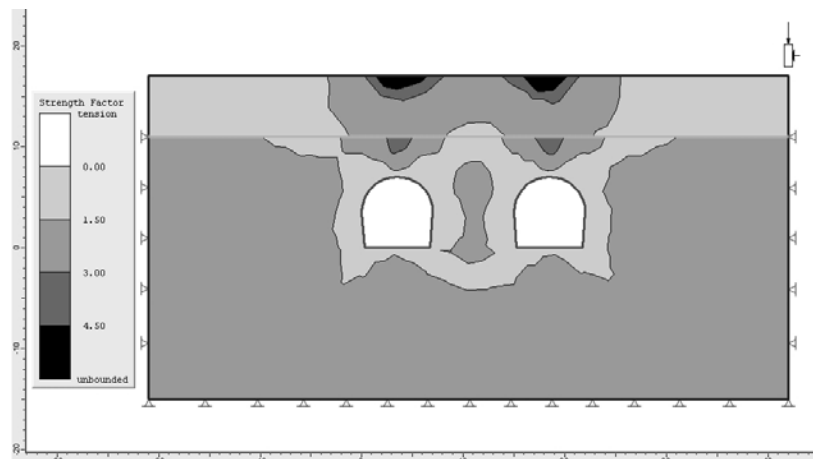
در شکل (۱۱) تمرکز یابی بیشترین تنش القایی حداقل در دیواره های تونل های قطار شهری اصفهان برابر با ۰/۱۶ مگاپاسکال می باشد و به دلایل ارائه شده در قسمت قبل در پاشنه های تونل تمرکز یافته است. حال بر اساس شرایط



شکل (۱۰): تنش‌های القایی حداکثر در تونل‌های قطار شهری اصفهان در حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه



شکل (۱۱): تنش‌های القایی حداقل در تونل‌های قطار شهری اصفهان در حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

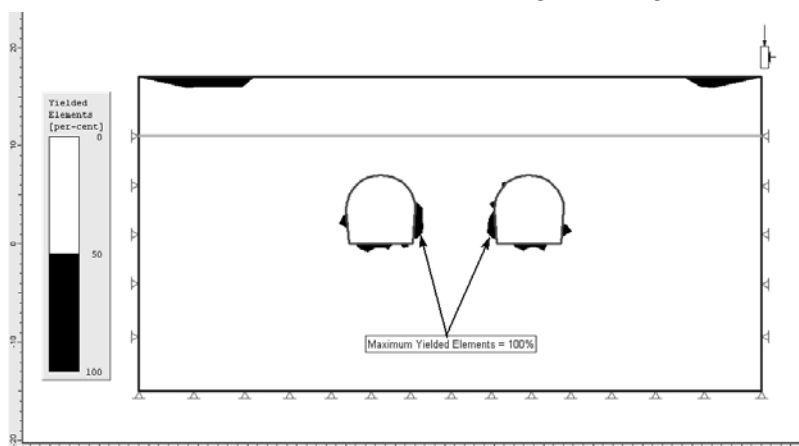


شکل (۱۲): فاکتور مقاومت در اطراف تونل‌های قطار شهری اصفهان در حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

در منطقه و تمرکز یابی تنش در اطراف فضاهای حفاری شده و همچنین حداقل فاکتور مقاومت، احتمال خطر در توده سنگ برآورد گردیده است. اگر نقاطی از توده سنگ را که تحت تاثیر قرار نگرفته اند از لحاظ احتمال خطر صفر مد نظر قرار داد، می توان ملاحظه نمود که احتمال خطر توده سنگ های دیواره های تونل ها بسیار بالا و نزدیک به ۱۰۰٪ می باشد.

از عوامل ایجاد ناپایداری در هر سازه ای غلبه نیروهای محرک به مقاوم است. با در نظر گرفتن شرایط تنش و مقاومت تراکمی توده سنگ ملاحظه می گردد که فاکتور مقاومت در توده سنگ های اطراف تونل ها برابر بین صفر تا ۱/۵ است که نشان دهنده شرایط مرزی از لحاظ پایداری در اطراف تونل است (شکل ۱۲).

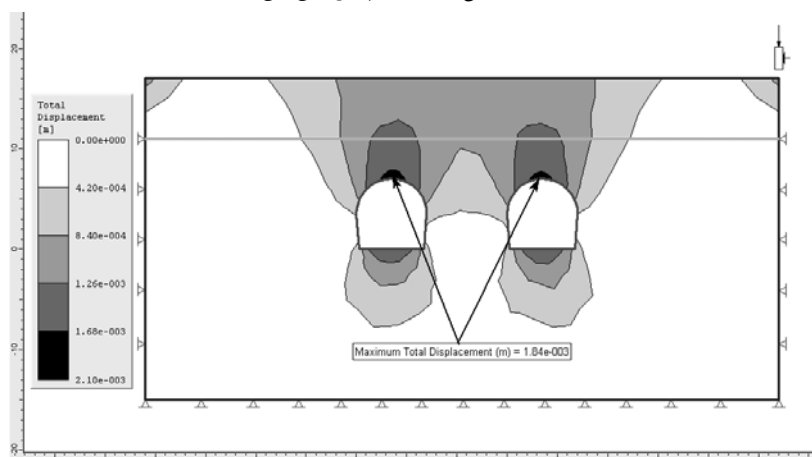
در شکل (۱۳) نقاط بحرانی که احتمال گسیختگی دارند مشخص گردیده است. با در نظر گرفتن شرایط تنش موجود



شکل (۱۳): عناصر بحرانی در اطراف تونل های قطار شهری اصفهان در حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

(۱۴) ملاحظه می گردد میزان جابجایی بسیار کم است که مؤید شرایط پایدار در منطقه است. نتایج آنالیز نشان دهنده شرایط نسبتاً خوب تا متوسط در این کیلومتر است که این موضوع با توجه به شرایط تنش منطقه و مقاومت توده های سنگی قابل پیش بینی می باشد.

مهمترین پارامتر در پایداری سازه های زیرزمینی میزان جابجایی در اطراف آن سازه می باشد. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل عددی در تونل های قطار شهری اصفهان در حد فاصل این کیلومتر بیشترین جابجایی در سقف تونل و برابر $1.84 \times 10^{-3} m$ برآورد گردیده است. همانگونه که در شکل



شکل (۱۴): جابجایی حداکثر در اطراف تونل های قطار شهری اصفهان در حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه

بحث و نتیجه گیری:

تونل های قطار شهری اصفهان در قطعه جنوبی در تناوبی از شیل و ماسه سنگ های سازند شمشک که دارای ۳ تا ۴ دسته درزه هستند، قرار گرفته اند. در بین روش های طبقه بندی، روش Q محافظه کارانه ترین آنها در ارزیابی کیفیت توده سنگ است.

بر اساس درزه های موجود گوه های احتمالی شناسایی شده اند که بحرانی ترین آنها گوه ای با وزن ۷۵ تن است. گوه مذکور با توجه به گام حفاری (کمتر از ۲/۵ متر) و سطح مقطع گوه پایدار خواهد ماند.

تحلیل عددی توده سنگ های دربرگیرنده تونل در حدفاصل ایستگاه آزادی-دانشگاه نشان دهنده تمرکز تنش در دیواره ها و پاشنه تونل است. در سقف فضای حفاری شده به دلیل شرایط تنش های القایی گسیختگی های کششی و در دیواره ها

گسیختگی های برشی ایجاد می گردد. بیشترین جابجایی در سقف تونل برابر $10^{-3} \times 1/84$ متر است. با بررسی های انجام شده بر روی توده سنگ های دربرگیرنده با استفاده از روش عددی اجزاء محدود می توان دریافت که شعاع تأثیر تونل ها کم بوده و بر روی یکدیگر در این مقطع تأثیر ندارند.

با توجه به سطح آب های زیرزمینی در نقاط بحرانی و در بالادست سینه کار بر روی سطح، اجرای چاهک های زهکش جهت خشک کردن محیط حفاری و جلوگیری از ریزش توصیه می گردد، همچنین در مناطقی که شرایط نامطلوب و توده سنگ عمده ماسه سنگ است برای جلوگیری از ریزش و پایداری محیط حفاری، تزریق از سطح زمین بهترین گزینه می باشد. با در نظر گرفتن لیتولوژی منطقه و فراوانی سنگ های شیلی توصیه می گردد جهت جلوگیری از هوازگی و در نهایت ریزش، بتن پاشیده به صورت خشک اجرا گردد.

منابع:

اجل لوثیان ر.، محمدی، د. س. (۱۳۸۲) رده بندی توده سنگ، ترجمه، انتشارات فن آوران. دادخواه ر. (۱۳۸۵) ارزیابی ویژگیهای ژئومکانیکی توده سنگ های مسیر قطعه جنوبی مترو (صفه-آزادی) اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه اصفهان.

سازمان قطار شهری اصفهان و حومه. (۱۳۸۲) گزارش زمین شناسی و ژئوتکنیک قطعه جنوبی مترو، فصل چهارم، ۲۲ صفحه. قارونی نیک م.، همزه ایبازنی م. (۱۳۸۰) نگهداری حفاریات زیرزمینی در سنگ های سخت، ترجمه، انتشارات نص. مدنی ح. (۱۳۷۹) تونلسازی (تحلیل پایداری)، جلد سوم، تالیف، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

مدنی ح. (۱۳۸۱) تونلسازی (طراحی و اجرای سیستم نگهدارنده)، جلد چهارم، تالیف، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

- Bieniawski Z.T. (1989) Engineering rock mass classifications. Wiley, New York, 251 p
 Barton N.R., Lien R., Lunde J. (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech, Vol. 6, No. 4, 189-239.
 Hoek E. (1994) Strength of Rock and Rock Masse. News Journal of ISRM, vol. 2, No. 2, 4-16.
 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. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, No. 1, 3-19.