



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک

گروه استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

طراحی نگهداری اولیه تونل های دوقلوی بزرگ مقطع

ایمان شمالی شیراز

تهیه کننده:

کازم دیابی

استاد راهنما:

دکتر سید رحمان ترابی

استاد مشاور:

مهندس محمد طلوع

زمستان ۸۶

تقدیم به

پدر و مادرم

تقدیر و تشکر

برخود لازم می دانم از زحمات و راهنمای‌های جناب آقای دکتر سید رحمان ترابی استاد راهنما، جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و بویژه جناب آقای مهندس محمد طلوع که به عنوان مشاور نهایت همکاری را داشتند تشکر نمایم.

همچنین از آقای دکتر کاکایی ریاست محترم دانشکده معدن و ژئوفیزیک، مهندس بشیریان سرپرست کارگاه ایمن شیراز و همه کسانی که در انجام این پایان‌نامه مساعدت نمودند کمال قدردانی را دارم.

چکیده

به منظور توسعه شبکه ارتباطی شهر شیراز احداث دو بزرگراه اصلی در محدوده شمالی شهر در دستور کار شهرداری شیراز قرار گرفته است. به دلیل وجود ارتفاعات آهکی در این محدوده و به منظور برقراری ارتباط بین بزرگراه‌های فوق، حفاری دو تونل دوقلو از زیر ارتفاعات آهکی در نظر گرفته شده است. هر یک از تونل‌ها حدود ۲۵۰ متر طول و دارای مقطع نیم دایره به عرض دهانه ۱۵/۳۰ متر می‌باشند. با توجه به طول کم تونل‌ها استفاده از حفاری مکانیزه توجیه اقتصادی ندارد. لذا استفاده از روش‌های حفاری سنتی برای حفر تونل‌ها در نظر گرفته شده است. جهت مطالعه زمین‌شناسی منطقه موقعیت ۳ گمانه اکتشافی در مسیر تونل مشخص و حفر شد. با توجه به برداشت‌های صحرایی و حفاری‌های ژئوتکنیکی، ساختارهای زمین‌شناسی، وضعیت ناپیوستگی و نفوذپذیری توده‌سنگ اطراف تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفت و طبقه‌بندی ژئومکانیکی و کیفی توده‌سنگ انجام شد و مسیر تونل به سه زون LM-1، LM-2 و CZ تقسیم‌بندی شد. در ادامه با داشتن اطلاعات ژئوتکنیکی مسیر تونل‌ها و در نظر گرفتن مقاطعی از تونل و اعمال شرایط مرزی در منطقه، مدل تونل با استفاده از نرم افزار UDEC ساخته شد. در نهایت برای کنترل جابجایی‌های اطراف تونل در زون LM-1 شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر و شبکه پیچ‌سنگ ۲*۲ به طول ۴ متر، در زون LM-2 شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر و شبکه پیچ‌سنگ ۲*۲ به طول ۴ متر و در زون CZ شاتکریت به ضخامت ۲۵ سانتیمتر و شبکه پیچ‌سنگ ۲*۱ به طول ۶ متر پیشنهاد شده است. در صورت عدم کارایی پیچ‌سنگ در این زون استفاده از قاب‌های فولادی ساخته شده با دو تیر آهن ۱۶ با فاصله داری یک متر پیش بینی شده است.

کلمات کلیدی: تونل‌های دو قلو، تونل‌های بزرگ مقطع، تحلیل عددی، UDEC

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و کلیات پروژه

۲	۱-۱ مقدمه
۴	۲-۱ مشخصات کلی و موقعیت جغرافیایی پروژه
	فصل دوم: زمین شناسی و ژئوتکنیک منطقه
۸	۱-۲ شرایط آب و هوایی و اقلیمی
۸	۲-۲ تکتونیک منطقه
۱۰	۳-۲ زمین شناسی مسیر تونل
۱۰	۱-۳-۲ پیمایش های صحرایی
۱۲	۲-۳-۲ ساختارهای زمین شناسی
۱۲	۱-۲-۳-۲ گسل ها
۱۳	۲-۲-۳-۲ چین خوردگی ها
۱۳	۳-۲-۳-۲ درزه های ساختاری
۱۵	۳-۳-۲ خصوصیات مهندسی ناپیوستگی ها
۱۵	۴-۳-۲ جهت یابی درزه ها
۱۶	۴-۲ تفکیک واحدهای سنگی از دیدگاه زمین شناسی مهندسی
۱۶	۱-۴-۲ واحدهای سنگی LM 1 , LM 2
۱۸	۲-۴-۲ واحد سنگی CZ
۱۸	۵-۲ مطالعات ژئوتکنیکی
۱۸	۱-۵-۲ مشخصات گمانه ها
۲۱	۲-۵-۲ نتایج آزمایشات
۲۲	۳-۵-۲ محاسبه پارامترهای برشی در گمانه ۱ از طریق تجربی

فصل سوم: طراحی سیستم نگهداری با استفاده از سیستم های طبقه بندی توده سنگ

۲۵	۱-۳ مقدمه
۲۵	۲-۳ تعیین طبقه بندی واحدهای سنگی تونل ایمن
۲۵	۱-۲-۳ شاخص کیفیت سنگ (RQD)
۲۶	۲-۲-۳ رده بندی براساس ساختار سنگ (RSR)
۲۷	۳-۲-۳ رده بندی ژئومکانیکی (RMR)
۲۷	۱-۳-۲-۳ محاسبه RMR زون LM 1 (جبهه شمالی)
۲۸	۲-۳-۲-۳ محاسبه RMR زون LM 2 (جبهه جنوبی)
۲۹	۳-۳-۲-۳ محاسبه RMR زون CZ
۳۰	۴-۲-۳ رده بندی براساس شاخص کیفیت تونل سازی (Q)
۳۱	۱-۴-۲-۳ محاسبه Q زون LM 1 (جبهه شمالی)
۳۱	۲-۴-۲-۳ محاسبه Q زون LM 2 (جبهه جنوبی)
۳۲	۳-۴-۲-۳ محاسبه Q زون CZ
۳۳	۳-۳ بررسی روابط بین سیستم های طبقه بندی مهندسی سنگ
۳۳	۴-۳ استفاده از RQD در انتخاب سیستم نگهداری
۳۴	۵-۳ استفاده از RSR در انتخاب سیستم نگهداری
۳۶	۶-۳ استفاده از RMR در تعیین پارامترهای ویژه توده سنگ
۳۶	۱-۶-۳ نوع سیستم نگهداری

۳۷	..... تعیین مدول تغییر شکل برجا.....	۲-۶-۳
۳۷	..... مدت زمان پایداری تونل.....	۳-۶-۳
۳۷	..... تعیین C و φ توده سنگ.....	۴-۶-۳
۳۸	..... تعیین ارتفاع بار روی سنگ.....	۵-۶-۳
۳۸	..... تعیین فشار وارد بر سیستم نگهداری.....	۶-۶-۳
۳۹	..... استفاده از اندیس کیفی تونل سازی Q در تعیین پارامترهای ویژه توده سنگ.....	۷-۳
۳۹	..... نوع سیستم نگهداری.....	۱-۷-۳
۴۰	..... تعیین دهانه پایدار تونل (بدون نگهداری).....	۲-۷-۳
۴۰	..... تعیین فشار وارد بر سیستم نگهداری.....	۳-۷-۳
۴۱	..... اندیس مقاومت زمین شناسی (GSI).....	۸-۳
۴۱	..... روش های محاسبه GSI.....	۱-۸-۳
۴۱	..... تعیین شاخص GSI براساس شاخص RMR.....	۱-۱-۸-۳
۴۳	..... تعیین شاخص GSI براساس شاخص Q.....	۲-۱-۸-۳
۴۳	..... تعیین شاخص GSI به روش هوک و براون.....	۳-۱-۸-۳
۴۸	..... استفاده از GSI در تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ.....	۲-۸-۳
۴۹	..... معرفی نرم افزار Roclab.....	۱-۲-۸-۳
۵۳	..... نتیجه گیری.....	۹-۳

فصل چهارم: تحلیل اندرکنش حائل - سنگ

۵۷	..... مقدمه.....	۱-۴
۵۷	..... مفروضات اساسی.....	۲-۴
۵۹	..... تحلیل تنش ها.....	۳-۴
۶۱	..... تحلیل تغییر شکل ها.....	۴-۴
۶۳	..... معادله خط حائل مورد نیاز.....	۵-۴
۶۳	..... در نظر گرفتن بار مرده ناشی از سنگ شکسته.....	۶-۴
۶۳	..... تحلیل حائل موجود.....	۷-۴
۶۵	..... حائل موجود برای پوشش بتنی یا شاتکریت.....	۱-۷-۴
۶۶	..... حائل موجود برای مجموعه های فولادی.....	۲-۷-۴
۶۷	..... حائل موجود برای سنگ دوزهای غیر تزریقی.....	۳-۷-۴
۶۹	..... حائل ایجاد شده توسط سنگ دوزهای تزریقی یا کابل ها.....	۴-۷-۴
۶۹	..... عکس العمل سیستم های حائل مرکب.....	۵-۷-۴
۷۰	..... طراحی سیستم نگهداری تونل با استفاده از تحلیل اندرکنش سنگ- حائل.....	۸-۴
۷۱	..... تحلیل اندرکنش سنگ- حائل زون های LM 1 , LM 2.....	۱-۸-۴
۷۲	..... تحلیل اندرکنش سنگ- حائل زون CZ.....	۲-۸-۴
۸۱	..... نتیجه گیری.....	۹-۴

فصل پنجم: تحلیل فرم بسته

۸۴ مقدمه.....	۱-۵
----	------------------	-----

۸۴.....	۲-۵ تحلیل پایداری تونل با روش‌های فرم بسته
۸۴.....	۱-۲-۵ با استفاده از نمودارهای بی بعد

فصل ششم: تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری با استفاده از نرم افزار UDEC

۹۲.....	۱-۶ مقدمه
۹۴.....	۲-۶ فرضیات و روند مدل‌سازی عددی.....
۹۷.....	۳-۶ مدل‌سازی سیستم نگهداری.....
۹۷.....	۴-۶ مدل‌سازی مقطع تونل در زون LM 1
۱۰۸.....	۵-۶ مدل‌سازی مقطع تونل در زون LM 2
۱۱۵.....	۶-۶ مدل‌سازی مقطع تونل در زون CZ
۱۲۸.....	۶-۷ نتیجه گیری

فصل هفتم: طراحی سیستم نگهداری با استفاده از تحلیل بلوکی

۱۳۱.....	۱-۷ مقدمه
۱۳۲.....	۲-۷ حفاری در سنگ‌های بلوکی (تئوری بلوک‌ها).....
۱۳۴.....	۳-۷ شناسایی گوه‌های دارای پتانسیل ریزش.....
۱۳۵.....	۴-۷ تحلیل پایداری تونل‌های ایمن شیراز با استفاده از نرم افزار UNWEDGE.....
۱۳۸.....	۱-۴-۷ زون LM 1 (یال شمالی تپه)
۱۴۰.....	۲-۴-۷ زون LM 2 (یال جنوبی تپه)
۱۴۲.....	۵-۷ نتیجه‌گیری.....

فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۴۵.....	۱-۸ نتیجه‌گیری.....
۱۴۸.....	۲-۸ پیشنهادات.....

۱۴۹.....	<u>منابع:</u>
----------	---------------------

ضمائم:

۱۵۳.....	ضمیمه الف: سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ
----------	---

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ موقعیت تونل ایمان در پروژه کمربندی شیراز..... ۴
- شکل ۱-۲ مشخصات هندسی مقطع تونل‌های ایمان..... ۵
- شکل ۱-۳ پوشش گیاهی منطقه در اطراف دهانه شمالی..... ۶
- شکل ۱-۲ پروفیل طولی مسیر تونل ایمان..... ۱۱
- شکل ۲-۲ موقعیت گمانه‌های حفر شده در مسیر تونل..... ۱۹
- شکل ۱-۳ نمودار اولیه تعیین GSI..... ۴۴
- شکل ۲-۳ آخرین ویرایش جدول سیستم طبقه‌بندی GSI در سال ۱۹۹۹..... ۴۵
- شکل ۳-۳ سیستم GSI کمی پیشنهاد شده توسط سونماز و اولوسای..... ۴۷
- شکل ۴-۳ نمودارها و نتایج حاصل از نرم افزار Roclab در واحدهای LM 1, LM 2..... ۵۲
- شکل ۵-۳ نمودارها و نتایج حاصل از نرم افزار Roclab در واحد CZ..... ۵۲
- شکل ۱-۴ همگرایی اولیه در سازه قبل از نصب سیستم نگهداری..... ۶۴
- شکل ۲-۴ نمودار تغییر شکل تونل در زون LM 1, LM 2..... ۷۲
- شکل ۳-۴ نمودار تغییر شکل تونل در زون CZ..... ۷۳
- شکل ۴-۴ نمودار اندرکنش تونل و سیستم‌های نگهداری مورد نظر..... ۷۵
- شکل ۵-۴ نمودار اندرکنش قاب فولادی 8I23..... ۷۶
- شکل ۶-۴ نمودار اندرکنش قاب فولادی 10I30..... ۷۶
- شکل ۷-۴ نمودار اندرکنش قاب فولادی 10I35..... ۷۷
- شکل ۸-۴ نمودار اندرکنش قاب فولادی 10I40..... ۷۸
- شکل ۹-۴ نمودار اندرکنش قاب فولادی کشویی T.H..... ۷۹
- شکل ۱۰-۴ نمودار اندرکنش قاب ساخته شده از تیر آهن ۱۶ دوپل..... ۸۰
- شکل ۱-۵ نمودار همگرایی تونل در مقابل نسبت مقاومت توده سنگ به تنش برجا..... ۸۵
- شکل ۲-۵ رابطه بین شعاع زون پلاستیک و نسبت مقاومت توده سنگ به تنش برجا..... ۸۶
- شکل ۳-۵ مرز بین تغییر شکل در تونل‌ها (Hoek, 1999)..... ۸۷
- شکل ۴-۵ رابطه بین فشار نگهدارنده و تغییر شکل تونل برای نسبت‌های مختلف مقاومت توده سنگ به تنش برجا..... ۸۸
- شکل ۵-۵ ارزیابی‌هایی از ظرفیت سیستم نگهدارنده، برای تونل‌هایی با ابعاد مختلف..... ۸۹
- شکل ۶-۵ مشکلات تونل سازی مربوط به مقادیر مختلف کرنش..... ۹۰
- شکل ۱-۶ مدل ساخته شده از زون LM 1 در نرم افزار UDEC..... ۹۸
- شکل ۲-۶ نمودار جابجایی در اطراف تونل غربی (خروجی جنوبی) بدون نصب سیستم نگهداری (زون LM 1)..... ۹۸

- شکل ۳-۶ بردار جابجایی در اطراف تونل بدون نصب سیستم نگهداری (زون LM 1) ۹۹
- شکل ۴-۶ منطقه پلاستیک ایجاد شده در مقطع LM 1 در نتیجه حفر تونلها ۱۰۰
- شکل ۵-۶ نیروی محوری پیچ سنگهای تونل در مقطع LM 1 بعد از نصب
پیچ سنگهای ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی متر ۱۰۲
- شکل ۶-۶ نیروی برشی پیچ سنگهای تونل در مقطع LM 1
بعد از نصب پیچ سنگهای ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی متر ۱۰۲
- شکل ۷-۶ نمودار جابجایی در اطراف تونلها در زون LM 1 بعد از نصب پیچ سنگهای ۴ متری
با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی متر ۱۰۳
- شکل ۸-۶ بردار جابجاییها در اطراف تونلها در زون LM 1 بعد از نصب پیچ سنگهای ۴ متری
با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی متر ۱۰۳
- شکل ۹-۶ منطقه پلاستیک ایجاد شده در زون LM 1 بعد از نصب پیچ سنگهای ۴ متری
با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی متر ۱۰۴
- شکل ۱۰-۶ نمودار جابجایی در اطراف تونلها بعد از نصب پیچ سنگهای ۴ متری
با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی متر ۱۰۴
- شکل ۱۱-۶ بردار جابجاییها در اطراف تونلها بعد از نصب پیچ سنگهای ۴ متری
با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر (زون LM 1) ۱۰۵
- شکل ۱۲-۶ منطقه پلاستیک ایجاد شده در مقطع بعد از نصب پیچ سنگهای ۴ متری
با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر (زون LM 1) ۱۰۵
- شکل ۱۳-۶ نیروی محوری پیچ سنگهای تونل در زون LM 1 بعد از نصب پیچ سنگهای
۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر (زون LM 1) ۱۰۶
- شکل ۱۴-۶ نیروی برشی پیچ سنگهای تونل در زون LM 1 بعد از نصب پیچ سنگهای
۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر ۱۰۶
- شکل ۱۵-۶ نیروی محوری شاتکریت در زون LM 1 بعد از نصب پیچ سنگهای ۴ متری
با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر ۱۰۷
- شکل ۱۶-۶ مدل ساخته شده از زون LM 2 در نرم افزار UDEC ۱۰۸
- شکل ۱۷-۶ نمودار جابجایی در اطراف تونل ورودی جنوبی بدون نصب سیستم نگهداری (زون LM 2) ۱۰۹
- شکل ۱۸-۶ نمودار جابجایی در اطراف تونل خروجی شمالی بدون نصب سیستم نگهداری (زون LM 2) ۱۰۹
- شکل ۱۹-۶ منطقه پلاستیک ایجاد شده در مقطع LM 2 در نتیجه حفر تونلها ۱۱۰
- شکل ۲۰-۶ نیروی محوری شاتکریت در زون بعد از نصب پیچ سنگهای ۴ متری
با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر LM 2 ۱۱۲
- شکل ۲۱-۶ نیروی محوری پیچ سنگهای تونل در زون LM 2 بعد از نصب
پیچ سنگهای ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر ۱۱۲
- شکل ۲۲-۶ نیروی برشی پیچ سنگهای تونل در زون LM 2 بعد از نصب
پیچ سنگهای ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر ۱۱۳

- شکل ۶-۲۳ نمودار جابجایی در اطراف تونل‌ها بعد از نصب پیچ سنگ‌های ۴ متری
 با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر (زون LM 2)..... ۱۱۳
- شکل ۶-۲۴ بردار جابجایی‌ها در اطراف تونل‌ها بعد از نصب پیچ سنگ‌های ۴ متری
 با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر (زون LM 2)..... ۱۱۴
- شکل ۶-۲۵ منطقه پلاستیک ایجاد شده در مقطع بعد از نصب
 پیچ سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر (زون LM 2)..... ۱۱۴
- شکل ۶-۲۶ مدل ساخته شده از زون CZ در نرم افزار UDEC..... ۱۱۵
- شکل ۶-۲۷ منطقه پلاستیک ایجاد شده در زون CZ بدون نصب سیستم نگهداری ۱۱۶
- شکل ۶-۲۸ نمودار جابجایی در زون CZ بدون نصب سیستم نگهداری ۱۱۷
- شکل ۶-۲۹ بردار جابجایی در زون CZ بدون نصب سیستم نگهداری ۱۱۷
- شکل ۶-۳۰ نمودار جابجایی در زون CZ بعد از نصب پیچ سنگ‌های
 ۶ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر..... ۱۱۸
- شکل ۶-۳۱ منطقه پلاستیک ایجاد شده در زون CZ بعد از نصب پیچ سنگ‌های
 ۶ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر..... ۱۱۹
- شکل ۶-۳۲ بردار جابجایی در زون CZ بعد از نصب پیچ سنگ‌های ۶ متری
 با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر..... ۱۱۹
- شکل ۶-۳۳ نیروی محوری شاتکریت در زون CZ بعد از نصب پیچ سنگ‌های
 ۶ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر..... ۱۲۰
- شکل ۶-۳۴ نیروی محوری پیچ سنگ‌های تونل در زون CZ بعد از نصب
 پیچ سنگ‌های ۶ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر..... ۱۲۰
- شکل ۶-۳۵ نیروی برشی پیچ سنگ‌های تونل در زون CZ بعد از نصب
 پیچ سنگ‌های ۶ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر..... ۱۲۱
- شکل ۶-۳۶ نمودار جابجایی در اطراف تونل‌ها پس از نصب قاب 10I35 با فاصله‌داری یک متر..... ۱۲۲
- شکل ۶-۳۷ بردار جابجایی در اطراف تونل‌ها پس از نصب قاب 10I35 با فاصله‌داری یک متر..... ۱۲۳
- شکل ۶-۳۸ منطقه پلاستیک در اطراف تونل‌ها پس از نصب قاب 10I35 با فاصله‌داری یک متر..... ۱۲۳
- شکل ۶-۳۹ نیروهای محوری وارد بر هر المان قاب 10I35 در زون CZ..... ۱۲۴
- شکل ۶-۴۰ نمودار جابجایی در اطراف تونل‌ها پس از نصب قاب 16I دویل با فاصله‌داری یک متر..... ۱۲۵
- شکل ۶-۴۱ بردار جابجایی در اطراف تونل‌ها پس از نصب قاب 16I دویل با فاصله‌داری یک متر..... ۱۲۶
- شکل ۶-۴۲ منطقه پلاستیک در اطراف تونل‌ها پس از نصب قاب 16I دویل با فاصله‌داری یک متر..... ۱۲۶
- شکل ۶-۴۳ نیروهای محوری وارد بر هر المان قاب 16I دویل در زون CZ..... ۱۲۷
- شکل ۷-۱-۷ بلوک‌های احتمالی در اطراف یک فضای زیرزمینی ۱۳۳
- شکل ۷-۲ تصویر استریوگرافیک دسته درزه‌ها ، لایه بندی و امتداد تونل در زون LM 1..... ۱۳۸
- شکل ۷-۳ هندسه و مشخصات گوه‌های تشکیل شده احتمالی در تونل (زون LM 1)..... ۱۳۹
- شکل ۷-۴ افزایش ضریب اطمینان گوه‌های لغزشی در تونل با اعمال پیچ‌سنگ (LM 1)..... ۱۴۰

- شکل ۷-۵ تصویر استریوگرافیک دسته درزه ها ، لایه بندی و امتداد تونل در زون LM 2 ۱۴۰
- شکل ۷-۶ هندسه و مشخصات گوه‌های تشکیل شده احتمالی در تونل (زون LM 2) ۱۴۱
- شکل ۷-۷ افزایش ضریب اطمینان گوه‌های لغزشی در تونل با اعمال پیچ سنگ (LM 2) ۱۴۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ عمده ناپیوستگی‌های موجود در مسیر تونل ۱۷
- جدول ۲-۲ مشخصات گمانه‌های ژئوتکنیک ۱۸
- جدول ۳-۲ تغییرات RQD در اعماق مختلف گمانه ۱ ۲۰
- جدول ۴-۲ پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ گمانه اول ۲۱
- جدول ۵-۲ تخمین پارامترهای مقاومت برشی جهت سطوح لایه بندی در سنگ‌های آهکی محل پروژه ۲۲
- جدول ۶-۲ تخمین پارامترهای مقاومت برشی جهت سطوح درزه در سنگ‌های آهکی محل پروژه ۲۲
- جدول ۱-۳ عدد RQD محاسبه شده برای واحدهای سنگی مسیر تونل ۲۶
- جدول ۲-۳ تأثیر آب زیرزمینی، شرایط درزه و محاسبه RSR ۲۷
- جدول ۳-۳ پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ و امتیاز RMR زون LM 1 ۲۸
- جدول ۴-۳ محاسبه شرایط ناپیوستگی زون LM 1 ۲۸
- جدول ۵-۳ پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ و امتیاز RMR زون LM 2 ۲۹
- جدول ۶-۳ محاسبه شرایط ناپیوستگی زون LM 2 ۲۹
- جدول ۷-۳ پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ و امتیاز RMR زون CZ ۳۰
- جدول ۸-۳ محاسبه شرایط ناپیوستگی زون CZ ۳۰
- جدول ۹-۳ پارامترهای ژئومکانیکی و امتیاز Q زون LM 1 ۳۱
- جدول ۱۰-۳ پارامترهای ژئومکانیکی و امتیاز Q زون LM 2 ۳۲
- جدول ۱۱-۳ پارامترهای ژئومکانیکی و امتیاز Q زون CZ ۳۲
- جدول ۱۲-۳ مقایسه مقادیر RMR, RSR حاصل از جداول و روابط ۳۳
- جدول ۱۳-۳ طراحی سیستم نگهداری اولیه واحدهای مختلف تونل ایمان با استفاده از سیستم طبقه‌بندی RQD ۳۴
- جدول ۱۴-۳ طراحی سیستم نگهداری اولیه واحدهای مختلف تونل ایمان با استفاده از RSR ۳۵
- جدول ۱۵-۳ محاسبه فشار موثر بر سیستم نگهداری اولیه واحدهای مختلف تونل ایمان ۳۵
- جدول ۱۶-۳ طراحی سیستم نگهداری اولیه واحدهای مختلف تونل ایمان با استفاده از سیستم طبقه‌بندی RMR ۳۶
- جدول ۱۷-۳ تعیین مدول شکل برجای توده سنگ با کمک RMR ۳۷
- جدول ۱۸-۳ تعیین پارامترهای توده سنگ با استفاده از RMR ۳۹
- جدول ۱۹-۳ طراحی سیستم نگهداری اولیه واحدهای مختلف تونل ایمان با استفاده از سیستم طبقه‌بندی Q ۴۰
- جدول ۲۰-۳ تعیین پارامترهای ویژه توده سنگ با کمک سیستم طبقه‌بندی Q ۴۱
- جدول ۲۱-۳ محاسبه GSI واحدهای مختلف تونل ایمان با استفاده از RMR ۴۲

جدول ۳-۲۲	محاسبه GSI واحدهای مختلف تونل ایمان با استفاده از Q.....	۴۳
جدول ۳-۲۳	محاسبه GSI واحدهای تونل ایمان با استفاده از جدول GSI (۱۹۹۹).....	۴۴
جدول ۳-۲۴	محاسبه GSI با استفاده از سیستم ارائه شده توسط سونمازو اولوسای.....	۴۸
جدول ۳-۲۵	پارامترهای ورودی نرم افزار Roclab برای واحدهای مختلف تونل ایمان.....	۵۱
جدول ۳-۲۶	پارامترهای خروجی نرم افزار Roclab برای واحدهای مختلف تونل ایمان.....	۵۱
جدول ۳-۲۷	محاسبه مدول حجمی و برشی واحدهای مختلف تونل ایمان.....	۵۳
جدول ۳-۲۸	سیستم نگهداری پیشنهادی برای تونل‌های ایمان با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ.....	۵۵
جدول ۴-۱	اطلاعات مربوط به توده سنگ پروژه ایمان برای رسم منحنی اندرکنش سنگ- حائل.....	۷۰
جدول ۴-۲	مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای Pi های مختلف در زون‌های LM 1, LM 2.....	۷۱
جدول ۴-۳	مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای Pi های مختلف در زون CZ.....	۷۲
جدول ۴-۴	مشخصات فیزیکی سیستم‌های نگهداری مورد استفاده.....	۷۴
جدول ۴-۵	مشخصات قاب فولادی 8I23 (با مقطع I در سیستم استاندارد آمریکا).....	۷۵
جدول ۴-۶	مشخصات قاب فولادی 10I30 (با مقطع I در سیستم استاندارد آمریکا).....	۷۶
جدول ۴-۷	مشخصات قاب فولادی 10I35 (با مقطع I در سیستم استاندارد آمریکا).....	۷۷
جدول ۴-۸	مشخصات قاب فولادی 10I40 (با مقطع I در سیستم استاندارد آمریکا).....	۷۷
جدول ۴-۹	مشخصات مقطع قاب کشویی توشینت- هینزمن.....	۷۹
جدول ۴-۱۰	مشخصات تیرآهن ۱۶ با مقطع I.....	۸۰
جدول ۶-۱	مشخصات شاتکریت مورد استفاده در مدل‌سازی.....	۹۶
جدول ۶-۲	مشخصات پیچ سنگ‌های مورد استفاده در مدل‌سازی.....	۹۶
جدول ۶-۳	تنش فشاری و ضریب ایمنی مربوط به تعدادی از المان‌های تیر با ضخامت 10 cm (زون LM 1).....	۱۰۱
جدول ۶-۴	تنش فشاری و ضریب ایمنی تعدادی از المان‌های تیر با ضخامت 5 cm (زون LM 1).....	۱۰۴
جدول ۶-۵	تنش فشاری و ضریب ایمنی تعدادی از المان‌های تیر با ضخامت 5 cm (زون LM 2).....	۱۱۱
جدول ۶-۶	تنش فشاری و ضریب ایمنی تعدادی از المان‌های تیر با ضخامت 25 cm (زون CZ).....	۱۲۲
جدول ۶-۷	تنش فشاری و ضریب ایمنی تعدادی از المان‌های قاب 10I35 (زون CZ).....	۱۲۵
جدول ۶-۸	تنش فشاری و ضریب ایمنی تعدادی از المان‌های قاب 16I دابل (زون CZ).....	۱۲۷
جدول ۷-۱	مشخصات دسته درزه‌های محدوده تونل‌های ایمان.....	۱۳۷

هدف از این تحقیق ارائه سیستم نگهداری موقت مناسب برای تونل‌های دوقلوی ایمن شیراز می‌باشد که برای رسیدن به این منظور ابتدا یک بازدید ۱۰ روزه از محل پروژه به عمل آمد که در طی این بازدید ضمن آشنا شدن با مراحل اجرای این پروژه، اطلاعاتی از شرایط زمین‌شناسی و عمومی منطقه حاصل شد. با به دست آوردن گزارش زمین‌شناسی و همچنین نتایج تست‌های مکانیک سنگی انجام گرفته روی نمونه‌ها، داده‌های اصلی و اولیه طراحی سیستم- نگهداری حاصل شد. طراحی سیستم نگهداری دارای چندین مرحله می‌باشد که هرچه به مراحل انتهایی نزدیک می‌شوید از خطای کار کاسته شده ولی در عوض مدت زمان لازم برای رسیدن به جواب افزایش خواهد یافت.

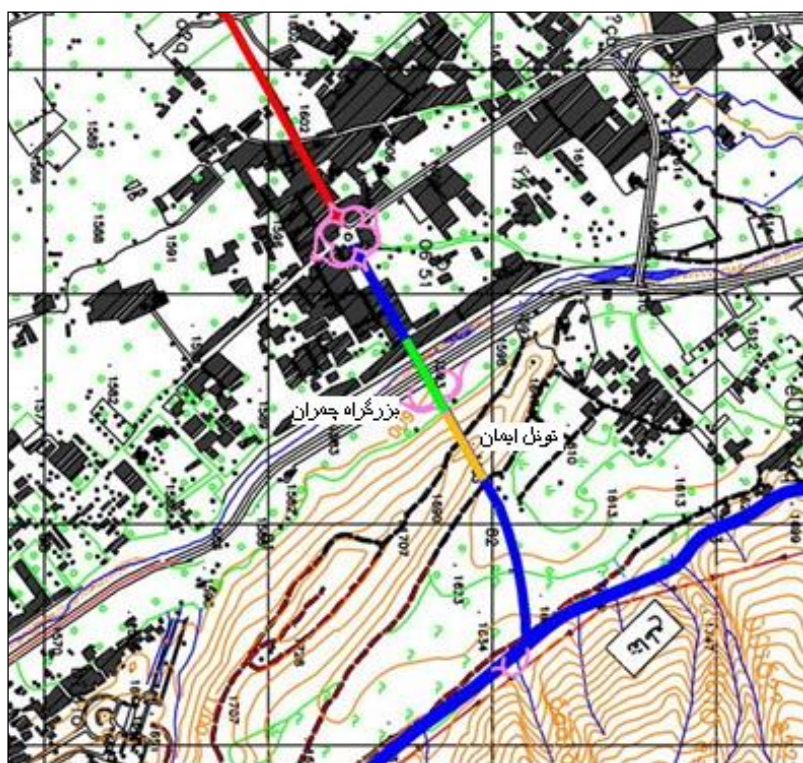
اولین قدم در طراحی سیستم‌های نگهداری تونل، تقسیم‌بندی تونل به زون‌های مختلف می‌باشد که این تقسیم‌بندی با توجه به شرایط زمین‌شناسی، ناپیوستگی‌ها و خواص مکانیک سنگی توده‌سنگ انجام می‌گیرد. بر این اصل منطقه مورد نظر به سه زون تقسیم‌بندی شد پس از این مرحله با استفاده از مطالعات گمانه‌ای، پارامترهای فیزیکی توده‌سنگ برای هر زون تعیین شد. با استفاده از این اطلاعات، اولین مرحله از طراحی سیستم نگهداری یعنی استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ آغاز شد. استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی روشی سریع ولی با دقتی متوسط است. تعیین سیستم نگهداری با استفاده از این روش بر مبنای استفاده از تجارب قبلی می‌باشد به این ترتیب که محققان با ابداع هر سیستم طبقه‌بندی آن را با پروژه‌های در حال کار یا قدیمی جهان آزمایش کرده و با توجه به سیستم نگهداری به کار رفته در آن تجارب، و مقادیر بدست آمده از طبقه‌بندی، جداولی را ارائه دادند که به کمک آن می‌توان با تعیین طبقه‌بندی توده‌سنگ مورد نظر خود بر حسب یکی از سیستم‌های موجود و سپس استفاده از جداول مربوطه، سیستم نگهداری مناسب را استخراج کرد. البته همانطور که در ابتدا نیز به آن اشاره شد این روش‌ها از دقت بالایی برخوردار نبوده و فقط

می‌توانند تخمین مناسبی از سیستم نگهداری مورد نیاز برای تونل را در اختیار بگذارند. بعد از طراحی سیستم نگهداری با این روش این سیستم بایستی به کمک سایر روش‌ها ارزیابی و بررسی شود. در فصل چهارم این پایان نامه از روابط و نمودارهای اندرکنش سنگ- حائل برای طراحی سیستم نگهداری استفاده شده است. البته قبل از استفاده از فرمول‌های آمده در این فصل باید فرض‌های مربوط به این قوانین را به دقت مورد توجه قرار داد. دقت نتایج به دست آمده از این روش به میزان تطابق شرایط پروژه با فرض‌های آمده در ابتدای فصل بستگی خواهد داشت. در فصل پنجم از روش فرم بسته و استفاده از نمودارها برای طراحی سیستم نگهداری استفاده شده است.

در فصل ششم و اصلی این تحقیق طراحی سیستم نگهداری تونل با استفاده از روش مدلسازی عددی صورت گرفته است. در این فصل از نرم افزار المان مجزای UDEC جهت مدلسازی استفاده شده است که علت استفاده از آن تطابق خوب شرایط پروژه با مبانی اصلی این نوع نرم افزار می‌باشد. برای هر یک از زون‌های شناخته شده در پروژه یک مقطع بحرانی در نظر گرفته شد که این مقطع بحرانی در واقع مقطعی با بیشترین مقدار روباره می‌باشد. سیستم‌های نگهداری مختلف با استفاده از دستوره‌های موجود در نرم افزار مدل شد و در نهایت با محاسبه ضرایب ایمنی مربوط به هر سیستم نگهداری، سیستم مناسب برای هر زون تعیین شد. در نهایت و در فصل هفتم سیستم نگهداری تأییدشده در فصل قبل از نظر اینکه قابلیت نگهداری بزرگترین گوه‌های ایجاد شده در نتیجه تقاطع ناپیوستگی‌های موجود در منطقه را دارد یا خیر مورد بررسی قرار گرفت که برای بررسی این مورد از نرم افزار UNWEDGE استفاده شده است و در نهایت سیستم نگهداری مناسب تعیین شد.

۱-۲- مشخصات کلی و موقع جغرافیایی پروژه

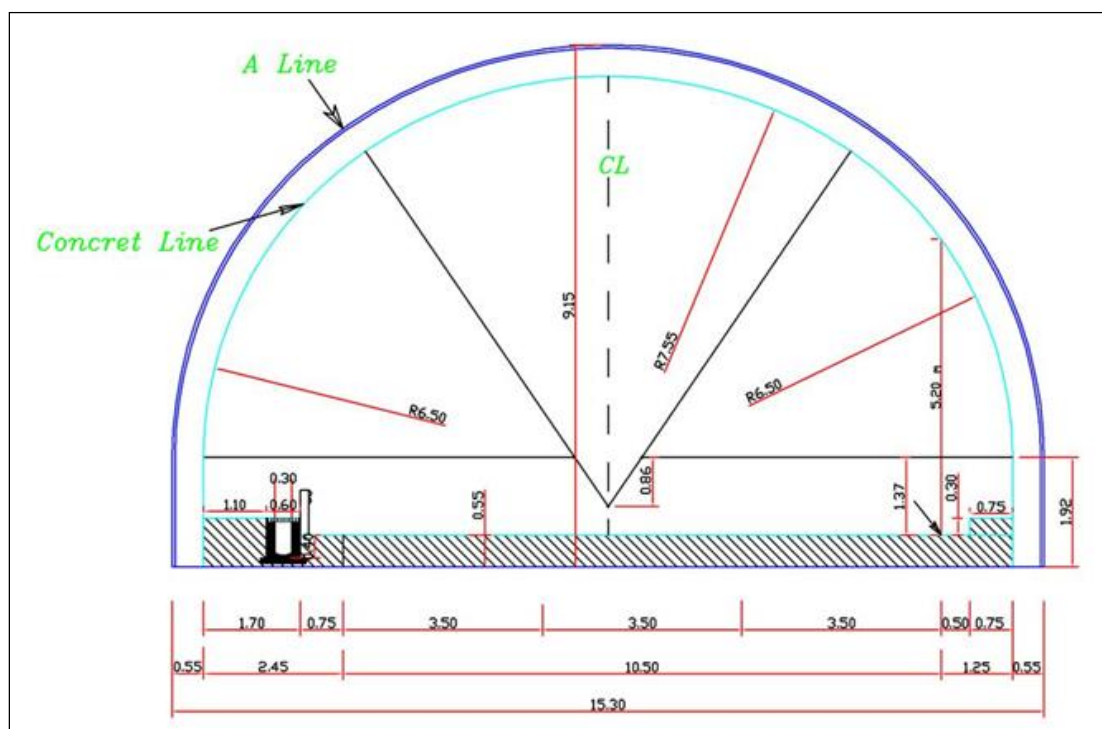
به منظور توسعه شبکه ارتباطی شهر شیراز، احداث مسیر، شامل راه، پل و تونل به صورت بزرگراه در شمال شرقی شیراز و عبور از محله پشت مله و قطع کوه‌های آهکی خیار سوخته و عبور روگذر از بزرگراه چمران به طرف میدان قصرالدشت بوسیله شهرداری مدنظر می‌باشد که این مسیر در شکل ۱-۱ نشان داده شده است (خسروی، ۱۳۸۴- الف).



شکل ۱-۱ موقعیت تونل ایمان در پروژه کمربندی شیراز

با وجود ارتفاعات کوهستانی در محدوده شمال شهر به منظور برقراری ارتباط عبوری از منطقه پشت مله به پل عبوری از بزرگراه چمران، تونل ارتباطی در نظر گرفته شده است. این طرح دارای دو تونل دسترسی شهری با فاصله ۲۱ متر از یکدیگر می‌باشد که هر یک با طول حدوداً ۲۵۰ متر دارای مقطع نیم

دایره، و دارای مسیر سه خطه در هر تونل می‌باشند و از هر طرف حدود ۱۰۰ متر ترانشه روباز وجود خواهد داشت. ابعاد و مشخصات مقطع این تونل‌ها در شکل ۱-۲ آمده است.



شکل ۱-۲ مشخصات هندسی مقطع تونل‌های ایمان (خسروی، ۱۳۸۴- الف)

در این راستا اجرای تونل دارای محدودیت‌های اجرایی خواهد بود که عبارتند از:

- (۱) نزدیکی تونل به مناطق مسکونی پر رفت و آمد
- (۲) نزدیکی ورودی و خروجی تونل و ترانشه‌های روباز به بزرگراه‌ها
- (۳) نزدیکی تونل به بیمارستان‌های اردیبهشت و چمران
- (۴) با توجه به طول کم تونل استفاده از وسایل حفاری مکانیزه بسیار پیشرفته به صرفه نبوده و حفاری مکانیکی و انفجاری معمولی مورد توجه می‌باشد.
- (۵) مشکلات آلودگی بخصوص از نظر صوتی (انفجاری) و پرتاب سنگ در حین حفاری

۶) محدودیت در بخش ارتباط تونل با استفاده از پل روگذر به اتوبان چمران

کوه آهکی در محل پروژه دارای لایه‌های ضخیم آهکی با هوازدگی نسبتاً کم می‌باشد که دو دسته درزه و یک سطح لایه‌بندی در هر طرف از یال‌های کوه مشاهده می‌شود. محدوده مورد نظر متشکل از مرفولوژی ساده و همراه با ارتفاعات و شیب کم می‌باشد. بالاترین رقوم ارتفاعی کوه ۸۷ متر نسبت به سطح طبیعی زمین می‌باشد (خسروی، ۱۳۸۴-الف).

آبراهه‌های محدوده طرح اغلب به صورت شاخه‌ای قابل مشاهده می‌باشند. عامل فرسایش موجب حذف برخی از سنگ لایه‌ها در رأس تاقدیس موجود شده است. در این منطقه هیچ‌گونه آبراهه اصلی مشاهده نشده است. همانطور که در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود پوشش گیاهی ناحیه شامل درختچه‌های بسیار کوتاه، پراکنده و کم می‌باشد بطوری که می‌توان محدوده مورد نظر را عاری از پوشش گیاهی دانست.



شکل ۱-۳ پوشش گیاهی منطقه در اطراف دهانه‌های شمالی

۲-۱- شرایط آب و هوایی و اقلیمی

پروژه مورد مطالعه در شهر شیراز در حوزه آبریز دریاچه مهارلو (سمت غربی) قرار گرفته است. مساحت این حوزه ۲۱۹۵/۶۹ کیلومتر مربع بوده و دو رودخانه خشک و باباحاجی، تخلیه آب‌های سطحی این

حوزه را به عهده دارند. رودخانه خشک از حوالی فلکه قصرالدشت و نزدیکی پروژه موردنظر می‌گذرد و جهت جریان آب از سمت شمال غربی به جنوب شرقی بوده و نهایتاً انتهای این رودخانه به دریاچه مهارلو متصل می‌شود. رودخانه خشک، رودخانه سیلاب گیر بوده و به صورت فصلی به خصوص در فصول زمستان و بهار دارای آب می‌باشد (خسروی، ۱۳۸۴- الف).

عمدتاً دشت شیراز به عنوان یک دشت آبرفتی می‌باشد که توسط کوه‌هایی با نام‌های محلی دراک، بمو، کفترک، سبزپوشان، برمه شور، کوه سیاه و تنگ سرخ در بر گرفته شده است (ورقه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شیراز و کلستان).

۲-۲- تکتونیک منطقه

منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیمات ساختاری ایران دربرگیرنده بخشی از پهنه چین‌خورده-رانده زاگرس می‌باشد که دارای ویژگی‌های مشترکی از دو زون زمین‌ساختی زاگرس بلند و زون چین‌خورده ساده است.

با توجه به ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ شیراز و کلستان، چاپ سازمان زمین‌شناسی کشور، محدوده مورد نظر در زون ساختاری سبزپوشان قرار دارد. زون ساختاری - رسوبی سبزپوشان، به صورت یک نوار ساختاری از شمال زون تکتونیک چین‌خورده ساده زاگرس است که هم‌مرز با زون فرعی بینابینی بوده و نسبت به پهنه جنوبی‌تر خود، از دیدگاه ویژگی‌های ساختاری و رخساره محیط‌های رسوبی قدیمی، با تغییرات آشکارتر و پیشینه‌ای پرتحول‌تر همراه است (ورقه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شیراز و کلستان).

زون ساختاری - رسوبی سبزپوشان یا زون انتقالی، در برگیرنده شرایط زمین‌ساختی کم و بیش ساده از چین‌خوردگی‌هایی است که گویای وجود کنترل اساسی بر روند کوتاه شدگی در قالب زایش این چنین ساختمان‌ها می‌باشد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این زون، نقش موثر ساز و کار گسیختگی‌های شمال - جنوب در پیدایش ساختار منطقه است. این گسیختگی‌ها را می‌توان در ردیف گسل راست لغز قرار داد و از این جمله می‌توان به گسل سبزپوشان اشاره نمود (ورقه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ کلستان).

در این محدوده زون گسلی سبزپوشان را می‌توان مهم‌ترین کنترل کننده شرایط زمین‌ساختی در نظر گرفت. زون برشی سبزپوشان با طول حدود ۵۰ کیلومتر دارای روند تقریبی شمال غرب - جنوب شرق می‌باشد. امتداد این زون بطور متوسط N15W است (ورقه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شیراز). در محل برخورد زون گسلی مورد نظر و گسل سلطان، در سمت جنوب و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه، تراکم گسل‌های همراه، افزایش یافته است. از لحاظ تکتونیکی ناحیه مورد بحث قسمتی از رورانندی زاگرس را تشکیل می‌دهد که در محل تپه ارم تا این ناحیه واقع شده است (خسروی، ۱۳۸۴ - الف).

۲-۳- زمین‌شناسی مسیر تونل

۲-۳-۱- پیمایش‌های صحرایی

گستره مورد نظر از دیدگاه کلی در زون چین‌خورده زاگرس جای دارد. ساخت‌های اولیه و ثانویه، شرایط زمین‌ساختی را در محدوده مورد مطالعه کنترل می‌کنند. محدوده‌های موجود در مسیر تونل و خارج از مسیر تونل مورد بررسی قرار گرفته و ساختارهای زمین‌شناسی آن‌ها برداشت شده‌است. شیب و امتداد سطوح ناپیوستگی‌ها، در نقاط مختلف اندازه‌گیری و از مقادیر برداشت‌ها، دیاگرام‌های گل سرخی و استریونت تهیه و جهت تعبیر و تفسیر کیفی ساختمان زمین‌شناسی منطقه و وضعیت تکتونیکی مسیر تونل، استفاده شده است. همچنین از نتیجه برداشت‌های صحرایی نوع و الگوی دسته درزه‌های مسیر تونل شناسایی و الگویی برای ساختار محدوده مورد نظر ارائه شد. به کمک اطلاعات به دست آمده نقشه زمین‌شناسی منطقه و پروفیل طولی مسیر تونل (شکل ۲-۱) تهیه شدند.

چنانچه از نمایش نمودارهای استریونتی بر روی پروفیل و نقشه‌های زمین‌شناسی تهیه شده بر می‌آید، شکستگی‌های ایجاد شده از روند چین‌خوردگی ساده و متقارن ارتفاعات مورد مطالعه پیروی می‌کند. با اندکی دقت بر روی نمودار درزه‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های درزه‌نگاری، نظم سیستم آشکار می‌شود.

می‌توان سیستم ناپیوستگی‌های موجود را درزه‌های طولی و عرضی همراه با چین‌خوردگی نامید و روندهای دیگر را با توجه به اندک بودن آن‌ها اتفاقی فرض کرد. همچنین پیدایش آن‌ها به فعالیت و حرکت‌های فرعی حاکم بر منطقه ربط داده می‌شود. درزه‌های حاکم بر منطقه از نوع سیستماتیک به حساب آمده و پیدایش آن‌ها به فرایند چین‌خوردگی رویداده در منطقه مربوط می‌شود. با در نظر گرفتن این موضوع

و با توجه به این که روند غالب درزه‌ها در همه ایستگاه‌ها مشابه است، این امکان وجود دارد که بتوان سیستم درزه‌بندی موجود در سطح را با اطمینان بالایی به ژرفا و درون واحدها نیز تعمیم داد. به این معنی که با پیشروی درون توده‌سنگ انتظار می‌رود سیستم درزه‌بندی از روندهای دیده شده در سطح زمین پیروی نماید (خسروی، ۱۳۸۴-الف).

۲-۳-۲- ساختارهای زمین‌شناسی

در محدوده مورد مطالعه، بر اثر عملکرد فرایندهای تغییر شکل دهنده بیرونی و عمدتاً درونی، ساخت‌های زمین‌شناسی به صورتی یک تاق‌دیس نمود یافته‌اند. آنچه که از مطالعات صحرایی فهمیده می‌شود، آن است که سنگ‌های کربناته موجود یک مرحله تغییر شکل را پشت سر گذاشته‌اند. ساخت اولیه سنگ‌های آهکی، لایه لایه بودن آن‌ها است. تغییر شکل‌های بعدی (سخت و متراکم شدن لایه‌ها) توسط وزن مواد فوقانی ایجاد شده است. بر اثر حرکات افقی صفحات تکتونیکی و اعمال فشار از سوی نیروهای جهت‌دار، تغییر شکل‌ها و شکستگی‌هایی در سنگ لایه‌ها ایجاد شده است (خسروی، ۱۳۸۴-ب). برای شناسایی روابط زمین‌شناسی حاکم بر طبیعت به موارد ذیل پرداخته می‌شود:

۲-۳-۲-۱- گسل‌ها

در بررسی‌های زمین‌شناسی پروژه‌های تونلی، گسل‌ها و زون‌های برشی ایجاد شده بواسطه عملکرد آن‌ها از مهمترین عوامل ساختاری محسوب می‌شوند. پس از بررسی‌ها و پیمایش‌های انجام شده در مسیر تونل هیچ‌گونه گسلی که قابلیت ایجاد زون‌های برشی را داشته باشد دیده نشده است (خسروی، ۱۳۸۴-الف).

قسمت مرکزی تاقدیس که فشار بیشتری را نسبت به بخش‌های دیگر تحمل کرده، تنها بخشی

است که می‌تواند به عنوان زون خرد شده احتمالی در نظر گرفته شود.

۲-۲-۳-۲- چین خوردگی‌ها

در این مطالعات چین خوردگی لایه‌های سنگی در منطقه مورد نظر، مورد بررسی قرار گرفت.

سنگ‌هایی که در اعماق زمین تحت فشارهای جهت دار قرار می‌گیرند می‌توانند بدون این که بشکنند،

چین دار شوند. برعکس سنگ‌هایی که در نواحی نزدیک سطح زمین قرار می‌گیرند به علت سردتر بودن،

حالت ترد و شکننده دارند.

چین خوردگی در این منطقه بصورت بسیار ملایم و ساده بوده و تشکیل یک تاقدیس را داده‌است؛

بطوریکه یال‌های این تاقدیس دارای شیب نسبتاً یکسان و ملایم حدود ۲۰ درجه می‌باشند. روند این

تاقدیس بصورت تقریبی N45W اندازه‌گیری شده است.

یال‌های تاقدیس مورد مطالعه دارای امتداد شمال غربی - جنوب شرقی هستند. شیب و جهت

شیب (Dip\Dip direction) به ترتیب برای یال شمالی (20/45) و برای یال جنوبی (20/235) تخمین زده

می‌شود (خسروی، ۱۳۸۴ - ب).

۲-۲-۳-۲- درزه‌های ساختاری

در ارزیابی و مطالعه ناپیوستگی‌های توده‌سنگ محل پروژه، درزه‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند.

مقاومت، شکل پذیری و رفتار مکانیکی توده‌سنگ در زمان حفاری، نگهداری موقت و دائم و در حین بهره

برداری، به مشخصات، وضعیت، آرایش، توزیع و پراکندگی، جهت و سایر خصوصیات ناپیوستگی‌ها بستگی

دارد. بطور کلی تاثیر نهایی درزه‌ها آن است که مجموعه یکپارچه توده‌سنگی را به بخش‌های مجزا و قطعات با ابعاد کوچکتر تقسیم می‌کنند و موجب کاهش مقاومت نهایی توده‌سنگ می‌شوند.

در برداشت ناپیوستگی‌های محل طرح معمولاً از روش‌های تصادفی و یا انتخابی استفاده می‌شود. روش انتخابی جهت برداشت ناپیوستگی‌ها و گسستگی‌هایی است که بر روی سازه تاثیر بیشتری دارند و این در صورتی است که محل اجرای پروژه دقیقاً مشخص باشد.

در مطالعه سیستم ناپیوستگی‌ها، ویژگی‌های ظاهری و مکانیکی سطح ناپیوستگی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و موقعیت فضایی، هندسی و شکل ناپیوستگی‌ها و شرایط سطح آن‌ها مدنظر قرار می‌گیرد. در مبحث موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها، میزان بازشدگی و پرشدگی درزه‌ها، نشت آب و میزان آن، جهت، توزیع و فاصله داری درزه‌ها و مشخصات سطح ناپیوستگی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. طی اندازه‌گیری‌های صحرائی تعداد ۲ دسته درزه در منطقه طرح دیده می‌شود که یک گروه از آن‌ها موازی با سیستم لایه‌بندی است (خسروی، ۱۳۸۴- الف).

پس از بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته مشخص گردید دو سری درزه موجود به صورت متقاطع و با زاویه حدود ۶۰ درجه، سطوح لایه‌بندی را قطع کرده‌اند. شیب و امتداد این دو دسته درزه در دو طرف یال‌های تاقدیس تقریباً همروند می‌باشند. اما جهت شیب آن‌ها به تبع تغییر در جهت شیب لایه‌بندی متفاوت است. دسته درزه اول با امتداد حدود N60W و دسته درزه دوم با امتداد تقریبی NS اندازه‌گیری شده است. در یال شمالی جهت شیب برای دسته درزه اول به سمت جنوب غرب و برای دسته درزه دوم به سمت شرق است. در یال جنوبی جهت شیب برای دسته درزه اول شمال شرق و برای دسته درزه دوم به سمت غرب می‌باشد (خسروی، ۱۳۸۴- ب).

۲-۳-۳- خصوصیات مهندسی ناپیوستگی‌ها

اندازه بازشدگی ناپیوستگی‌ها (در لایه‌های سنگی) در سطح، بین ۱ تا ۵ میلیمتر است، اما این موضوع بیشتر ناشی از عملکرد عوامل هوازدگی بوده و انتظار می‌رود با توجه به مقدار فشار نرمالی که از طرف سربراه تونل اعمال می‌گردد و همچنین تاثیر کمتر هوازدگی، درزه‌ها در عمق بسته شوند. در برخی نقاط نیز درزه‌هایی با بازشدگی بسیار زیاد در حدود چند ده سانتیمتر مشاهده می‌شود. این پدیده در اثر فرایندهای آب‌شستگی و انحلال بخشی از مواد دیواره درزه‌ها می‌باشد که نباید آن را با بازشدگی سطوح اشتباه گرفت (خسروی، ۱۳۸۴-ب).

۲-۳-۴- جهت‌یابی درزه‌ها

اصولاً امتداد صفحات لایه‌بندی و درزه روند نسبتاً یکسانی را نشان می‌دهند. شیب و جهت شیب لایه‌بندی از انتهای تونل (دهانه جنوبی) تا حدود ۱۶۰ متری، ۲۰-۱۵ درجه به سمت جنوب غرب و از متر ۱۶۰ تا ابتدای تونل (دهانه شمالی) ۲۰-۱۷ درجه به سمت شمال شرق متغیر است. درزه‌های موجود در هر دو یال تاقدیس دارای امتداد تقریباً یکسان هستند اما جهت شیب درزه‌ها در دو طرف ارتفاع مورد نظر کاملاً معکوس شده است. محور تاقدیس موجود تقریباً عمود بر امتداد مسیر تونل می‌باشد (خسروی، ۱۳۸۴-ب). در هر ایستگاه درزه‌نگاری حدود ۳۰ تا ۴۰ برداشت صورت گرفته است. این اعداد پس از دسته‌بندی و حذف نقاط اضافی بوسیله نرم افزار DIPS پردازش گردیده‌اند. نتایج حاصل از این پردازش در جدول ۱-۲ آمده است.

۲-۴- تفکیک واحدهای سنگی از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی

با بررسی نتایج حاصل از برداشت‌های زمین‌شناسی مسیر تونل به سه واحد LM-1، LM-2 و CZ

تقسیم بندی شد. ۹۲ درصد از امتداد محور تونل ایمن از واحدهای LM-1 و LM-2 و ۸ درصد از آن در واحد

CZ قرار گرفته است (خسروی، ۱۳۸۴-الف).

۲-۴-۱- واحدهای سنگی LM-1 و LM-2

واحدهای LM-1 و LM-2 متشکل از لایه‌های آهکی میکراتی متوسط تا ضخیم می‌باشند. ضخامت

لایه‌ها در این دو واحد بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ سانتیمتر متغیر می‌باشد. بطور کلی در این واحدهای سنگی سه

سیستم ناپیوستگی قابل مشاهده می‌باشد (لایه‌بندی و ۲ دسته درزه).

شیب لایه‌بندی در محدوده پرتال ورودی (یال شمالی- واحد LM-1)، حدود ۲۰-۱۷ درجه می‌باشد

و جهت شیب لایه‌های مذکور به سمت شمال شرق تمایل دارد. اندازه شیب لایه برای دهانه‌های خروجی

(یال جنوبی- واحد LM-2) حدود ۲۰-۱۵ درجه و وضعیت جهت شیب آن‌ها جنوب غرب اندازه‌گیری شده

است (خسروی، ۱۳۸۴-ب).

مقاومت فشاری لایه‌های سنگی بین ۷۰-۵۰ مگاپاسکال تخمین زده شده است. آزمون‌های

آزمایشگاهی مقاومت تک محوری بر روی مغزه‌های حفاری نیز عدد متوسط ۵۵ مگاپاسکال را تأیید می‌کند

(خسروی، ۱۳۸۴-ج).

جدول ۱-۲ عمده ناپیوستگی‌های موجود در مسیر تونل (خسروی، ۱۳۸۴-ب)

نام ایستگاه	مختصات ایستگاه	نوع واحد	نوع گسستگی	وضعیت نسبت به پیشروی	وضعیت نسبت به تونل	شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)
S-1	۶۴۴۸۲۸	LM-1	لایه‌بندی	خلاف	عمود	۱۰	۳۰
	۳۲۸۱۹۸۲		دسته درزه ۱	خلاف	عمود	۸۵	۹۰

۲۰۵	۸۵	عمود	درجهت	دسته درزه ۲			
۳۰	۱۵	عمود	خلاف	لايه‌بندي	LM-1	۶۴۴۷۸۵ ۳۲۸۱۹۶۰	S-2
۹۵	۸۵	عمود	خلاف	دسته درزه ۱			
۲۰۰	۸۵	عمود	درجهت	دسته درزه ۲			
۳۵	۲۰	عمود	خلاف	لايه‌بندي	LM-1	۶۴۴۷۶۲ ۳۲۸۱۹۷۵	S-3
۹۰	۸۵	عمود	خلاف	دسته درزه ۱			
۲۱۰	۸۰	عمود	درجهت	دسته درزه ۲			
۳۰	۲۰	عمود	خلاف	لايه‌بندي	LM-1	۶۴۴۷۷۹ ۳۲۸۱۹۴۸	S-4
۹۰	۸۰	عمود	خلاف	دسته درزه ۱			
۲۱۰	۸۰	عمود	درجهت	دسته درزه ۲			
۳۰	۲۰	عمود	خلاف	لايه‌بندي	LM-1	۶۴۴۷۲۱ ۳۲۸۱۹۴۹	S-5
۹۰	۸۰	عمود	خلاف	دسته درزه ۱			
۲۱۰	۸۵	عمود	درجهت	دسته درزه ۲			
۳۳	۲۰	عمود	خلاف	لايه‌بندي	LM-1	۶۴۴۷۳۵ ۳۲۸۱۹۲۳	S-6
۹۰	۸۰	عمود	خلاف	دسته درزه ۱			
۲۱۰	۸۵	عمود	درجهت	دسته درزه ۲			
۳۲۵	۲۷	-	-	لايه‌بندي	CZ	۶۴۴۶۶۹ ۳۲۸۱۹۱۵	S-7
۳۰	۹۰	عمود	-	دسته درزه ۱			
۲۱۰	۹۰	عمود	-	دسته درزه ۲			
۳۲۰	۳۰	-	-	لايه‌بندي	CZ	۶۴۴۶۸۶ ۳۲۸۱۸۸۸	S-8
۳۰	۹۰	عمود	-	دسته درزه ۱			
۲۱۰	۹۰	عمود	-	دسته درزه ۲			
۲۴۰	۲۰	عمود	درجهت	لايه‌بندي	LM-2	۶۴۴۶۰۵ ۳۲۸۱۸۷۵	S-9
۳۰	۸۰	عمود	خلاف	دسته درزه ۱			
۲۷۰	۸۵	عمود	درجهت	دسته درزه ۲			
۲۴۰	۲۰	عمود	درجهت	لايه‌بندي	LM-2	۶۴۴۶۲۲	S-10

۲۷۰	۸۰	عمود	درجهت	دسته درزه ۱		۳۲۸۱۸۴۸	
۳۰	۸۰	عمود	خلاف	دسته درزه ۲			
۲۴۰	۲۰	عمود	درجهت	لایه بندی	LM-2	۶۴۴۵۴۳	S-11
۲۷۰	۸۵	عمود	درجهت	دسته درزه ۱		۳۲۸۱۸۳۶	
۳۰	۸۰	عمود	خلاف	دسته درزه ۲			
۲۴۰	۱۷	عمود	درجهت	لایه بندی	LM-2	۶۴۴۵۶۰	S-12
۳۰	۸۰	عمود	خلاف	دسته درزه ۱		۳۲۸۱۸۰۹	
۲۷۰	۸۵	عمود	درجهت	دسته درزه ۲			
۲۴۳	۱۵	عمود	درجهت	لایه بندی	LM-2	۶۴۴۵۲۹	S-13
۳۰	۸۰	عمود	خلاف	دسته درزه ۱		۳۲۸۱۸۱۳	
۲۷۰	۸۵	عمود	درجهت	دسته درزه ۲			

۲-۴-۲- واحد سنگی CZ

این قسمت هسته مرکزی تاقدیس موجود در محدوده تونل را شامل می شود. به احتمال زیاد قسمت مرکزی هسته تاقدیس مورد بررسی، بر اثر اعمال فشارهای ناشی از چین خوردگی و تشکیل ساختار تاقدیسی، دگرشکلی و شکستگی های بیشتری نسبت به بخش های دیگر از خود نشان می دهد (خسروی، ۱۳۸۴-ب).

۲-۵- مطالعات ژئوتکنیکی

به منظور تعیین دقیق لایه ها، مشخصات، دانه بندی و مقاومت سنگ های اطراف و درون تونل، همچنین برای تکمیل اطلاعات زمین شناسی همانند ضخامت لایه ها و مسیر گسل های احتمالی، استفاده از اطلاعات ناشی از لوگ گمانه ها ضروری می باشد.

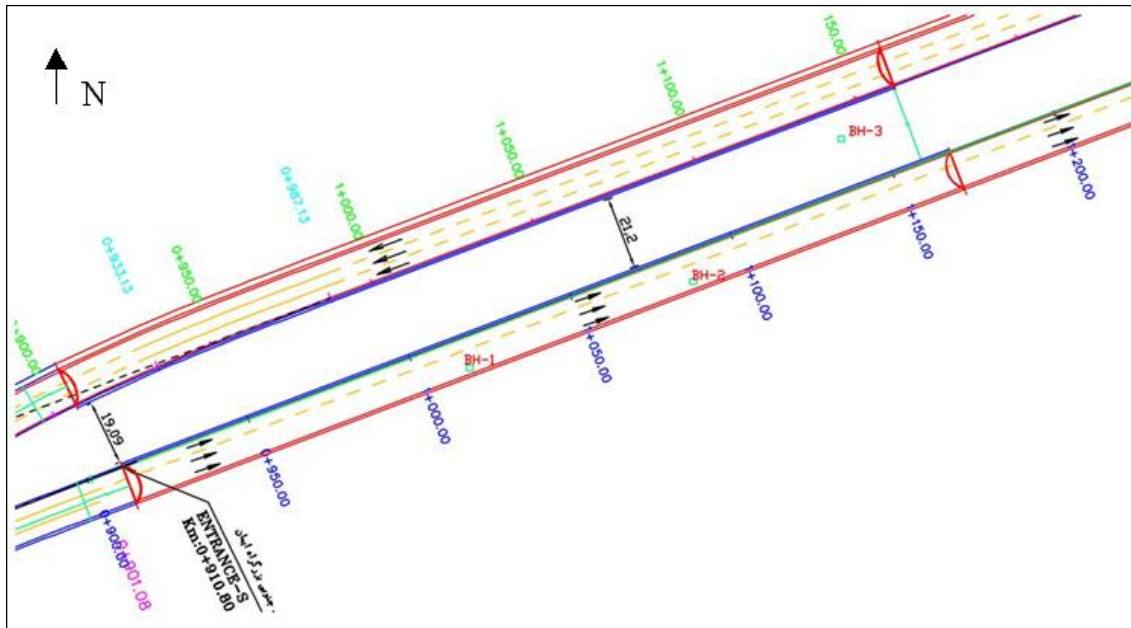
۲-۵-۱- مشخصات گمانه ها

به منظور تعیین پارامترهای برشی و اصلی سنگ، انجام تست‌های آزمایشگاهی و برجای ژئوتکنیکی بر روی گمانه‌ها ضروری می‌باشد. لذا پس از انجام نقشه‌برداری و مشخص کردن مسیر تونل، نسبت به حفر ۳ گمانه تا عمق مناسب (حداقل ۵ متر زیر کف تونل) اقدام شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۲-۲ آمده است.

جدول ۲-۲ مشخصات گمانه‌های ژئوتکنیک (خسروی، ۱۳۸۴-ج)

نام گمانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	رقوم ارتفاعی گمانه	عمق حفاری (متر)
BH-1	644648.22	3281873.31	1668	70
BH-2	644713.05	3281898.48	1675.5	77.5
BH-3	644755.99	3281940.09	1644.5	41.5

فاصله گمانه یک تا ورودی جنوبی ۱۰۳ متر و اختلاف ارتفاع ورودی تا گمانه یک ۵۹ متر است و با توجه به شیب ۱/۸٪ مسیر تونل، ارتفاع گمانه ۱ از کف تونل ۵۷ متر است که موقعیت آن در شکل ۲-۲ آمده است. گمانه ۱ بگونه‌ای است که از عمق ۰ تا ۳ متری، سنگ کاملاً هوازده و از ۳ تا ۲۰ متری سنگ آهک مقدار کمی هوازده بوده و از ۲۰ متر به بعد، سنگ فاقد هوازده‌گی ولی حاوی درزه‌های زیادی می‌باشد که طول آن‌ها محدود بوده و اکثراً با اکسید آهن پر شده و بازدهی آن کمتر از ۱ میلی‌متر می‌باشد به طوری که سطح آن غیرصاف و غیریکنواخت است.



شکل ۲-۲ موقعیت گمانه‌های حفر شده در مسیر تونل

نمودار RQD نشان‌دهنده افزایش کیفیت سنگ از عمق ۳۱ متر به پایین می‌باشد ($RQD \leq 70$)، ولی در عمق ۶۵ متری به میزان کمی از مقدار RQD کاسته شده که البته این منطقه پائین‌تر از کف تونل قرار دارد. مقادیر مربوط به RQD در اعماق مختلف گمانه ۱ در جدول ۲-۳ آمده‌است.

جدول ۲-۳ تغییرات RQD در اعماق مختلف گمانه ۱ (خسروی، ۱۳۸۴-ج)

گمانه	عمق (m)	RQD(%)	گمانه	عمق (m)	RQD(%)	گمانه	عمق (m)	RQD(%)
BH-1	20	57	BH-1	35	96	BH-1	49	90
BH-1	21	78	BH-1	36	76	BH-1	50	80
BH-1	22	87	BH-1	37	52	BH-1	51	95
BH-1	23	65	BH-1	38	73	BH-1	52	90
BH-1	24	78	BH-1	39	60	BH-1	53	92
BH-1	25	60	BH-1	40	80	BH-1	54	100
BH-1	26	70	BH-1	41-42	81	BH-1	55	80
BH-1	27	78	BH-1	43	76	BH-1	56	96
BH-1	28	60	BH-1	44	83	BH-1	57	60
BH-1	29	61	BH-1	45	95	BH-1	58	86
BH-1	30	36	BH-1	46	92	BH-1	59	85
BH-1	31-32	73	BH-1	47	100	BH-1	60	88
BH-1	33	87	BH-1	48	98	BH-1	61	70

BH-1	34	82					
------	----	----	--	--	--	--	--

فاصله ورودی جنوبی تا گمانه دو ۱۷۳ متر می‌باشد و اختلاف ارتفاع آن ۶۵/۵ متر است و با توجه به شیب ۱/۱۸٪ مسیر تونل، ارتفاع گمانه ۲ از کف تونل ۶۳ متر می‌باشد. از عمق ۰ تا ۳ متر سنگ هوازده بوده و از ۳ متر تا حدود ۲۰ متر سنگ آهک کمی هوازده و حاوی شکستگی در عمق‌های ۱۴ و ۱۹/۵ متر می‌باشد و از عمق ۲۰ تا ۳۲ متری سنگ فاقد درزه‌های اتفاقی بوده و از عمق ۳۲ تا ۳۳ متری یک نقطه خردشدگی موجود بوده و بلورهای درشت کلسیت در این عمق بین شکستگی‌ها تشکیل شده است و بعد از این عمق، رنگ سنگ به سفید متمایل شده و درزه‌های اتفاقی که اکثراً با اکسید آهن پر شده مشاهده می‌گردد. در عمق ۵۰ تا ۵۳/۱ متری مقداری بافت ماسه‌ای مشاهده می‌شود. در عمق ۵۳/۲۰ متری یک شکستگی و بعد از آن مجدداً سنگ آهک با درزه‌های اتفاقی پر شده از اکسید آهن دیده می‌شود. در نمودار RQD میزان کیفیت سنگ به صورت قابل توجه در عمق ۳۳ متر افزایش یافته ولی در عمق ۵۰ متری به صورت موضعی کاهش یافته و بعد دوباره افزایش می‌یابد ولی بطور کلی نمودار RQD بصورت خطی با افزایش عمق افزایش می‌یابد.

فاصله ورودی جنوبی تا گمانه سه ۲۲۷ متر می‌باشد و اختلاف ارتفاع آن ۳۰ متر است که با توجه به شیب ۱/۱۸٪ مسیر تونل ارتفاع گمانه ۳ از کف تونل ۲۵ متر می‌باشد. این گمانه از عمق صفر تا ۱۱ متر فاقد درزه و از عمق ۱۱ متری به بعد، رنگ سنگ از خردلی به سفید متمایل شده و درزه‌ها اکثراً از اکسید آهن پر شده و دارای بازشدگی جزئی می‌باشند. نمودار RQD نشان‌دهنده کاهش کیفیت سنگ از سطح به طرف عمق می‌باشد که این کاهش تا عمق ۱۳ متر جزئی بوده ولی بطور متوسط RQD بزرگتر از ۹۵٪ می‌باشد ولی از عمق ۱۳ متری به پایین کیفیت سنگ کاهش یافته به طوری که در عمق ۲۸ متری RQD به ۷۰٪ می‌رسد و این نشان‌دهنده یک لایه مقاوم از عمق صفر تا محدود ۱۳ متری می‌باشد.

۲-۵-۲- نتایج آزمایشات

با انجام آزمایشات مختلف نظیر آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، آزمایش سه محوره و آزمایش

برش مستقیم روی مغزه‌های به‌دست آمده، پارامترهای توده‌سنگ مشخص شد (جدول ۲-۴).

جدول ۲-۴ پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ گمانه اول (خسروی، ۱۳۸۴-ج)

مقادیر	پارامترها
14.48×10^3	مدول الاستیسیته (MPa)
۱۹/۲۸	ضریب چسبندگی (MPa)
۴۳	زاویه اصطکاک (درجه)
۰/۳	ضریب پواسون
۵۱/۵	مقاومت تراکمی تک محوری (MPa)

۲-۵-۳- محاسبه پارامترهای برشی در گمانه ۱ از طریق تجربی

برای بررسی مقادیر ضریب زبری سطوح درزه^۱ (JRC) از پروفیل زبری و از مقادیری که توسط بارتون

در سال ۱۹۷۷ ارائه شده، استفاده شده است. با استفاده از جدول ارزیابی صحرایی ارائه شده در کتاب مهندسی

سنگ کاربردی پروفیسور هوک، مقادیر مقاومت فشاری سنگ دیواره درزه^۲ (JCS) نیز محاسبه شد. زاویه

اصطکاک پایه^۳ (ϕ_B) با توجه به مقادیر پیشنهادی هوک تخمین زده شده است. نتایج حاصل از آزمایشات و

محاسبات در جداول ۲-۵ و ۲-۶ آمده است.

جدول ۲-۵ تخمین پارامترهای مقاومت برشی سطوح لایه‌بندی در سنگ‌های آهکی محل پروژه (خسروی، ۱۳۸۴-ج)

Basic friction angle	۳۰
----------------------	----

^۱ Joint roughness coefficient -

^۲ Joint wall compressive strength -

^۳ Basic friction angle -

JRC		۱۰	
JCS		۳۵	
normal stress (min)		۰/۱	
تنش نرمال (MPa)	مقاومت برشی (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (MPa)
۰/۱	۰/۱۷۷	۵۴/۳۴	۰/۰۳۷
۰/۲	۰/۳۰۷	۵۰/۸۸	۰/۰۶۱
۰/۵	۰/۶۴۳	۴۶/۲۶	۰/۱۲
۱	۱/۱۳۱	۴۲/۷۴	۰/۲۰۷
۲	۱/۹۹۴	۳۹/۲	۰/۳۶۲
۴	۳/۵۱۵	۳۵/۶۶	۰/۶۴۵

جدول ۲-۶ تخمین پارامترهای مقاومت برشی سطوح درزه در سنگ‌های آهکی محل پروژه (خسروی، ۱۳۸۴-ج)

Basic friction angle		۳۰	
JRC		۸	
JCS		۳۵	
normal stress (min)		۰/۱	
تنش نرمال (MPa)	مقاومت برشی (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (MPa)
۰/۱	۰/۱۲	۴۶/۶۱	۰/۰۱۴
۰/۲	۰/۲۲۱	۴۴/۲۲	۰/۰۲۶
۰/۵	۰/۴۹۶	۴۱/۰۷	۰/۰۶
۱	۰/۹۱۲	۳۸/۶۸	۰/۱۱۱
۲	۱/۶۷۵	۳۶/۲۹	۰/۲۰۶
۴	۳/۰۷۳	۳۳/۸۹	۰/۳۸۵

البته نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی و تست‌های انجام شده بر روی مغزه‌ها تنها مشخصات و پارامترهای سنگ بکر را در اختیار ما قرار خواهد داد. ولی می‌توان به کمک فرمول‌های تجربی و روابطی که بین این پارامترها و RQD وجود دارد، این پارامترها را به توده‌سنگ تعمیم داد. برای این کار نرم‌افزارها و فرمول‌هایی وجود دارد که در فصل‌های بعدی آمده‌اند.

۳-۱- مقدمه

در مراحل مختلف تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل‌ها، استفاده از روش‌های رده‌بندی توده‌سنگ بسیار مفید است. با تکیه بر یک سیستم رده‌بندی، می‌توان یک ایده کلی از وضعیت سنگ و در نتیجه وضعیت پایداری آن به دست آورد.

باید توجه داشت که به کارگیری یک روش رده‌بندی توده‌سنگ را نمی‌توان و نباید جایگزین روش‌های طراحی دقیق کرد و تکیه بر یک روش رده‌بندی، در واقع ابزار اولیه‌ای برای طراحی دقیق‌تر به شمار می‌آید. واضح است که تحلیل دقیق پایداری، مستلزم آگاهی دقیق از وضعیت تنش‌های موثر بر توده‌سنگ و خاک و نیز جزئیات شیوه حفر تونل است که دستیابی به این اطلاعات، در مراحل اولیه هیچ پروژه‌ای امکان‌پذیر نیست (مدنی، ۱۳۸۱).

۳-۲- تعیین طبقه‌بندی واحدهای سنگی تونل ایمان

توضیحات مربوط به انواع سیستم‌های طبقه‌بندی به همراه جداول و نمودارهای مورد نیاز این بخش در ضمیمه الف آمده است و فقط نتایج حاصل در این بخش ذکر شده است. با توجه به توضیح داده شده،

مقادیر مربوط به سیستم‌های طبقه‌بندی مختلف در ۳ واحد شناخته شده در محدوده تونل ایمان محاسبه شد:

۳-۲-۱- شاخص کیفیت سنگ (RQD)

در صورتی که هیچ‌گونه عملیات مغزه‌گیری انجام نشده باشد می‌توان از روابط الف-۱ و الف-۲ ضمیمه الف که توسط پالمستروم (۱۹۸۲) ارائه شده است مقدار RQD را محاسبه کرد. این روابط جهت توده‌سنگ‌های تقریباً عاری از رس می‌باشد که در مورد این پروژه صدق می‌کند. با توجه به بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، مقدار J_v متوسط برای زون‌های LM-1 و LM-2 حدوداً ۱۰ و برای زون CZ، ۲۵ تعیین شده است. بنابراین با توجه به رابطه (الف-۱) میزان RQD برای این سه زون در جدول ۱-۳ آمده است. البته در محل پروژه سه گمانه نیز حفر شده است که مقادیر بدست آمده از این رابطه با RQD محاسبه شده با توجه به لوگ گمانه، یکسان می‌باشد.

جدول ۱-۳ عدد RQD محاسبه شده برای واحدهای سنگی مسیر تونل (خسروی، ۱۳۸۴-ب)

توصیف	RQD	زون
مناسب	۸۰	LM-1
مناسب	۸۰	LM-2
ضعیف	۲۵-۳۵	CZ

۳-۲-۲- رده بندی براساس ساختار سنگ (RSR)

برای تعیین این رده‌بندی بایستی مقادیر سه پارامتر A، B و C تعیین شود که توضیحات مربوط به RSR و این سه پارامتر در ضمیمه الف آمده است. با توجه به این که جنس سنگ آهک رسوبی بوده و مقاومت سنگ در واحدهای LM-1 و LM-2 متوسط می‌باشد و از نظر ساختاری، محیط در این دو واحد نسبتاً چین خورده می‌باشد، امتیاز پارامتر A بر طبق جدول (الف- ۲) برای این دو واحد ۱۲ در نظر گرفته شده است.

در مورد امتیاز پارامتر B در واحد LM-1 که در یال شمالی تپه قرار دارد چون جهت شیب لایه‌بندی در خلاف جهت پیشروی بوده و مقدار شیب آن بین ۲۰ تا ۲۵ درجه متغیر است و فاصله‌داری متوسط ناپیوستگی‌ها ۱ تا ۱/۵ متری می‌باشد، با توجه به جدول ۳ ضمیمه الف، امتیاز پارامتر B برای واحد LM-1 ۳۳ در نظر گرفته شده است. در واحد LM-2 که در یال جنوبی تپه قرار دارد با توجه به همسو بودن شیب لایه‌بندی و جهت پیشروی امتیاز پارامتر B، ۳۸ در نظر گرفته شده است.

در واحد CZ جنس سنگ از نوع آهک مارنی با مقاومت پائین بوده و امتیاز پارامتر A برای این واحد ۶ در نظر گرفته شده است. با توجه به امتداد و شیب ناپیوستگی‌ها و فاصله‌داری نسبتاً نزدیک درزه‌ها در این واحد، امتیاز ۲۲ برای پارامتر B اختصاص داده شده است.

در نهایت با توجه به توضیحات ذکر شده در بالا، مقادیر RSR برای واحدهای مختلف زمین‌شناسی محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۳-۲ آمده است.

جدول ۳-۲ تأثیر آب زیرزمینی، شرایط درزه و محاسبه RSR

ردیف	واحد	A+B	آب زیرزمینی و تراوش	شرایط درزه	امتیاز	RSR

۶۸	۲۳	خوب	کم	۴۵	LM-1	۱
۷۳	۲۳	خوب	کم	۵۰	LM-2	۲
۳۷	۹	بد	کم	۲۸	CZ	۳

۳-۲-۳- رده بندی ژئومکانیکی RMR

فرم مربوط به امتیازدهی این سیستم طبقه بندی بر اساس ویرایش سال ۱۹۸۹ در جدول ۵ ضمیمه

الف آمده است. با استفاده از این جدول و داده های زمین شناسی و ژئوتکنیکی موجود، مقادیر RMR برای واحدهای مختلف زمین شناسی به صورت زیر محاسبه شد:

۳-۲-۳-۱- محاسبه RMR زون LM-1 (جبهه شمالی)

جدول ۳-۳ پارامترهای تعیین شده جهت طبقه بندی RMR توده سنگ زون LM-1 را نشان می دهد.

RMR محاسبه شده بیانگر وجود توده سنگی با کیفیت متوسط در این زون می باشد.

جدول ۳-۳ پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ و امتیاز RMR زون LM-1

امتیاز	محدوده مقادیر	پارامتر
۷	۵۰-۷۰ (مگاپاسکال)	مقاومت (فشاری تک محوره)
۱۷	۸۰	RQD
۱۵	۵۰-۱۵۰ (سانتیمتر)	فاصله ناپیوستگی ها
۱۷	سطوح زبر، جدایش حدود ۱ تا ۵ میلیمتر، دیواره ها کمی هوازده	شرایط ناپیوستگی
۱۰	مرطوب	آب زیرزمینی

۱۰-	نامساعد (امتداد عمود بر محور تونل، جهت پیشروی خلاف جهت شیب (شیب لایه‌بندی ۲۵ تا ۲۰ درجه است و خلاف پیشروی و عمود بر محور تونل)	جهت یابی درزه‌ها
۵۶		RMR

امتیاز مربوط به شرایط ناپیوستگی نیز با توجه به راهنمای همراه با جدول محاسبه شد که جزئیات

مربوط به آن در جدول ۳-۴ آمده است.

جدول ۳-۴ محاسبه شرایط ناپیوستگی زون LM-1

امتیاز	محدوده مقادیر	پارامتر
۲	۳ تا ۱۰ متر (بیش از ۵ متر)	طول ناپیوستگی
۱	۱-۵ میلیمتر	بازشدگی
۵	زبر	زیری
۴	اکسید آهن و در برخی موارد کلسیت	پرشدگی
۵	کمی هوازده	هوازدگی
۱۷		مجموع

۳-۲-۳-۲- محاسبه RMR زون LM-2 (جبهه جنوبی)

جدول ۳-۵ پارامترهای تعیین شده جهت طبقه‌بندی RMR توده‌سنگ زون LM-2 را نشان می‌دهد.

RMR محاسبه شده بیانگر وجود توده‌سنگی با کیفیت خوب در این زون می‌باشد.

جدول ۳-۵ پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ و امتیاز RMR زون LM-2

امتیاز	محدوده مقادیر	پارامتر
۷	۵۰-۷۰ (مگاپاسکال)	مقاومت (فشاری تک محوره)
۱۷	۸۰	RQD
۱۵	۵۰-۱۵۰ (سانتیمتر)	فاصله ناپیوستگی‌ها
۱۷	سطوح نسبتاً زبر، جدایش حدود ۱ تا ۵ میلیمتر، دیواره‌ها کمی هوازده	شرایط ناپیوستگی
۱۰	مرطوب	آب زیرزمینی
-۵	مناسب (دسته درزه ۲ در خلاف جهت پیشروی با شیب ۷۵ تا ۸۰ و امتداد آن عمود بر محور تونل)	جهت یابی درزه‌ها
۶۱		RMR

جهت محاسبه امتیاز شرایط ناپیوستگی نیز از راهنمای همراه با جدول استفاده شده و با توجه به

جدول ۳-۶ امتیاز ۱۷ برای این زون در نظر گرفته شد.

جدول ۳-۶ محاسبه شرایط ناپیوستگی زون LM-2

امتیاز	محدوده مقادیر	پارامتر
۲	۳ تا ۱۰ متر	طول ناپیوستگی
۱	۱-۵ میلیمتر	بازشدگی
۵	زبر	زبری

۴	اکسید آهن و در برخی موارد کلسیت	پرشدگی
۵	کمی هوازده	هوازدهگی
۱۷		مجموع

۳-۲-۳- محاسبه RMR زون CZ

جدول ۷-۳ پارامترهای تعیین شده جهت طبقه‌بندی RMR توده‌سنگ زون CZ را نشان می‌دهد. RMR

محاسبه شده بیانگر وجود توده‌سنگی با کیفیت ضعیف در این زون می‌باشد.

جدول ۷-۳ پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ و امتیاز RMR زون CZ

امتیاز	محدوده مقادیر	پارامتر
۴	۲۵-۵۰ (مگاپاسکال) (سنگ این قسمت از جنس آهک مارنی است و مقاومت فشاری کمی دارد)	مقاومت ماده سنگ بکر (فشاری تک محوره)
۸	۲۵-۳۵	RQD
۸	۱۰-۲۰ (سانتیمتر)	فاصله ناپیوستگی‌ها
۱۶	سطوح کمی زیر، جدایش حدود ۱ تا ۵ میلی‌متر، دیواره‌ها هوازده	شرایط ناپیوستگی
۱۰	مرطوب	آب زیرزمینی
-۱۰	نامساعد	جهت یابی درزه‌ها
۳۶		RMR

با توجه به جدول ۳-۸، امتیاز مربوط به شرایط ناپیوستگی در این زون ۱۶ در نظر گرفته شد.

جدول ۳-۸ محاسبه شرایط ناپیوستگی زون CZ

امتیاز	محدوده مقادیر	پارامتر
۲	۳ تا ۱۰ متر	طول ناپیوستگی
۱	۱-۵ میلیمتر	بازشدگی
۳	کمی زبر	زبری
۴	اکسید آهن و در برخی موارد کلسیت	پرشدگی
۶	هوانزده	هوازدگی
۱۶		مجموع

۳-۲-۴- رده بندی بر اساس شاخص کیفیت تونل سازی Q

فرم مربوط به امتیازدهی شاخص کیفی تونل زنی در سنگ (Q) در جدول ۷ ضمیمه الف آمده است. با کمک این جدول و اطلاعات موجود پروژه، مقادیر Q برای واحدهای مختلف تونل ایمان به صورت زیر محاسبه شد:

۳-۲-۴-۱- محاسبه Q زون LM-1 (جبهه شمالی)

جدول ۳-۹ پارامترهای تعیین شده جهت طبقه بندی Q توده سنگ زون LM-1 را نشان می دهد. Q محاسبه شده بیانگر وجود توده سنگی با کیفیت متوسط در این زون می باشد.

جدول ۳-۹ پارامترهای ژئومکانیکی و امتیاز Q زون LM-1

امتیاز	وضعیت پارامتر	پارامتر
--------	---------------	---------

۸۰		RQD
۶	دو دسته درزه و درزه‌های اتفاقی	J_n
۳	زیر و نامنظم، موجدار	J_r
۲	با توجه کمی هوازده بودن درزه‌ها	J_a
۰/۶۶	جریان آب با فشار متوسط، آب شستگی مواد پرکننده گاهی اتفاق می‌افتد.	J_w
۲/۵	-----	SRF
۵/۲۸		مقدار Q

۳-۲-۴-۲- محاسبه Q زون LM-2 (جبهه جنوبی)

جدول ۳-۱۰ پارامترهای تعیین شده جهت طبقه‌بندی Q توده‌سنگ زون LM-2 را نشان می‌دهد. Q محاسبه شده بیانگر وجود توده‌سنگی با کیفیت متوسط در این زون می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌کنید پارامتر Q برای هر دو زون LM-1 و LM-2 به هم برابر می‌باشد، و این ناشی از در نظر نگرفتن امتداد ناپیوستگی‌ها و ارتباط آن با جهت حفاری می‌باشد زیرا بارتن و همکاران پارامترهای J_n ، J_r و J_a را به عنوان مبنا مهمتر از جهات درزه در نظر گرفتند و معتقدند اگر جهات درزه نیز در نظر گرفته می‌شد، عمومیت طبقه‌بندی کمتر می‌شد. اما تعیین جهات در پارامترهای J_r و J_a به طور ضمنی در نظر گرفته شده زیرا این پارامترها برای نامطلوبترین درزه تعیین می‌شوند (هوک و کیسر، ۱۳۸۰).

جدول ۳-۱۰ پارامترهای ژئومکانیکی و امتیاز Q زون LM-2

پارامتر	وضعیت پارامتر	امتیاز
RQD		۸۰

۶	دو دسته درزه و درزه‌های اتفاقی	J_n
۳	زبر و نامنظم، موجدار	J_r
۲	با توجه به زاویه اصطکاک و کمی هوازده بودن درزه‌ها	J_a
۰/۶۶	جریان آب با فشار متوسط، آب شستگی مواد پرکننده گاهی اتفاق می‌افتد.	J_w
۲/۵	-----	SRF
۵/۲۸		مقدار Q

۳-۲-۴-۳- محاسبه Q زون CZ

جدول ۱۱-۳ پارامترهای تعیین شده جهت طبقه‌بندی Q توده‌سنگ زون CZ را نشان می‌دهد. Q

محاسبه شده بیانگر وجود توده‌سنگی با کیفیت خیلی ضعیف در این زون می‌باشد.

جدول ۱۱-۳ پارامترهای ژئومکانیکی و امتیاز Q زون CZ

امتیاز	وضعیت پارامتر	پارامتر
۲۵		RQD
۶	دو دسته درزه و درزه‌های اتفاقی	J_n
۱/۵	زبر و نامنظم و مسطح	J_r
۳	با توجه به نوع پرکننده	J_a
۰/۶۶	جریان آب با فشار متوسط، آب شستگی مواد پرکننده گاهی اتفاق می‌افتد.	J_w
۲/۵	-----	SRF

۰/۵۵	مقدار Q
------	---------

۳-۳- بررسی روابط بین سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ

Rutledge در سال ۱۹۷۸ در نیوزلند روابط زیر را ارائه داد (هراتی، ۱۳۷۴):

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (۱-۳)$$

$$RSR = 0.77 RMR + 12.4 \quad (۲-۳)$$

$$RSR = 13.3 \ln Q + 46.5 \quad (۳-۳)$$

به کمک جدول ۱۲-۳ می‌توان مقادیر به دست آمده به صورت تحلیلی را با مقادیر حاصل از روابط

بالا مقایسه کرد:

جدول ۱۲-۳ مقایسه مقادیر RMR, RSR حاصل از جداول و روابط

CZ	LM-2	LM-1	
۳۶	۶۱	۵۶	RMR (حاصل از جداول ۳-۳، ۵-۳ و ۷-۳)
۳۸/۶۲	۵۸/۹۷	۵۸/۹۷	RMR (معادله ۱-۳)
۳۷	۶۸	۶۸	RSR (حاصل از جدول ۲-۳)
۴۰/۱۲	۵۹/۳۷	۵۵/۵۲	RSR (معادله ۲-۳)
۳۸/۵۵	۶۸/۶۳	۶۸/۶۳	RSR (معادله ۳-۳)

۳-۴- استفاده از RQD در انتخاب سیستم نگهداری

برای انتخاب سیستم نگهداری بر اساس شاخص کیفی سنگ از جدول ۱ ضمیمه الف که توسط

Deer و همکاران برای تونل‌های سنگی به قطر ۶ تا ۱۲ متر در سال ۱۹۷۰ ارائه شد، استفاده شده است. با

توجه به RQD و جدول فوق سیستم نگهداری زیر برای زون‌های مختلف تونل ایمان، تخمین زده شده است (جدول ۳-۱۳).

جدول ۳-۱۳ طراحی سیستم نگهداری اولیه واحدهای مختلف تونل ایمان با استفاده از سیستم طبقه‌بندی RQD

زون	RQD	کیفیت سنگ	روش تونل زنی	پیچ‌سنگ	شاتکریت
LM-1	۸۰	خوب (75<RQD<90)	حفاری سنتی	بر طبق نقشه با فاصله ۱/۵ تا ۱/۸ متر	استفاده گاه‌گذاری با کاربرد موضعی به ضخامت ۵ تا ۷/۵ سانتیمتر
LM-2	۸۰	خوب (75<RQD<90)	حفاری سنتی	بر طبق نقشه با فاصله ۱/۵ تا ۱/۸ متر	استفاده گاه‌گذاری با کاربرد موضعی به ضخامت ۵ تا ۷/۵ سانتیمتر
۲CZ	۲۵-۳۵	ضعیف (25<RQD<50)	حفاری سنتی	بر طبق نقشه با فاصله ۰/۶ تا ۱/۲۲ متر	۱۵ سانتیمتر یا بیشتر روی تاج و دیواره‌ها

در زون CZ به دلیل خردشدگی زیاد توده‌سنگ و زمان خودنگهداری پائین آن، استفاده از پیچ سنگ نتیجه مطلوبی نخواهد داشت زیرا علاوه بر وقت گیر بودن نصب پیچ سنگ‌ها با فاصله‌داری تعیین شده، زمان مورد نیاز برای فعال شدن آن‌ها هم نسبتاً طولانی (حدود ۱۲ ساعت) خواهد بود. بنابراین پیشنهاد می‌شود در زون CZ از پیچ سنگ استفاده نشده و برای نگهداری تونل از شاتکریت به همراه قاب فولادی استفاده شود. که با توجه به جداول مربوط به طراحی قاب با استفاده از RQD، بایستی از قاب‌های فولادی با فاصله ۲ الی ۴ فوت از یکدیگر استفاده شود.

۴ - در صورت عدم کارایی پیچ‌سنگ و شاتکریت در این زون بر طبق جداول بایستی از قاب‌های فولادی با فاصله ۲ الی ۴ فوت از یکدیگر استفاده کرد.

۳-۵- استفاده از RSR در انتخاب سیستم نگهداری

با مشخص شدن شاخص RSR و با مراجعه به جداول و نمودارها می‌توان مشخصات سیستم نگهداری تونل را بدست آورد. در شکل ۱ ضمیمه الف نمونه‌ای از این منحنی‌ها برای تونلی با قطر ۷/۳ متر نشان داده شده است. با استفاده از این منحنی و مقادیر RSR موجود، سیستم نگهداری تعیین شد که در جدول ۳-۱۴ آمده است.

شاخص RSR ابزار بسیار مفیدی برای انتخاب قاب‌های فولادی در تونل‌های سنگی است. به همین جهت شاخص RSR برای طراحی سیستم نگهداری به وسیله پیچ‌سنگ و شاتکریت توصیه نمی‌شود (Bieniawski, 1984).

جدول ۳-۱۴ طراحی سیستم نگهداری اولیه واحدهای مختلف تونل ایمان با استفاده از RSR

سیستم نگهداری	RSR	واحد
پیچ‌سنگ‌های به قطر ۲/۵ سانتیمتر و به فاصله ۱/۸ متر از هم و شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر	۶۸	LM-1
پیچ‌سنگ‌های به قطر ۲/۵ سانتیمتر و به فاصله ۲ متر از هم و شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر	۷۳	LM-2
پیچ‌سنگ‌های به قطر ۲/۵ سانتیمتر و به فاصله ۰/۷۵ متر از هم و شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر به جای این سیستم نگهداری می‌توان از قاب‌های فولادی 8WF31 (تیرآهن‌های بال پهن با مقطع ۸، عرض ۸ اینچ و وزن ۳۱ پوند در هر فوت) به فاصله ۵ فوت از یکدیگر استفاده کرد ^۵ .	۳۷	CZ

فشار موثر بر سیستم نگهداری از رابطه زیر بدست می‌آید (مدنی، ۱۳۸۱):

$$W = 0.26(B + H) \left[\left(\frac{8880}{RSR + 30} \right) - 80 \right] \quad (۳-۴)$$

^۵ - انتخاب هر يك از این دو نوع سیستم نگهداري به بررسی پارامترهاي فني و اقتصادي بستگی دارد.

که در آن B و H به ترتیب عرض و ارتفاع تونل بر حسب متر و W بار سنگ بر حسب کیلوپاسکال

است. با استفاده از رابطه فوق مقادیر بار سنگ در واحدهای مختلف تونل محاسبه شد که در جدول ۳-۱۵ آمده است.

جدول ۳-۱۵ محاسبه فشار موثر بر سیستم نگهداری با استفاده از RSR

W(KPa)	RSR	واحد		
68.74	68	LM-1	B=15.3m	H=9.5m
40	73	LM-2		
338.76	37	CZ		

۳-۶- استفاده از RMR در تعیین پارامترهای ویژه توده سنگ

۳-۶-۱- نوع سیستم نگهداری

در سال ۱۹۸۹ بنیاوسکی یک مجموعه راهنما برای انتخاب نگهدارنده در تونل‌های سنگی با توجه به RMR معلوم آن‌ها ارائه کرد. این راهنما در جدول ۶ ضمیمه الف آمده است. باید توجه نمود که این راهنما برای تونلی با دهانه ۱۰ متر و مقطع نعل اسبی که تحت تنش کمتر از ۲۵ مگاپاسکال (معادل عمقی کمتر از ۹۰۰ متر) قرار گرفته و به روش سنتی حفاری می‌شود، ارائه شده است (هوک و کیسر، ۱۳۸۰). با توجه به توضیحات آمده در بالا، سیستم نگهداری تونل مورد نظر در سه واحد تشخیص داده شده، در جدول ۳-۱۶ خلاصه شده است.

جدول ۳-۱۶ طراحی سیستم نگهداری اولیه واحدهای مختلف تونل ایمان با استفاده از سیستم طبقه‌بندی RMR

واحد سنگی	RMR	پیچ سنگ با قطر ۲۰ میلیمتر تمام تزریقی	شاتکریت	قاب فولادی
LM-1	۵۶	شبکه منظم پیچ سنگ به طول ۴ متر با فاصله ۱/۵ تا ۲ متر در سقف و دیواره و در سقف همراه با تور سیمی	۵۰ تا ۱۰۰ میلیمتر در سقف و ۳۰ میلیمتر در دیواره	نیازی نیست
LM-2	۶۱	موضعی، پیچ سنگ به طول ۳ متر با فاصله ۲/۵ متر و گاهی همراه با تور سیمی	۵۰ میلیمتر در سقف اگر نیاز باشد	نیازی نیست
CZ	۳۶	شبکه پیچ سنگ ها به طول ۴ تا ۵ متر با فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در سقف و دیواره ها همراه با تور سیمی	۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیمتر در سقف و ۱۰۰ میلیمتر در دیواره	کم تا متوسط با فاصله ۱/۵ متر در صورت نیاز

۳-۶-۲- تعیین مدول تغییر شکل برجا

ارتباط بین مدول تغییر شکل برجا و RMRهای بزرگتر از ۵۵، توسط بنیاوسکی در سال ۱۹۷۸ و با

استفاده از تعداد زیادی آزمایش در ۱۵ نقطه دنیا به فرم زیر بیان شد (ترابی، ۱۳۸۱):

$$RMR > 55 \Rightarrow E_m = 2(RMR) - 100 \quad (۵-۳)$$

برای RMR های کوچکتر از ۵۵، Pereira و Serafim در سال ۱۹۸۳ رابطه زیر را ارائه دادند:

$$E_m = 10 \left(\frac{RMR-10}{40} \right) \quad (۶-۳)$$

با توجه به روابط ۵ و ۶ مدول الاستیسیته توده سنگ در واحدهای مختلف تونل ایمن محاسبه شد که

نتایج آن در جدول ۳-۱۷ آمده است.

جدول ۳-۱۷ تعیین مدول شکل برجای توده سنگ با کمک RMR

$E_m (GPa)$	RMR	زون
۱۲	۵۶	LM-1
۲۲	۶۱	LM-2
۴/۴۶	۳۶	CZ

۳-۶-۳- مدت زمان پایداری تونل

با مشخص شدن RMR و به کمک منحنی شکل ۲ ضمیمه الف زمان پایداری برای دهانه مورد نظر

تعیین شده است (جدول ۳-۱۸).

۳-۶-۴- توصیف کیفی سنگ و تعیین C و ϕ توده سنگ

با استفاده از قسمت D جدول ۵ ضمیمه الف، می توان مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را

با توجه به RMR تعیین کرد (جدول ۳-۱۸).

۳-۶-۵- تعیین ارتفاع بار روی سنگ

برای محاسبه ارتفاع بار سنگ از رابطه زیر که توسط انال (۱۹۸۳) ارائه شد، استفاده شد:

$$h_1 = \frac{100 - RMR}{100} \times B \quad (۷-۳)$$

که در آن:

$$h_1 = \text{ارتفاع بار سنگ (m)}$$

B = دهانه تونل (m)

۳-۶-۶- تعیین فشار وارد بر سیستم نگهداری

جهت تعیین فشار وارد بر سیستم نگهداری از دو رابطه زیر که به ترتیب توسط اونال^۶ (۱۹۸۳) و

ونکاستوالو^۷ (۱۹۸۹) ارائه شده است، استفاده می‌شود:

$$P = \gamma h_1 \quad (۸-۳)$$

$$P = \gamma B(1.7 - 0.037RMR + 0.0002RMR^2) \quad (۹-۳)$$

که در آن‌ها:

γ = وزن حجمی سنگ (ton/m^3)

P = فشار وارد بر نگهداری (ton/m^2)

در جدول ۳-۱۸ پارامترهای ویژه توده‌سنگ که با توجه به RMR تعیین شده‌اند، آمده است:

جدول ۳-۱۸ تعیین پارامترهای توده‌سنگ با استفاده از RMR

CZ	LM-2	LM-1	
۳۶	۶۱	۵۶	RMR
IV	II	III	شماره کلاس
۱۰ ساعت برای دهانه ۱/۵ متری	۷ ماه برای دهانه ۸ متری	یک هفته برای دهانه ۵ متری	زمان خود پایداری
۲۰۰-۱۰۰	۳۰۰-۴۰۰	۳۰۰-۲۰۰	چسبندگی توده‌سنگ (KPa)

^۶ - unal
^۷ - Venkateswaelu

۲۵-۱۵	۴۵-۳۵	۳۵-۲۵	زاویه اصطکاک توده سنگ (درجه)
ریزش فوری	سه هفته	ریزش فوری	زمان پابرجایی دهانه
۱۵/۳۰	۱۵/۳۰	۱۵/۳۰	(m)B
2.7×10^{-3}	2.7×10^{-3}	2.7×10^{-3}	وزن مخصوص (Kg/cm^3)
۹/۷۹	۵/۹۶۷	۶/۷۳۲	ارتفاع بار سنگ (m)
۲۵۸/۷۲	۱۵۷/۷۸	۱۷۷/۳۸	P (KPa) (انال ۱۹۸۳)
۲۵۴/۸	۷۵/۷۵۴	۱۰۳/۲۹۲	P (KPa) (ونکاستور ۱۹۸۹)

۳-۷- استفاده از اندیس کیفی تونل سازی Q در تعیین پارامترهای ویژه توده سنگ

۳-۷-۱- نوع سیستم نگهداری

پس از محاسبه Q این مقدار با کمیت دیگری موسوم به اندازه معادل حفاری، به سیستم نگهداری

تونل ارتباط پیدا می کند. این کمیت تابعی از ابعاد فضا و نوع کاربرد آن است و با استفاده از رابطه ۳-۱۰ تعیین می گردد:

$$\text{بعد معادل حفاری} = \frac{B}{ESR} \quad (۳-۱۰)$$

در رابطه فوق ESR یا ضریب پایداری فضا عددی است که مطابق جدول ۸ ضمیمه الف به کاربری

فضای حفاری شده بستگی دارد (هوک و کیسر، ۱۳۸۰).

با توجه به این جدول و کاربری تونل های ایمن $ESR=1$ برای انتخاب سیستم نگهداری تعیین شد.

با داشتن بعد معادل حفاری و مقدار Q با کمک شکل ۳ ضمیمه الف سیستم نگهداری برای تونل های مورد

نظر تعیین شد که در جدول ۳-۱۹ آمده است.

جدول ۳-۱۹ طراحی سیستم نگهداری اولیه واحدهای مختلف تونل ایمان با استفاده از سیستم طبقه‌بندی Q

سیستم نگهداری	Q	واحد
پیچ‌سنگ‌های ۴/۵ متری به فاصله ۲/۱ تا ۲/۳ متر و شاتکریت به ضخامت ۴۰-۱۰۰ میلی‌متر	۵/۲۸	LM-1
پیچ‌سنگ‌های ۴/۵ متری به فاصله ۲/۱ تا ۲/۳ متر و شاتکریت به ضخامت ۴۰-۱۰۰ میلی‌متر	۵/۲۸	LM-2
پیچ‌سنگ‌ها ۴/۵ متری به فاصله ۱/۵ تا ۱/۷ متر و شاتکریت مسلح به ضخامت ۹۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر	۰/۵۵	CZ

طول پیچ‌سنگ (L) را می‌توان با داشتن عرض فضای زیرزمینی (B) و ضریب اهمیت نگهدارنده

(ESR) و قرار دادن آن در رابطه ۳-۱۱ تخمین زد (هوک و کیسر، ۱۳۸۰):

$$L = \frac{2 + 0.15B}{ESR} = \frac{2 + (0.15 \times 15.3)}{1} = 4.295 \approx 4.5m \quad (11-3)$$

۳-۷-۲- تعیین دهانه پایدار تونل (بدون نگهداری)

بین ماکزیمم دهانه بدون نگهداری و Q رابطه زیر برقرار است (هوک و کیسر، ۱۳۸۰):

$$2(ESR)Q^{0.4} = \text{ماکزیمم دهانه بدون نگهداری (متر)} \quad (12-3)$$

۳-۷-۳- تعیین فشار وارد بر سیستم نگهداری

گریمستاد و بارتن پیشنهاد کردند که فشار نگهدارنده سقف نهایی را می‌توان از رابطه زیر تخمین زد

(Bieniawski, 1984):

$$P_{roof} = \frac{2\sqrt{J_n} Q^{-1/3}}{3J_r} \quad (13-3)$$

که در آن P_{roof} فشار نگهداری سقف نهایی و واحد آن (Kg/cm^2) است.

در جدول ۳-۲۰ پارامترهای ویژه توده سنگ که با توجه به Q تعیین شده اند، آمده است:

جدول ۳-۲۰ تعیین پارامترهای ویژه توده سنگ با کمک سیستم طبقه بندی Q

واحد	Q	J_r	J_n	$P_{roof} (Kg/Cm^2)$	ماکزیمم دهانه بدون نگهداری (m)
LM-1	۵/۲۸	۳	۶	۰/۳۱۲۶	۳/۸۹
LM-2	۵/۲۸	۳	۶	۰/۳۱۲۶	۳/۸۹
CZ	۰/۵۵	۱/۵	۶	۱/۳۲۹	۱/۵۷۵

۳-۸-۱- اندیس مقاومت زمین شناسی (GSI)

از آن جا که طبقه بندی توده سنگ با روش های متداول نظیر RMR و Q از یکسو نیازمند صرف زمان نسبتاً زیاد برای تعریف کمی پارامترهای متعدد بوده و از سوی دیگر دارای یکسری محدودیت ها می باشد، هوک و براون در سال ۱۹۹۷ به جای سیستم طبقه بندی RMR، یک شاخص کاربردی تر، به نام شاخص مقاومت زمین شناختی (GSI) را پیشنهاد نمودند که بلافاصله به عنوان یک پارامتر ورودی در معیار شکست تجربی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۸-۱- روش های محاسبه GSI

۳-۸-۱-۱- تعیین شاخص GSI بر اساس شاخص RMR

از آن جا که شاخص RMR بر اساس دو جدول مربوط به سال های ۱۹۷۶ و ۱۹۸۹ محاسبه می شود، لذا بسته به اینکه از کدام جدول برای محاسبه RMR استفاده شده است، محاسبه عددی GSI متفاوت خواهد بود (هوک و کیسر، ۱۳۸۰).

الف: شاخص RMR براساس معیار سال ۱۹۷۶: اگر شاخص RMR توده‌سنجی بر اساس معیار سال ۱۹۷۶ میلادی تعیین شده باشد برای محاسبه GSI باید امتیاز آب کاملاً خشک یعنی ۱۰ و جهت ناپیوستگی‌ها خیلی مطلوب یعنی صفر در نظر گرفته شود، در این صورت اگر RMR حاصل از ۱۸ بزرگتر شد، در این صورت اندازه عددی دو شاخص RMR و GSI یکسان خواهد بود. ولی اگر RMR محاسبه شده کمتر از ۱۸ باشد، GSI را نمی‌توان براساس RMR تعیین کرد و در این موارد باید از سایر روش‌ها استفاده نمود.

ب: شاخص RMR براساس معیار سال ۱۹۸۹: اگر شاخص RMR براساس معیار سال ۱۹۸۹ میلادی تعیین شده باشد برای محاسبه GSI باید امتیاز آب کاملاً خشک یعنی ۱۵ و جهت ناپیوستگی‌ها خیلی مطلوب یعنی صفر در نظر گرفته شود، در این صورت اگر RMR حاصل از ۲۳ بزرگتر باشد، می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$RMR_{89} > 23 \Rightarrow GSI = RMR_{89} - 5 \quad (۱۴-۳)$$

ولی اگر RMR محاسبه شده کمتر از ۲۳ باشد، شاخص GSI را نمی‌توان براساس RMR تعیین کرد و در این موارد باید از سایر روش‌ها استفاده نمود.

با توجه به این که RMR محاسبه شده برای تونل ایمان برمبنای سال ۱۹۸۹ می‌باشد، شاخص GSI برای سه زون مورد نظر محاسبه شد که نتایج حاصل در جدول ۳-۲۱ آمده است.

جدول ۳-۲۱ محاسبه GSI واحدهای مختلف تونل ایمان با استفاده از RMR

GSI	RMR_{89} (خشک و جهت ناپوستگی خیلی مطلوب)	واحد
۶۵=۷۱-۵	۵۶+۱۵=۷۱	LM-1

۶۵=۷۱-۵	۶۱+۱۰=۷۱	LM-2
۴۶=۵۱-۵	۳۶+۱۵=۵۱	CZ

۳-۸-۱-۲- تعیین شاخص GSI براساس شاخص Q

در این روش، ابتدا شاخص Q تعدیل شده موسوم به Q' را از رابطه ۳-۱۵ تعیین می‌کنند (هوک و

کیسر، ۱۳۸۰):

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (۳-۱۵)$$

سپس شاخص GSI را از رابطه ۳-۱۶ محاسبه می‌کنند:

$$GSI = 9LnQ' + 44 \quad (۳-۱۶)$$

با توجه به روابط بالا، مقادیر Q' و سپس GSI برای زون‌های مختلف محاسبه شد که خلاصه نتایج در جدول ۳-۲۲ آمده است.

جدول ۳-۲۲ محاسبه GSI واحدهای مختلف تونل ایمان با استفاده از Q

GSI	Q'	واحد
۷۱	۲۰	LM-1
۷۱	۲۰	LM-2
۵۱	۲/۰۸۳	CZ

۳-۸-۱-۳- تعیین شاخص GSI به روش هوک و براون

در پیشنهاد اولیه هوک و براون برای سیستم طبقه‌بندی GSI، سنگ‌ها از نظر میزان شکستگی به

چهار گروه بلوکی، بسیار بلوکی، بلوکی/تجزیه شده و تجزیه شده تقسیم می‌شدند (ستون سمت چپ شکل ۳-

۱) که در فاصله زمانی کوتاه به دلیل ضرورت‌هایی که احساس می‌شود، دو گروه جدید موسوم به «

توده‌سنگ‌های با ساختار ورقه‌ای» و «سنگ‌های سالم و توده‌ای» به سیستم GSI اضافه شدند (شکل ۳-۲)

(Hoek, 1998 & 1999 a).

GSI	Surface Quality				
	Very good Very rough, fresh unweathered surfaces	Good Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Fair Smooth, moderately weathered or altered surfaces	Poor Slack-sided, highly weathered surfaces with compact coating or fillings of angular fragments	Very poor Slack-sided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
Blocky - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	80	75	65	55	45
Very Blocky - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	70	60	50	40	30
Blocky/disturbed - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets				25	15
Disintegrated - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces				20	10

Decreasing surface quality →

Decreasing interlocking of rock pieces ↓







شکل ۳-۱ نمودار اولیه تعیین GSI (Hoek, 1997)

باتوجه به شکل ۳-۲ و شرایط زمین‌شناسی، محدوده GSI برای واحدهای مختلف تونل ایمان

محاسبه شد که در جدول ۳-۲۳ آمده است.

جدول ۳-۲۳ محاسبه GSI واحدهای تونل ایمان با استفاده از جدول GSI (۱۹۹۹)

GSI	رده	واحد
۷۵-۵۵	B/G	LM-1
۷۵-۵۵	B/G	LM-2
۴۵-۳۰	BD/F	CZ

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the description of structure and surface conditions of the rock mass, pick an appropriate Box in this chart. Estimate the average value of 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 recognise 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, when individual block sizes are more than approximately one quarter of the excavation dimension, failure will be structurally controlled and the Hoek-Brown criterion should not be used.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Smooth, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or filling
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE- Intact rock specimens or massive in-situ rock masses with very few widely spaced discontinuities	90 M/VG	M/G	NOT APPLICABLE		
	BLOCKY-very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	80 B/VG	B/G	B/F	B/P	B/VP
	VERY BLOCKY-interlocked partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	70 VB/VG	VB/G	VB/F	VB/P	VB/VP
	BLOCKY/DISTURBED-folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets	60 BD/VG	BD/G	BD/F	BD/P	BD/VP
	DISINTEGRATED-poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces	50 D/VG	D/G	D/F	D/P	D/VP
	FOLIATED/LAMINATED/SHEARED-Thinly laminated or foliated and tectonically sheared weak rocks. Closely spaced schistosity prevails over other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness	40 N/A	N/A	FLS/F	FLS/P	FLS/MP
		30				
		20				
		10				

شکل ۳-۲ آخرین ویرایش جدول سیستم طبقه‌بندی GSI در سال ۱۹۹۹ (Hoek, 1999 a)

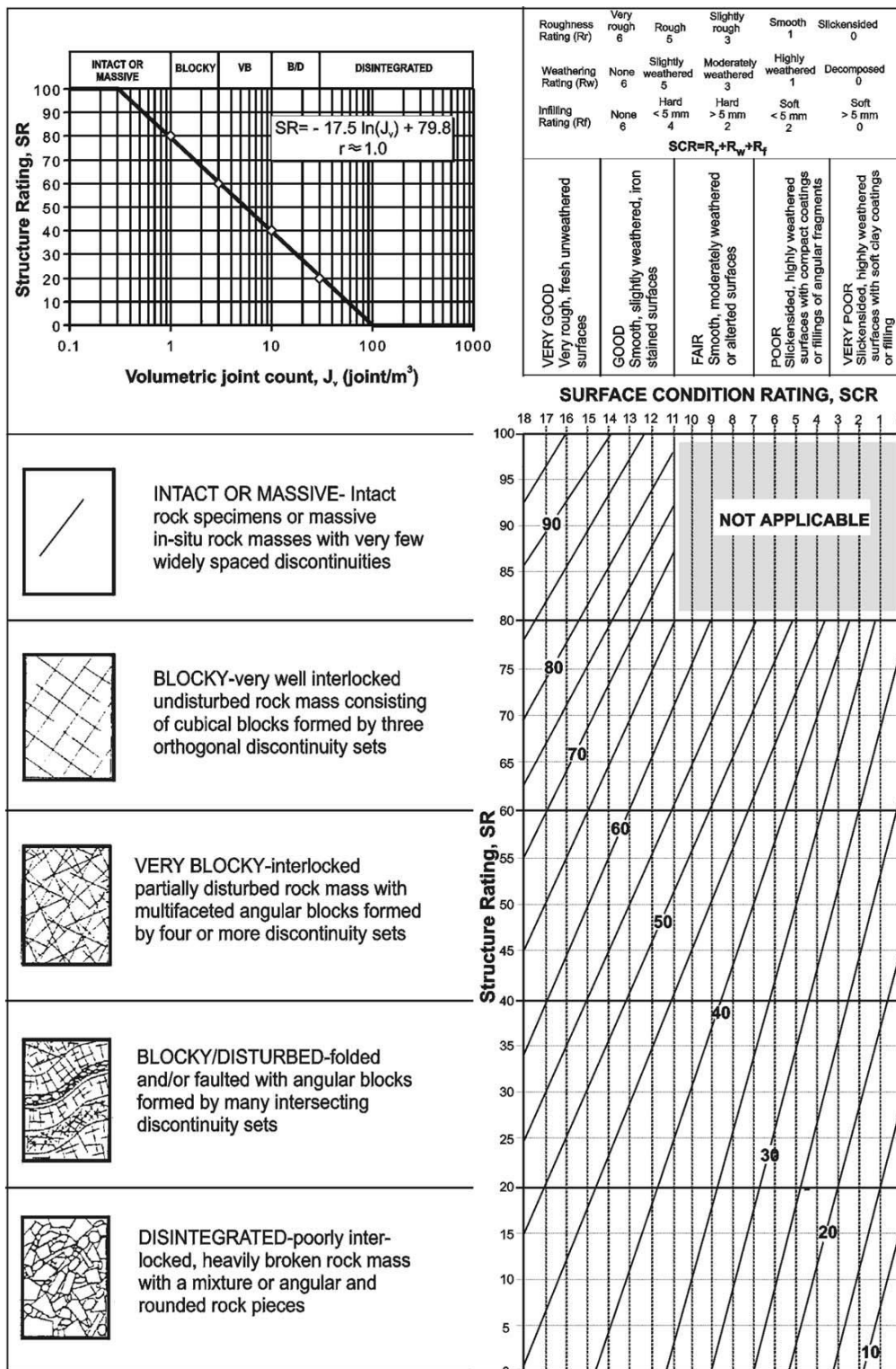
جدول GSI که در شکل ۳-۲ ارائه شد ابزار سودمندی را برای مطالعه توده‌سنگ‌ها در اختیار مهندسين قرار می‌دهد. با این حال همانگونه در این شکل مشاهده می‌شود مقدار GSI متناظر با هر گروه، به صورت بازه برآورد می‌شود. برای نمونه مقدار GSI در یک سنگ بلوکی، با وضعیت سطح ناپیوستگی خوب (B/G)، در بازه ۵۵ تا ۷۵ قرار دارد. به این ترتیب به هنگام کاربرد جدول GSI و تعیین گروه مناسب متناظر با توده‌سنگ توسط افراد کم تجربه، این سوال مطرح است که کدام مقدار GSI بایستی جهت طراحی مدنظر قرار گیرد؟ با در نظر گرفتن این موضوع، تلاشی از جانب سونماز و اولوسای (Sonmez, 1999) در جهت تهیه یک مآخذ کمی و عددی برای ارزیابی و محاسبه GSI صورت گرفت. به این منظور با حفظ استخوان بندی اصلی سیستم GSI، پارامترها و امتیازهای جدیدی نظیر امتحان مربوط به ساختار توده‌سنگ (SR) و امتیاز مربوط به شرایط سطح ناپیوستگی (SCR) معرفی شد. مقادیر SR و SCR از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$SR = -17.5 \ln(J_v) + 79.8 \quad (۱۷-۳)$$

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (۱۸-۳)$$

که در آن J_v تعداد ناپیوستگی‌ها در واحد حجم و مقادیر R_r , R_w , R_f با استفاده از پارامترهای ورودی سیستم طبقه‌بندی RMR از قبیل هوازدگی، زبری و پرشدگی قابل محاسبه هستند که نحوه امتیاز دهی آن‌ها در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.

به علت ناهمگنی توده‌سنگ‌های با ساختار ورقه‌ای، این گروه از توده‌سنگ‌ها، در جدول جدید امتیاز دهی GSI منظور نشده است (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳ سیستم GSI کمی پیشنهاد شده توسط سونماز و اولوسای (Sonmez, 1999)

با توجه به توضیحات داده شده در بالا و محاسبه کردن مقادیر SR و SCR مجدداً GSI برای سه

محدوده مورد نظر محاسبه گردید (جدول ۳-۲۴).

جدول ۳-۲۴ محاسبه GSI با استفاده از سیستم ارائه شده توسط سونمازو اولوسای

CZ	LM-2	LM-1	
۳	۵	۵	R_r
۵	۵	۵	R_w
۴	۴	۴	R_f
۱۲	۱۴	۱۴	SCR
۲۵	۱۰	۱۰	J_v
۲۳/۵	۴۰	۴۰	SR
۳۵-۴۰	۶۳-۵۳	۶۳-۵۳	GSI

۳-۸-۲- استفاده از GSI در تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ

امروزه جهت ایجاد هرگونه سازه سطحی یا زیرزمینی، دانستن وضعیت زمین‌شناسی منطقه و پارامترهای ژئومکانیکی واقعی توده سنگ، امری بدیهی بنظر می‌رسد. مسلماً با دانستن این اطلاعات است که می‌توان سازه‌ای را به درستی طراحی و اجرا نمود. Roclab نرم افزاری جهت تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ می‌باشد که بر اساس آخرین اصلاحات انجام شده در خصوص معیار شکست هوک- براون تهیه و در سال ۲۰۰۲ منتشر شده است. این نرم افزار از قابلیت‌های بسیار بالایی برخوردار است به طوری که پس از مشخص نمودن نوع سازه در نرم افزار و با تعیین مقادیر مقاومت فشاری تک محوری سنگ سالم، اندیس مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، پارامتر ثابت سنگ (m_i) و فاکتور اختلال (D) سنگ اطراف سازه مورد نظر، می‌توان پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ نظیر مقاومت کششی و فشاری، مدول تغییر شکل، زاویه اصطکاک داخلی، نیروی چسبندگی و ثابت‌های معیار شکست هوک- براون به همراه منحنی‌های پوش معیار شکست هوک- براون و موهر- کلمب را به طور همزمان دریافت نمود.

معیار شکست هوک- براون برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ معرفی شد. در طی سال‌های بعد نیز این دو نفر اصلاحاتی بر معیار شکست خود ارائه نمودند. آخرین اصلاحیه این معیار شکست در سال ۲۰۰۲ در نشست بین‌المللی مکانیک سنگ کانادا توسط هوک و همکارانش ارائه شد. بر این اساس شکل کلی معادله در توده‌سنگ مطابق رابطه ۱۹-۳ تعریف شد:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + S \right)^a \quad (19-3)$$

در این رابطه a ، S و m_b بسته به کیفیت سنگ تغییر کرده و از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (20-3)$$

$$S = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (21-3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (22-3)$$

۳-۸-۲-۱- معرفی نرم افزار Roclab

این نرم افزار برای تعیین پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ با استفاده از معیار شکست هوک-براون، در سال ۲۰۰۲ طراحی شده است.

اطلاعات ورودی این نرم افزار شامل موارد زیر است (RocScience Group, 2002):

- γ (وزن مخصوص توده‌سنگ)
- σ_{ci} (مقاومت تراکمی تک محوره سنگ سالم)

- GSI (اندیس مقاومت زمین‌شناسی)

- m_i (پارامتر ثابت سنگ)

- D (فاکتور اختلال)

در صورت مشخص بودن مقادیر هر کدام از پارامترهای بالا، این مقادیر به طور مستقیم وارد نرم افزار می‌شوند، در غیر اینصورت با استفاده از جداول و نمودارهای مختلفی که در داخل نرم افزار تعبیه شده است می‌توان این مقادیر را مشخص نمود. پس از وارد نمودن اطلاعات می‌توانید بلافاصله پارامترهای خروجی را مشاهده کنید. در حالت کلی خروجی این برنامه می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- σ_t (مقاومت کششی)

- σ_c (مقاومت فشاری تک محوره)

- σ_{cm} (مقاومت فشاری تک محوره عمومی)

- E_m (مدول تغییر شکل)

- C (چسبندگی)

- φ (زاویه اصطکاک داخلی)

- ثابت‌های معیار شکست هوک-براون (s, a, m_b)

- ترسیم منحنی‌های پوش معیار شکست هوک-براون در تنش‌های نرمال و اصلی

- ترسیم منحنی‌های پوش معیار شکست موهر-کلمب در تنش‌های نرمال و اصلی

برای تعیین پارامترهای توده‌سنگ در سه زون موجود در محدود تونل ایمان از نرم افزار Roclab

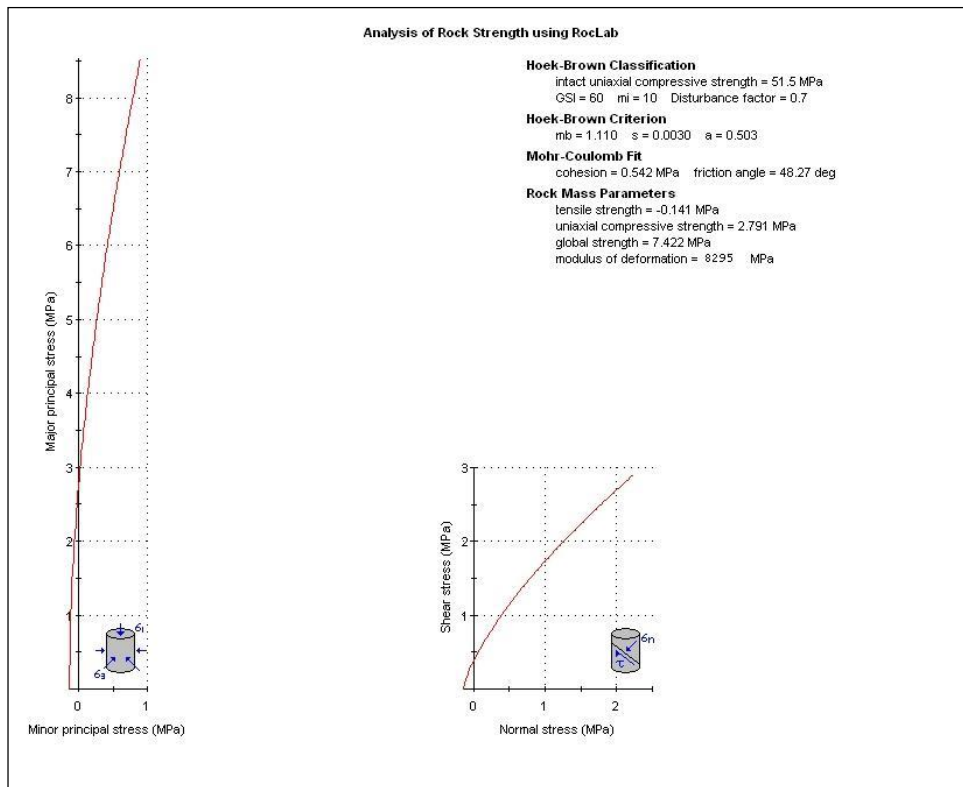
استفاده شد که ورودی‌ها و خروجی‌های نرم افزار به ترتیب در جداول ۲۵-۳ و ۲۶-۳ و اشکال ۴-۳ و ۵-۳ آمده است.

جدول ۲۵-۳ پارامترهای ورودی نرم افزار Roclab برای واحدهای مختلف تونل ایمان

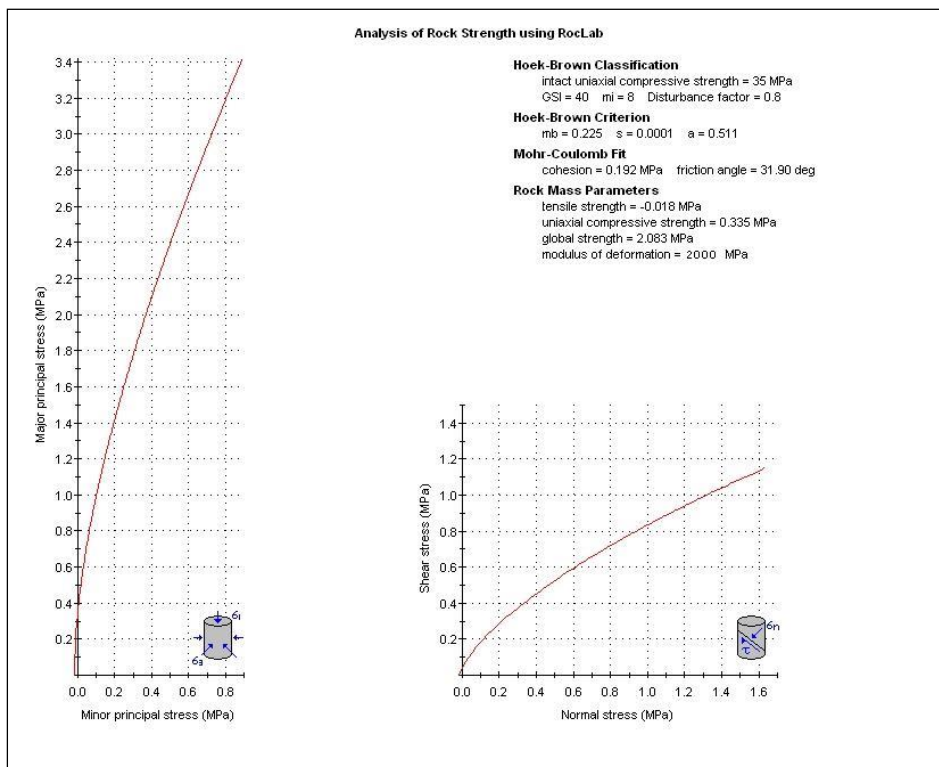
عمق تونل	D	m_i	GSI	$\sigma_{ci}(MPa)$	$\gamma(MN/m^3)$	زون
۶۵	۰/۷	۱۰	۶۰	۵۱/۵	۰/۰۲۷	LM-1
۶۵	۰/۷	۱۰	۶۰	۵۱/۵	۰/۰۲۷	LM-2
۷۰	۰/۸	۸	۴۰	۳۵	۰/۰۲۷	CZ

جدول ۲۶-۳ پارامترهای خروجی نرم افزار Roclab برای واحدهای مختلف تونل ایمان

m_b	s	a	φ (درجه)	C(MPa)	$E_m(GPa)$	$\sigma_{cm}(MPa)$	$\sigma_c(MPa)$	$\sigma_t(MPa)$	زون
۱/۱۱	۰/۰۰۳	۰/۵۰۳	۴۸/۲۷	۰/۵۴۲	۸/۲۹۵	۷/۴۲۲	۲/۷۹۱	-۰/۱۴۱	LM-1
۱/۱۱	۰/۰۰۳	۰/۵۰۳	۴۸/۲۷	۰/۵۴۲	۸/۲۹۵	۷/۴۲۲	۲/۷۹۱	-۰/۱۴۱	LM-2
۰/۲۲۵	۰/۰۰۰۱	۰/۵۱۱	۳۱/۹	۰/۱۹۲	۲	۲/۰۸۳	۰/۳۳۵	-۰/۰۱۸	CZ



شکل ۳-۴ نمودارها و نتایج حاصل از نرم افزار Roclab در واحدهای LM-1, LM-2



شکل ۳-۵ نمودارها و نتایج حاصل از نرم افزار Roclab در واحد CZ

برای محاسبه مدول برشی و مدول حجمی توده سنگ در واحدهای مختلف زمین‌شناسی از روابط ۳-۳-

۲۳ و ۲۴-۳ استفاده شد که نتایج آن در جدول ۳-۲۷ آمده است.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (23-3)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (24-3)$$

که در آن:

G: مدول برشی توده سنگ

K: مدول حجمی توده سنگ

E: مدول الاستیسیته توده سنگ

ν : ضریب پواسون

جدول ۳-۲۷ محاسبه مدول حجمی و برشی واحدهای مختلف تونل ایمان

مدول برشی GPa	مدول حجمی GPa	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته GPa	زون
۳/۱۹	۶/۹۱۲۵	۰/۳	۸/۲۹۵	LM-1
۳/۱۹	۶/۹۱۲۵	۰/۳	۸/۲۹۵	LM-2
۰/۷۶۹	۱/۶۷	۰/۳	۲	CZ

۳-۹- نتیجه گیری

در این فصل بمنظور طراحی سیستم نگهداری موقت تونل ایمان از روش‌های تجربی کمک گرفته شده است. روش‌های تجربی در واقع برپایه تجربیات گذشته بنا نهاده شده‌اند. در واقع افراد مختلف با تلاش‌های فراوان و با جمع‌آوری اطلاعات مربوط به صدها پروژه عمرانی و معدنی در جهان توانسته‌اند جداولی را در اختیار مهندسان قرار دهند تا بدینوسیله افراد بتوانند در ابتدای کار طراحی تونل و با حداقل اطلاعات موجود از شرایط توده‌سنگ، یک برآورد نسبتاً خوبی از سیستم نگهداری تونل ارائه دهند. از مهمترین سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌توان به RSR، RQD، RMR و Q اشاره کرد.

با توجه به توضیحات داده شده در بالا سیستم نگهداری تونل‌های ایمان در سه زون شناخته شده با استفاده از روش‌های تجربی تعیین شد که نتایج آن بصورت خلاصه در جدول ۳-۲۸ آمده است.

جدول ۳-۲۸ سیستم نگهداری پیشنهادی برای تونل‌های ایمان با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ

سیستم	زون	Lm-1		Lm-2		CZ
		پنج سنگ	شاتکریت	پنج سنگ	شاتکریت	
RQD	۰/۶ تا ۱/۲۲ متر	برطبق نقشه با فاصله	۱۵ سانتیمتر یا بیشتر روی تاج و دیواره‌ها	برطبق نقشه با فاصله	۱۵ سانتیمتر یا بیشتر روی تاج و دیواره‌ها	برطبق نقشه با فاصله ۰/۶ تا ۱/۲۲ متر
		پنج‌سنگ‌های به قطر ۲/۵ سانتیمتر و به فاصله ۱/۸ متر از هم	شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر	پنج‌سنگ‌های به قطر ۲/۵ سانتیمتر و به فاصله ۲ متر از هم	شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر	پنج‌سنگ‌های به قطر ۲/۵ سانتیمتر و به فاصله ۰/۷۵ متر از هم
		شیکه منظم پنج‌سنگ به طول ۴ متر با فاصله ۱/۵ تا ۲ متر در سقف و دیواره	۱۰۰ تا ۵۰ میلیمتر در سقف و ۳۰ میلیمتر در دیواره	موضعی، پنج‌سنگ به طول ۳ متر با فاصله ۲/۵ متر و گاهی همراه با تور سیمی	۵۰ میلیمتر در سقف اگر نیاز باشد	پنج‌سنگ‌ها به طول ۴ تا ۵ متر با فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در سقف و دیواره‌ها همراه با تور سیمی
		پنج‌سنگ‌های ۴/۵ متری به فاصله ۲/۱ تا ۲/۳ متر	شاتکریت به ضخامت ۱۰۰-۴۰ میلیمتر	پنج‌سنگ‌های ۴/۵ تا ۲/۱ متری به فاصله ۲/۱ تا ۲/۳ متر	شاتکریت به ضخامت ۱۰۰-۴۰ میلیمتر	پنج‌سنگ‌ها ۴/۵ متری به فاصله ۱/۵ تا ۱/۷ متر
RSR	فاصله ۱/۸ متر از هم	شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر	شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر	پنج‌سنگ‌های به قطر ۲/۵ سانتیمتر و به فاصله ۲ متر از هم	شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر	پنج‌سنگ‌های به قطر ۲/۵ سانتیمتر و به فاصله ۰/۷۵ متر از هم
		شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر	شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر	پنج‌سنگ‌های به قطر ۲/۵ سانتیمتر و به فاصله ۲ متر از هم	شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر	پنج‌سنگ‌های به قطر ۲/۵ سانتیمتر و به فاصله ۰/۷۵ متر از هم
RMR	شیکه منظم پنج‌سنگ به طول ۴ متر با فاصله ۱/۵ تا ۲ متر در سقف و دیواره	۱۰۰ تا ۵۰ میلیمتر در سقف و ۳۰ میلیمتر در دیواره	موضعی، پنج‌سنگ به طول ۳ متر با فاصله ۲/۵ متر و گاهی همراه با تور سیمی	۵۰ میلیمتر در سقف اگر نیاز باشد	پنج‌سنگ‌ها به طول ۴ تا ۵ متر با فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در سقف و دیواره‌ها همراه با تور سیمی	پنج‌سنگ‌های به قطر ۲/۵ سانتیمتر و به فاصله ۰/۷۵ متر از هم
		۱۰۰ تا ۵۰ میلیمتر در سقف و ۳۰ میلیمتر در دیواره	موضعی، پنج‌سنگ به طول ۳ متر با فاصله ۲/۵ متر و گاهی همراه با تور سیمی	۵۰ میلیمتر در سقف اگر نیاز باشد	پنج‌سنگ‌ها به طول ۴ تا ۵ متر با فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در سقف و دیواره‌ها همراه با تور سیمی	پنج‌سنگ‌های به قطر ۲/۵ سانتیمتر و به فاصله ۰/۷۵ متر از هم
Q	پنج‌سنگ‌های ۴/۵ متری به فاصله ۲/۱ تا ۲/۳ متر	شاتکریت به ضخامت ۱۰۰-۴۰ میلیمتر	شاتکریت به ضخامت ۱۰۰-۴۰ میلیمتر	پنج‌سنگ‌های ۴/۵ تا ۲/۱ متری به فاصله ۲/۱ تا ۲/۳ متر	شاتکریت به ضخامت ۱۰۰-۴۰ میلیمتر	پنج‌سنگ‌های ۴/۵ متری به فاصله ۱/۵ تا ۱/۷ متر
		شاتکریت به ضخامت ۱۰۰-۴۰ میلیمتر	شاتکریت به ضخامت ۱۰۰-۴۰ میلیمتر	پنج‌سنگ‌های ۴/۵ تا ۲/۱ متری به فاصله ۲/۱ تا ۲/۳ متر	شاتکریت به ضخامت ۱۰۰-۴۰ میلیمتر	پنج‌سنگ‌های ۴/۵ متری به فاصله ۱/۵ تا ۱/۷ متر

	شاتکریت	۱۵ سانتیمتر یا بیشتر روی تاج و دیواره‌ها	شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر	۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیمتر در سقف و ۱۰۰ میلیمتر در دیواره	شاتکریت مسلح به ضخامت ۹۰ تا ۱۲۰ میلیمتر
	قاب فولادی	قاب های فولادی به فاصله ۲ تا ۴ فوت از یکدیگر	قاب‌های فولادی 8WF31 (تیر آهن‌های بال پهن با مقطع I عرض ۸ اینچ و وزن ۳۱ پوند در هر فوت) به فاصله ۵ فوت از یکدیگر	کم تا متوسط با فاصله ۱/۵ متر در صورت نیاز	---

۴-۱- مقدمه

تحلیل اندرکنش حائل - سنگ مسئله‌ای مشکل و از نظر تئوری پیچیده است که این امر بعثت شمار زیاد عواملی است که باید در ارائه و استخراج راه حلی جامع و روشن در نظر گرفت. تعدادی مفروضات ساده کننده باید منظور شود تا این مسئله پیچیده را تا حدودی قابل حل نماید و این مفروضات در اینجا به اجمال مورد بحث قرار خواهند گرفت. روشی که در زیر ارائه می‌شود بر اساس مقاله‌ای است که توسط Ladanyi منتشر شده است (Ladanyi, 1974).

۴-۲- مفروضات اساسی

- هندسه تونل: در این تحلیل فرض می‌شود تونل با مقطع دایره به شعاع اولیه r_i است. طول تونل به گونه‌ای است که مسئله را می‌توان بصورت دوبعدی در نظر گرفت.
- میدان تنش درجا: تنش‌های افقی و قائم برجا، فرض می‌شود با یکدیگر برابر بوده و معادل P_0 است.
- فشار سیستم نگهداری: فرض می‌شود سیستم نگهداری نصب شده، فشار P_i را بصورت شعاعی و یکنواخت به دیواره‌ها و جدار تونل اعمال می‌کند.

- خصوصیات ماده سنگی در توده سنگ: توده سنگ فرض می شود الاستیک خطی بوده و توسط مدول یانگ و ضریب پواسون مشخص می شود. خصوصیات خرابی و شکست این ماده سنگی توسط رابطه زیر تعریف می شود (مدنی، ۱۳۸۱):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1-4)$$

- خصوصیات توده سنگ شکسته: توده سنگ شکسته ای که تونل را در بر گرفته است فرض می شود پلاستیک کامل بوده و معیار شکست زیر را اقلان می کند.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_r\sigma_c\sigma_3 + s_r\sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2-4)$$

- توجه کنید که بمنظور ساده سازی، فرض می شود که مقاومت از مقدار تعریف شده در معادله ۱ به مقدار تعریف شده در معادله ۲ بطور ناگهانی کاهش می یابد. Daemen در تحلیل های خود بخش مربوط به رفتار کرنشی بعد از نقطه اوج را نیز در نظر گرفته اند (Daemen, 1977).

- کرنش های حجمی: در منطقه الاستیک کرنش های حجمی توسط مدول الاستیسیته و ضریب پواسون مشخص می شوند. در لحظه خرابی و شکست کامل، سنگ اتساع (افزایش در حجم) خواهد یافت و کرنش های حجمی با استفاده از قانون جریان مرتبط در تئوری پلاستیسیته محاسبه می شوند.
- رفتار تابع زمان: فرض می شود که توده سنگ اصلی و شکسته هیچ کدام رفتار تابع زمان از خود نشان نمی دهند.

- توسعه منطقه پلاستیک: فرض می‌شود که منطقه پلاستیک تا شعاع r_e توسعه می‌یابد که بستگی به فشار برجای P_0 ، فشار حائل P_i و خصوصیات مصالح سنگی و پلاستیک دارد.
- تقارن شعاعی: توجه داشته باشید که در تمام این بحث‌ها مسئله بصورت متقارن حول محور تونل تحلیل می‌شود. اگر وزن سنگ در منطقه شکسته در تحلیل منظور شود، این تقارن ساده کننده از بین خواهد رفت. از آنجائیکه وزن سنگ شکسته در طرح حائل فوق العاده مهم است. اثر وزن بطور تقریب بعد از اتمام تحلیل اصلی اضافه خواهد شد.

۳-۴- تحلیل تنش‌ها

در حالت تقارن استوانه‌ای، معادله دیفرانسیل تعادل بصورت زیر می‌باشد (هوک و براون، ۱۳۷۶):

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = 0 \quad (۳-۴)$$

با اقناع این معادله برای رفتار الاستیک خطی و با شرایط مرزی $\sigma_r = \sigma_{re}$ در $r = r_e$ و $\sigma_r = P_0$ در

$r = \infty$ ، معادلات زیر برای تنش در منطقه الاستیک بدست می‌آیند:

$$\sigma_r = P_0 - (P_0 - \sigma_{re}) \left(\frac{r_e}{r} \right)^2 \quad (۴-۴)$$

$$\sigma_\theta = P_0 + (P_0 - \sigma_{re}) \left(\frac{r_e}{r} \right)^2 \quad (۵-۴)$$

در داخل منطقه شکسته، معیار شکست که توسط رابطه ۲-۴ تعریف شد باید اقناع شود. با توجه به

این امر، در این مسئله $\sigma_\theta = \sigma_1$ و $\sigma_r = \sigma_3$ بوده و معادله ۲-۴ را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\sigma_\theta = \sigma_r + (m_r \sigma_c \sigma_r + s_r \sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (۶-۴)$$

با انتگرال گرفتن از معادله ۳-۴ و قرار دادن شرایط مرزی $\sigma_r = P_i$ در $r = r_e$ معادله زیر برای تنش

شعاعی در منطقه شکسته بدست می‌آید:

$$\sigma_r = \frac{m_r \sigma_c}{4} \left[\ln \left(\frac{r}{r_i} \right) \right]^2 + \ln \left(\frac{r}{r_i} \right) (m_r \sigma_c P_i + s_r \sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} + P_i \quad (7-4)$$

برای اینکه مقدار σ_{re} و شعاع r_e مربوط به منطقه شکسته پیدا شوند، به این ترتیب عمل می‌شود

که معیار خرابی و شکست توده‌سنگ اصلی باید در مرز داخلی منطقه الاستیک اقماع شود (یعنی در $r = r_e$)

).

با توجه به معادلات ۴-۴ و ۵-۴ تفاضل تنش‌های اصلی مطابق معادله زیر تعیین می‌شود:

$$\sigma_{\theta e} - \sigma_{re} = 2(P_0 - \sigma_{re}) \quad (8-4)$$

معیار خرابی و شکست سنگ برای توده‌سنگ اصلی از معادله ۴-۱ بدست می‌آید که می‌توان بصورت

زیر بازنویسی کرد:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_c \left(\frac{m \sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9-4)$$

با قرار دادن $\sigma_1 = \sigma_{\theta e}$ و $\sigma_3 = \sigma_{re}$ در معادله ۴-۹ و سپس مساوی قرار دادن طرف‌های راست

معادلات ۴-۸ و ۴-۹ معادله زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_{re} = P_0 - M \sigma_c \quad (10-4)$$

که در این معادله:

$$M = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m}{4} \right)^2 + \frac{m P_0}{\sigma_c} + s \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{m}{8} \quad (11-4)$$

معیار خرابی برای سنگ شکسته نیز باید در $r = r_e$ اقلان شود و بنابراین از معادله ۷-۴ خواهیم

داشت:

$$\sigma_{re} = \frac{m_r \sigma_c}{4} \left[\ln \left(\frac{r_e}{r_i} \right) \right]^2 + \ln \left(\frac{r_e}{r_i} \right) (m_r \sigma_c P_i + s_r \sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} + P_i \quad (12-4)$$

با مساوی قرار دادن مقادیر σ_{re} از معادلات ۱۰-۴ و ۱۲-۴ معادله زیر برای شعاع منطقه پلاستیک

بدست می‌آید:

$$r_e = r_i \cdot e^{\left[N - \frac{2(m_r \sigma_c P_i + s_r \sigma_c^2)^{\frac{1}{2}}}{m_r \sigma_c} \right]} \quad (13-4)$$

که در آن :

$$N = \frac{2}{m_r \sigma_c} (m_r \sigma_c P_0 + s_r \sigma_c^2 - m_r \sigma_c^2 M)^{\frac{1}{2}} \quad (14-4)$$

از معادله ۱۰ مشاهده می‌شود که منطقه سنگ شکسته فقط وقتی وجود خواهد داشت که فشار

داخلی حائل (P_i) کمتر از مقدار بحرانی که توسط معادله زیر بدست می‌آید، باشد:

$$P_i < P_{icr} = P_0 - M \sigma_c \quad (15-4)$$

۴-۴- تحلیل تغییر شکل‌ها

تغییر مکان شعاعی در مرز الاستیک (u_e) که در اثر کاهش σ_r از مقدار اولیه خود یعنی P_0 به

σ_{re} ایجاد می‌شود را می‌توان با استفاده از تئوری الاستیسیته بدست آورد (هوک و براون، ۱۳۷۶):

$$u_e = \frac{(1+\nu)}{E} (P_0 - \sigma_{re}) r_e \quad (16-4)$$

یا با استفاده از معادله ۱۰-۴ :

$$u_e = \frac{(1+\nu)}{E} M \sigma_c r_e \quad (17-4)$$

فرض کنیم، e_{av} متوسط کرنش حجمی پلاستیک باشد (کاهش حجم مثبت فرض می‌شود) که مربوط به عبور سنگ از حالت اولیه به حالت شکسته است. با مقایسه حجم منطقه شکسته قبل و بعد از تشکیل آن رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\pi(r_e^2 - r_i^2) = \pi[(r_e + u_e)^2 - (r_i + u_i)^2](1 - e_{av}) \quad (18-4)$$

که بعد از ساده کردن آن خواهیم داشت:

$$u_i = r_{io} \left[1 - \left(\frac{1 - e_{av}}{1 + A} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (19-4)$$

که در آن:

$$A = \left(\frac{2u_e}{r_e} - e_{av} \right) \left(\frac{r_e}{r_i} \right)^2 \quad (20-4)$$

با قرار دادن $\frac{u_e}{r_e}$ و $\frac{r_e}{r_i}$ در معادلات ۱۳-۴ و ۱۷-۴ خواهیم داشت:

$$A = \left[\frac{2(1+\nu)}{E} M\sigma_c - e_{av} \right] e^{\frac{2N-4}{m_r\sigma_c} (m_r\sigma_c P_i + S_r\sigma_c^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (21-4)$$

استخراج عبارت مربوط به e_{av} خارج از حوزه این فصل است لیکن می توان از معادله Ladanyi استفاده کرد.

$$e_{av} = \frac{2 \left(\frac{u_e}{r_e} \right) \left(\frac{r_e}{r_i} \right)^2}{\left[\left(\frac{r_e}{r_i} \right)^2 - 1 \right] \left[1 + \frac{1}{R} \right]} \quad (22-4)$$

مقدار R بستگی به ضخامت منطقه شکسته دارد. برای منطقه شکسته نسبتاً ضخیم که توسط

$$\frac{r_e}{r_i} < \sqrt{3} \quad \text{تعریف می شود:}$$

$$R = 2D \ln \frac{r_e}{r_i} \quad (23-4)$$

برای منطقه شکست نازک که در آن $\frac{r_e}{r_i} > \sqrt{3}$ است:

$$R = 1.1 D \quad (24-4)$$

که در آن :

$$D = \frac{-m}{m + 4 \left(\frac{m\sigma_{re}}{\sigma_c} + s \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (25-4)$$

۴-۵- معادله خط حائل مورد نیاز

برای $P_{icr} < P_i < P_0$ ، پاسخ توده سنگ الاستیک است و معادله خط حائل مورد نیاز از رابطه زیر

بدست می آید (هوک و براون، ۱۳۷۶):

$$\frac{u_i}{r_{i0}} = \frac{(1+\nu)}{E}(P_0 - P_i) \quad (26-4)$$

برای $P_{icr} > P_i$ ، منطقه شکسته وجود خواهد داشت و معادله خط حائل مورد نیاز توسط رابطه ۴-۴-

۱۹ بدست می‌آید.

۴-۶- در نظر گرفتن بار مرده ناشی از سنگ شکسته

خط حائل مورد نیاز که توسط معادلات ۴-۱۹ و ۴-۲۶ تعریف شد را می‌توان برای نمایش رفتار

دیواره‌های تونل در نظر گرفت، زیرا تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در این مناطق بعلت بار مرده ناشی از سنگ

شکسته اطراف تونل چندان تحت تاثیر قرار نمی‌گیرند. برای اینکه وزن مرده سنگ شکسته در طاق و در کف

تونل در نظر گرفته شود، فشار حائل (P_i) را می‌توان به میزان $\gamma_r(r_e - r_i)$ کم یا زیاد نمود (γ_r وزن

مخصوص سنگ شکسته است). این تصحیح فقط بعد از اینکه خط حائل مورد نیاز برای شرایط بدون وزن

توسط معادلات ۴-۱۹ و ۴-۲۶ محاسبه گردید، انجام می‌شود.

این تصحیح باید بعنوان ساده سازی کلی و خام مورد نظر قرار گیرد. در عین حال در قالب تحلیل

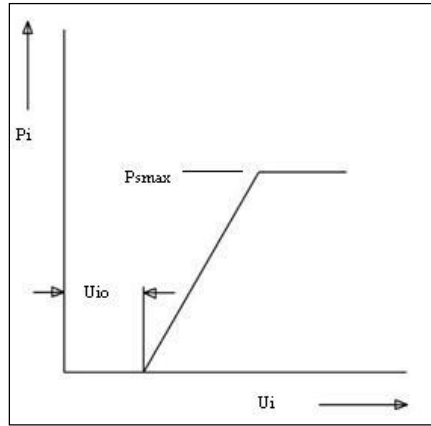
فوق این روش ساده سازی تخمین معقول و منطقی از اثر وزن بار مرده سنگ شکسته ارائه می‌دهد (مدنی،

۱۳۸۱).

۴-۷- تحلیل حائل موجود

حائل و نگهدارنده معمولاً بعد از وقوع میزان معینی همگرایی در تونل نصب می‌گردد. این همگرایی

اولیه که با u_{i0} نمایش داده می‌شود در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱ همگرایی اولیه در سازه قبل از نصب سیستم نگهداری (هوک و براون، ۱۳۷۶)

سختی حائل نصب شده در داخل تونل توسط سختی ثابت (K) مشخص می‌گردد. برای محاسبه فشار شعاعی حائل (P_i) که توسط حائل و نگهدارنده ایجاد می‌شود از رابطه ۴-۲۷ استفاده می‌شود (هوک و براون، ۱۳۷۶):

$$P_i = \frac{K \cdot u_{ie}}{r_i} \quad (۴-۲۷)$$

که u_{ie} عبارت از قسمت مربوط به تغییر شکل الاستیک از کل تغییر شکل (u_i) است. بنابراین:

$$u_i = u_{i_0} + \frac{P_i r_i}{k} \quad (۴-۲۸)$$

معادله ۴-۲۸ تا نقطه‌ای بکار می‌رود که در آن نقطه مقاومت سیستم حائل به حد نهایی خود می‌رسد. در مورد پوشش بتنی یا شاتکریت، مجموعه‌های فولادی یا پیچ‌سنگ‌های تزریقی یا کابل‌ها، فرض می‌شود که خرابی و شکست پلاستیک سیستم حائل در این نقطه رخ می‌دهد. حداکثر فشار حائل توسط P_{smax} تعریف می‌شود.

در مورد پیچ‌سنگ‌های تزریق نشده یا مهارهای مکانیکی، شکست ناگهانی سیستم پیچ‌سنگ، وقتی که حداکثر فشار حائل از $P_{s\max}$ تجاوز کند، می‌تواند اتفاق بیافتد. از وقوع چنین وضعیتی باید اجتناب کرد زیرا می‌تواند تبعات پیش‌بینی نشده در پی داشته باشد.

۴-۷-۱- حائل موجود برای پوشش بتنی یا شاتکریت

پوشش بتنی بصورت بتن درجا با قالب بندی اجرا می‌شود و یا بصورت شاتکریت به ضخامت t_c در تونل به شعاع r_i پاشیده می‌شود. فشار حائلی که توسط این پوشش در پاسخ به همگرایی تونل ایجاد می‌شود توسط معادله ۴-۲۷ بدست می‌آید که در آن مقدار K را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود (مدنی، ۱۳۸۱):

$$K_c = \frac{E_c[r_i^2 - (r_i - t_c)^2]}{(1 + \nu_c)[(1 - 2\nu_c)r_i^2 + (r_i - t_c)^2]} \quad (۴-۲۹)$$

که در آن:

E_c مدول الاستیسیته بتن

ν_c ضریب پواسون بتن

r_i شعاع تونل

t_c ضخامت بتن یا شاتکریت

توجه داشته باشید که تاثیر مسلح کننده‌های سبک در محاسبات سختی مربوط به پوشش در نظر گرفته نشده است. استفاده از مسلح کننده‌هایی مثل تور سیمی در شاتکریت یا آرماتورهای نازک در بتن نقش خیلی مهم در کنترل و توزیع تنش‌ها و ترک‌ها در پوشش ایفا می‌کنند. لیکن در افزایش سختی چندان تاثیر ندارد. چنانچه از مسلح کننده‌های سنگین در پوشش استفاده شود، مثلاً وقتی که بتن روی شبکه

آرما توربندی شده اجرا می‌شود، اثر هر دو سیستم باید در نظر گرفته شود. پاسخ و عملکرد سیستم‌های مرکب بعداً در این فصل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

حداکثر فشار حائلی که توسط پوشش بتنی یا شاتکریت ایجاد می‌شود را می‌توان با استفاده از رابطه

زیر محاسبه نمود:

$$P_{S\max} = \frac{1}{2} \sigma_{c.conc} \left[1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] \quad (30-4)$$

که $\sigma_{c.conc}$ مقاومت فشاری تک محوره بتن یا شاتکریت است. باید متذکر شد که معادله 30-4

فقط زمانی بکار می‌رود که پوشش دایره‌ای بوده و مقدار شکستگی محدود باشد.

4-7-2- حائل موجود برای مجموعه‌های فولادی

سختی یک مجموعه فولادی توسط رابطه زیر تعریف می‌شود (هوک و براون، 1376):

$$\frac{1}{K_s} = \frac{S.r_i}{E_s A_s} + \frac{S.r_i^3}{E_s I_s} \left[\frac{\theta(\theta + \sin\theta \cos\theta)}{2\sin^2\theta} - 1 \right] + \frac{2S.\theta.t_B}{E_B W^2} \quad (31-4)$$

که در آن:

r_i شعاع تونل

S فاصله‌داری مجموعه فولادی در امتداد طول تونل

θ نصف زاویه بین نقاط بلوک گذاری شده (برحسب رادیان)

W عرض بال مجموعه فولادی

A_s سطح مقطع عرضی مقاطع فولادی

I_s ممان اینرسی مقاطع فولادی

E_s مدول یانگ فولاد

t_B ضخامت بلوک

E_B مدول الاستیسیته مواد بلوکها

بلوکها فرض می‌شود در پلان مربع بوده و طول کناری آنها برابر با W ، عرض بال مجموعه فولادی

است. حداکثر فشار حائل که توسط مجموعه فولادی می‌تواند ایجاد شود از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_{SSmax} = \frac{3A_s I_s \sigma_{ys}}{2S r_i \theta \left[3I_s + X A_s \left[r_i - \left(t_p + \frac{1}{2} X \right) \right] (1 - \cos \theta) \right]} \quad (۳۲-۴)$$

که در آن:

σ_{ys} مقاومت تسلیم فولاد

X عمق مقطع فولادی

۴-۷-۳- حائل موجود برای پیچ‌سنگ‌های غیرتزیقی

حائل موجود برای پیچ‌سنگ غیرتزیقی که بصورت مکانیکی یا شیمیایی مهار شده است بستگی به

خصوصیات تغییر شکل پذیری مهار، واشر و مهره، راس پیچ‌سنگ و میله پیچ‌سنگ دارد.

K_b ، سختی پیچ‌سنگ غیرتزیقی با مهاری مکانیکی یا شیمیایی توسط رابطه ۴-۳۳ بدست می‌آید:

$$\frac{1}{k_b} = \frac{S_c S_l}{r_i} \left[\frac{4l}{\pi d_b^2 E_b} + Q \right] \quad (33-4)$$

که در آن :

l طول آزاد پیچ‌سنگ بین مهراری و رأس

d_b قطر پیچ‌سنگ

E_b مدول یانگ مواد پیچ‌سنگ

T_b مقدار بار در پیچ‌سنگ

S_c فاصله‌داری محیطی پیچ‌سنگ‌ها

S_L فاصله‌داری طولی پیچ‌سنگ‌ها

Q مقداری است که به خصوصیات بار- تغییر شکل مهراری، صفحه واشر و رأس پیچ‌سنگ مربوط

می‌شود. مقدار Q را می‌توان از منحنی بار - تغییر شکل که از آزمایش بیرون کشی بدست می‌آید، تعیین

نمود.

حداکثر فشار حائل که در یک سیستم پیچ‌سنگ در اثر تغییر شکل توده‌سنگ ایجاد می‌شود از رابطه

زیر بدست می‌آید:

$$P_{Sb \max} = \frac{T_{bf}}{S_c S_l} \quad (34-4)$$

که در آن:

T_{bf} مقاومت نهایی سیستم پیچ‌سنگ براساس آزمایش بیرون کششی در توده‌سنگی مشابه

توده‌سنگی که سیستم پیچ‌سنگ برای آن طرح شده است.

۴-۷-۴- حائل ایجاد شده توسط پیچ‌سنگ‌های تزریقی یا کابل‌ها

مفاهیم مربوط به اندرکنش حائل- سنگ نمی‌تواند در مورد پیچ‌سنگ‌های تزریق شده یا کابل‌ها بکار

رود. این امر به آن علت است که این سیستم‌ها مستقل از توده‌سنگ عمل نمی‌کنند و لذا تغییر شکل‌هایی

که در توده‌سنگ و سیستم حائل اتفاق می‌افتد را نمی‌توان از یکدیگر جدا کرد.

عمل تقویت‌کنندگی پیچ‌سنگ‌های تزریق شده یا کابل‌ها در توده‌های سنگی بعلت تقویت درونی

توده‌سنگ است که به میزان زیادی مشابه عمل حضور مسلح‌کننده‌ها در بتن مسلح است. به علت بافتن

توده‌سنگ و جلوگیری از جدایی بلوک‌های منفرد، المان‌های مسلح‌کننده تزریقی، اتساع در توده‌سنگ

اطراف تونل را محدود می‌کنند. این امر موجب می‌شود که ثابت‌های توده‌سنگ اصلی (m, s) در تبدیل به

m_r و S_r کمتر کاهش یافته و تغییر کنند. مطالعات انجام شده در مورد تأثیر مقادیر m_r و S_r بر خط حائل

مورد نیاز سنگی که تونل را در برگرفته نشان می‌دهد که تغییر شکل u_i با افزایش اندکی در m_r و S_r

شدیداً کاهش می‌یابد (مدنی، ۱۳۸۱).

متأسفانه دلایل متقن و مستقیمی در مورد مقاومت توده‌های سنگی مسلح شده وجود ندارد و از

اینرو مکانیزمی که در بالا بحث شد را نمی‌توان بصورت کمی درآورد.

۴-۷-۵- عکس‌العمل سیستم‌های حائل مرکب

وقتی دو سیستم حائل، بعنوان مثال پیچ‌سنگ و پوشش شاتکریت، با هم ترکیب می‌شوند فرض

می‌شود که سختی سیستم حائل مرکب مساوی با جمع سختی‌های هر مولفه بصورت انفرادی است، یعنی:

$$K' = K_1 + K_2 \quad (۳۵-۴)$$

در این معادله K_1 سختی سیستم اول و K_2 سختی سیستم دوم می‌باشد. لازم به تذکر است که

فرض می‌شود دو سیستم حائل همزمان نصب می‌گردند. تغییر شکل سیستم حائل مرکب هم از رابطه زیر

محاسبه می‌شود:

$$u_i = u_{i_0} + \frac{P_i r_i}{k'} \quad (۳۶-۴)$$

این معادله تا جایی اعتبار دارد که حداکثر تغییر شکلی که می‌تواند توسط یکی از سیستم‌ها تحمل شود،

بدست آید. در نتیجه گسیختگی سیستم اول بعنوان گسیختگی کل سیستم حائل تلقی می‌گردد (مدنی،

۱۳۸۱).

۴-۸- طراحی سیستم نگهداری تونل با استفاده از تحلیل اندرکنش سنگ - حائل

اطلاعات مورد نیاز: در جدول ۴-۱ اطلاعات مورد نیاز برای رسم نمودار و مقادیر آن آورده شده

است.

جدول ۴-۱ اطلاعات مربوط به توده‌سنگ پروژه ایمان برای رسم منحنی اندرکنش سنگ- حائل

r_i (m)	P_0 (Mpa)	S_r	m_r	ν	E (Gpa)	m	s	σ_c (Mpa)	واحد
۷/۶۵	۱/۷۶	۰/۰۰۱۳	۰/۵۷۴۳	۰/۳	۸/۲۹۵	۲/۳۹۷	۰/۰۱۱۷	۵۱/۵	LM-1

۷/۶۵	۱/۷۶	۰/۰۰۱۳	۰/۵۷۴۳	۰/۳	۸/۲۹۵	۲/۳۹۷	۰/۰۱۱۷	۵۱/۵	LM-2
۷/۶۵	۱/۸۹	4.54E-5	۰/۱۱	۰/۳	۲	۰/۶۴	۰/۰۰۱۲۷	۳۵	CZ

در این جدول m و s پارامترهای توده‌سنگ در حالت غیر آشفته هستند که از قرار دادن $D=0$ در

$$\text{رابطه } m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \text{ و } s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \text{ بدست می‌آیند. برای محاسبه } m_r \text{ و } s_r \text{ در روابط}$$

بالا مقدار D برابر با یک خواهد بود (حالت آشفته).

۴-۸-۱- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون‌های LM-1, LM-2

نمودار تغییر شکل تونل در برابر نسبت فشار نگهداری به فشار اولیه در شکل ۴-۲ نشان داده شده

است. برای رسم نمودارهای سقف، کف و دیواره تونل ابتدا با پیروی از معادلات ۴-۱ تا ۴-۲۸ و انجام محاسبات

مربوطه (جدول ۴-۲)، میزان تغییر شکل‌های ایجاد شده برای مقادیر مختلف فشار نگهداری P_i محاسبه شد.

جدول ۴-۲ مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون‌های LM-1, LM-2

P_i	M	D	N	تغییر شکل الاستیک	تغییر شکل پلاستیک	r_e	R	e_{av}	A	U_i
1.76E+06	3.67E-02	-8.91E-01	0	0.00E+00	0	4.63E+00	8.96E-01	0	0	0.00E+00
1.58E+06	3.67E-02	-8.91E-01	0	2.10E-04	0	4.74E+00	8.53E-01	0	0	2.10E-04
1.40E+06	3.67E-02	-8.91E-01	0	4.21E-04	0	4.86E+00	8.07E-01	0	0	4.21E-04
1.23E+06	3.67E-02	-8.91E-01	0	6.31E-04	0	5.00E+00	7.59E-01	0	0	6.31E-04
1.05E+06	3.67E-02	-8.91E-01	0	8.42E-04	0	5.14E+00	7.08E-01	0	0	8.42E-04
8.78E+05	3.67E-02	-8.91E-01	0	1.05E-03	0	5.30E+00	6.52E-01	0	0	1.05E-03
7.02E+05	3.67E-02	-8.91E-01	0	1.26E-03	0	5.49E+00	5.92E-01	0	0	1.26E-03
5.27E+05	3.67E-02	-8.91E-01	0	1.47E-03	0	5.70E+00	5.24E-01	0	0	1.47E-03
3.51E+05	3.67E-02	-8.91E-01	0	1.68E-03	0	5.95E+00	4.47E-01	0	0	1.68E-03
1.76E+05	3.67E-02	-8.91E-01	0	1.89E-03	0	6.28E+00	3.53E-01	0	0	1.89E-03
0.00E+00	3.67E-02	-8.91E-01	0	2.10E-03	0	6.76E+00	2.21E-01	0	0	2.10E-03

برای رسم هر یک از سه نمودار طاق، دیواره و کف تونل از دستورالعمل زیر استفاده شد:

الف: برای طاق تونل U_i برحسب $\frac{P_i + \gamma_r(r_e - r_i)}{P_0}$ رسم شده است.

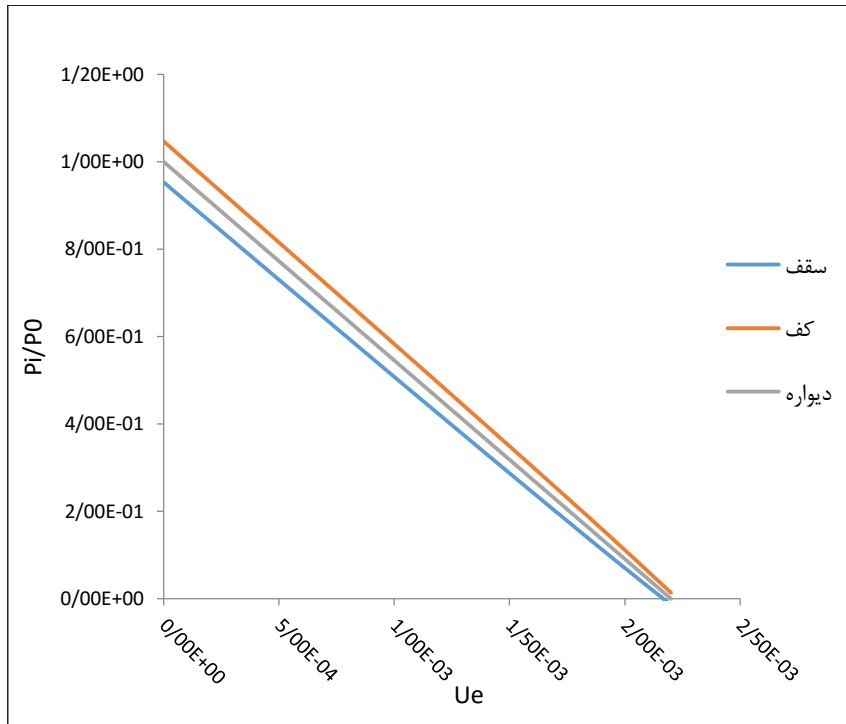
ب: برای دیواره‌های تونل U_i برحسب $\frac{P_i}{P_0}$ رسم شده است.

ج: برای کف تونل U_i برحسب $\frac{P_i - \gamma_r(r_e - r_i)}{P_0}$ رسم شده است.

همانطور که از جدول ۲-۴ و شکل ۲-۴ مشخص است. تغییر شکل‌های تونل در این دو زون در محدوده

الاستیک بوده و میزان جابجایی نهایی تونل حدود ۲/۱ میلی‌متر خواهد بود؛ بنابراین تونل‌ها در این دو زون

پایدار بوده و نیازی به سیستم نگهداری نخواهند داشت.



شکل ۲-۴ نمودار تغییر شکل تونل در زون LM-1 و LM-2

۲-۸-۴ - تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون CZ

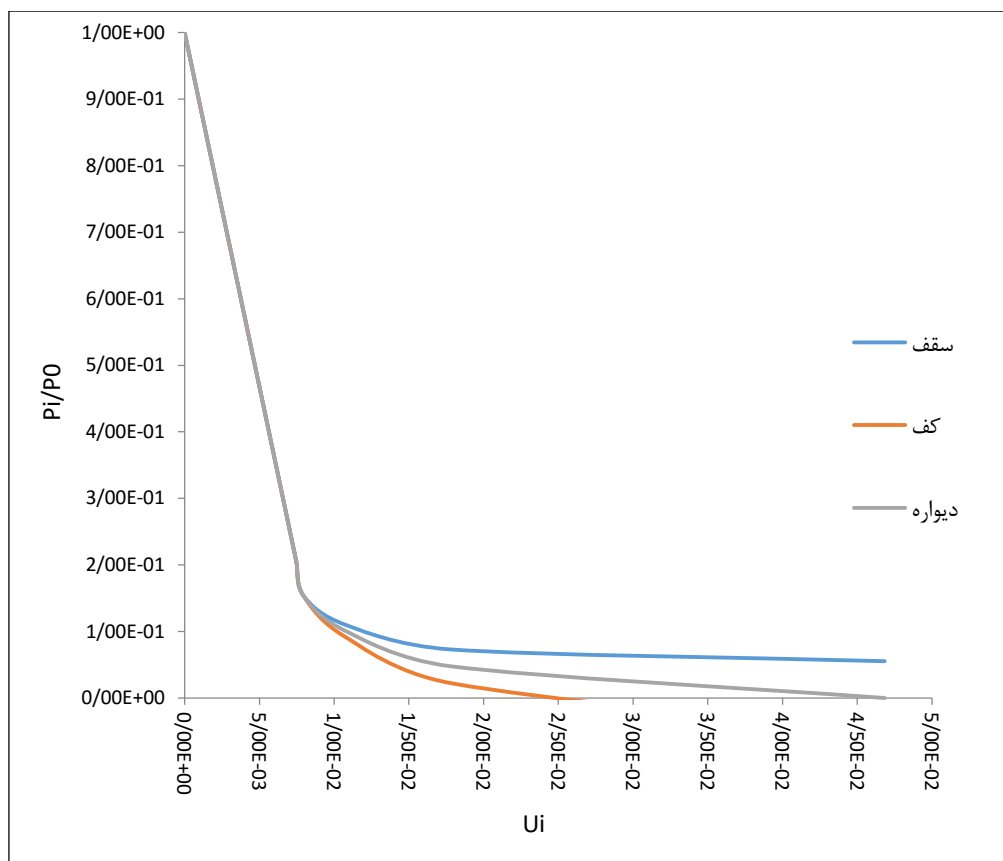
روند ذکر شده در بالا در مورد زون CZ نیز اجرا شد که نمونه‌ای از محاسبات انجام شده در جدول

۳-۴ آمده است. سپس بر طبق دستور العمل ذکر شده در بالا نمودار تغییر شکل برای قسمت‌های مختلف

تونل رسم شد که در شکل ۳-۴ آورده شده است.

جدول ۳-۴ مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای Pi های مختلف در زون CZ

Pi	M	D	N	تغیر شکل الاستیک	تغیر شکل پلاستیک	r_e	R	e_{av}	A	U_i (m)
1.89E+06	0.0462	-0.717	0	0.00E+00	0.00E+00	1.88	2.02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8.90E+05	0.0462	-0.717	0	4.97E-03	0.00E+00	2.9	1.39	0.00E+00	0.00E+00	4.97E-03
7.90E+05	0.0462	-0.717	0	5.47E-03	0.00E+00	3.07	1.31	0.00E+00	0.00E+00	5.47E-03
6.90E+05	0.0462	-0.717	0	5.97E-03	0.00E+00	3.25	1.23	0.00E+00	0.00E+00	5.97E-03
5.90E+05	0.0462	-0.717	0	6.46E-03	0.00E+00	3.46	1.14	0.00E+00	0.00E+00	6.46E-03
4.90E+05	0.0462	-0.717	0	6.96E-03	0.00E+00	3.71	1.04	0.00E+00	0.00E+00	6.96E-03
3.90E+05	0.0462	-0.717	0	7.46E-03	0.00E+00	4	0.929	0.00E+00	0.00E+00	7.46E-03
2.90E+05	0.0462	-0.717	0	7.96E-03	0.00E+00	4.36	0.806	0.00E+00	0.00E+00	7.96E-03
1.90E+05	0.0462	-0.717	0.545	0.00E+00	8.75E-03	8.32	-0.121	-1.86E-03	4.70E-03	1.08E-02
9.00E+04	0.0462	-0.717	0.545	0.00E+00	9.98E-03	9.49	-0.309	-2.69E-03	7.38E-03	1.78E-02
0.00E+00	0.0462	-0.717	0.545	0.00E+00	1.23E-02	11.7	-0.606	-5.67E-03	1.81E-02	4.68E-02



شکل ۳-۴ نمودار تغییر شکل تونل در زون CZ

همانطور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌کنید تونل‌ها در این زون در صورت نصب نکردن سیستم نگهداری وارد حالت پلاستیک شده که بر طبق شکل ۳-۴ ریزش سقف و جابجایی زیادی در دیواره‌ها مشاهده خواهد شد. بنابراین استفاده از سیستم نگهداری برای این زون امری بدیهی به نظر می‌رسد.

برای رسیدن به یک سیستم نگهداری مناسب سیستم‌های مختلفی امتحان شد که نمودار مربوط به اندرکنش آن‌ها و تونل در شکل‌های زیر نشان داده شده است. مشخصات شاتکریت، پیچ‌سنگ و قاب‌های فولادی مورد استفاده در جدول ۴-۴ آمده است.

جدول ۴-۴ مشخصات فیزیکی سیستم‌های نگهداری مورد استفاده

پیچ سنگ		قاب فولادی		شاتکریت	
4 (m)	طول آزاد	207000 (MPa)	مدول یانگ فولاد	2e10 (Pa)	مدول الاستیسیته
25 (mm)	قطر	245 (MPa)	مقاومت تسلیم فولاد	0.3	ضریب پواسون
207000 (MPa)	مدول یانگ			25e6 (Pa)	مقاومت فشاری
200 KN	مقاومت نهایی				
5e-8 (m/N)	Q				

سیستم‌های نگهداری زیر برای نصب در این شرایط کنترل شدند:

۱- شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر

۲- پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با آرایش مربعی به طول ۱/۵ متر

۳- ترکیبی حالت ۱ و ۲

۴- قاب‌های فولادی به فاصله ۱ متر از هم

شکل ۴-۴ نمودار اندرکنش تونل و سه سیستم نگهداری پیشنهاد شده در بالا، نشان داده شده است.

مشخصات بولت‌هایی که در سیستم نگهداری استفاده شده است در جدول ۴-۴ آمده است. فاصله‌داری محیطی

و طولی بولت‌ها از هم ۱/۵ متر می‌باشد. تنها اندرکنش یا رفتار پیچ‌سنگ‌های غیر تزریقی را می‌توان با روابط

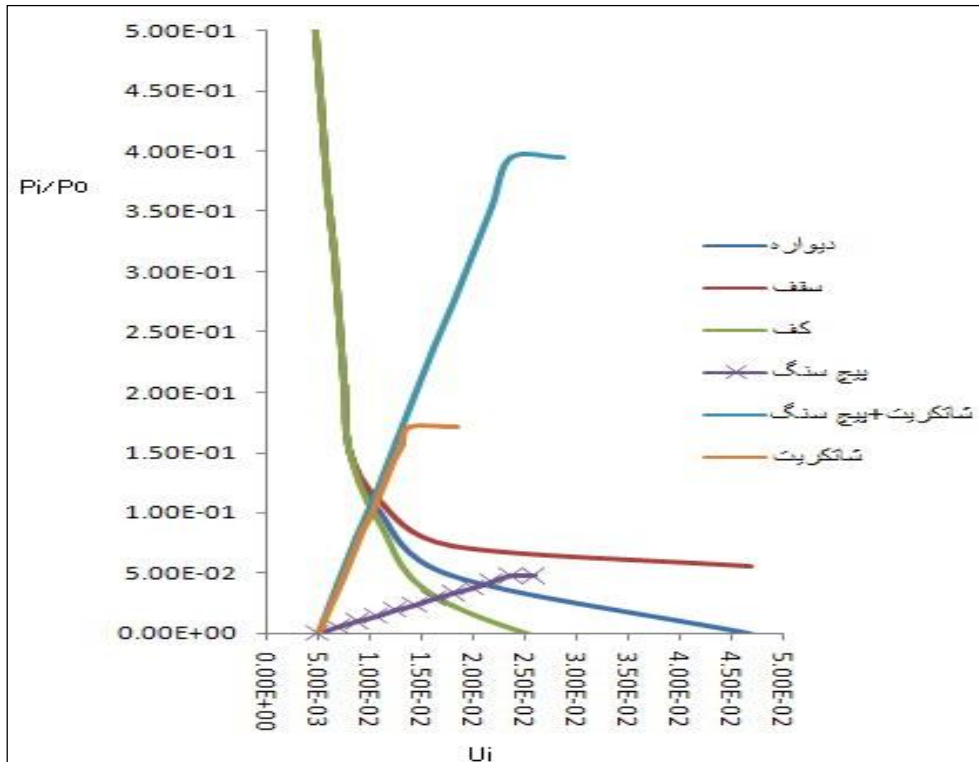
ذکر شده در بخش اول ترسیم کرد و با توجه به این که سختی این پیچ‌سنگ‌ها کم است، لذا به تنهایی نمی‌تواند

سیستم نگهداری مناسبی باشد.

ضخامت شاتکریت استفاده شده ۱۰ سانتیمتر می‌باشد و مشخصات آن در جدول ۴-۴ آمده است.

همانطور که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است، شاتکریت به تنهایی نگهداری نسبتاً مناسبی را فراهم

می‌کند و قبل از این که سرعت تغییر شکل دیواره و یا سقف تونل زیاد شود، فعالیت خود را آغاز می‌کند.



شکل ۴-۴ نمودار اندرکنش تونل و سیستم‌های نگهداری موردنظر

سیستم ترکیبی شامل شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر و پیچ‌سنگ با فاصله‌داری ۱/۵ نیز در شکل

۴-۴ نشان داده شده است. بعلت پائین بودن سختی پیچ‌سنگ‌های غیر تزریقی نسبت به شاتکریت، سختی

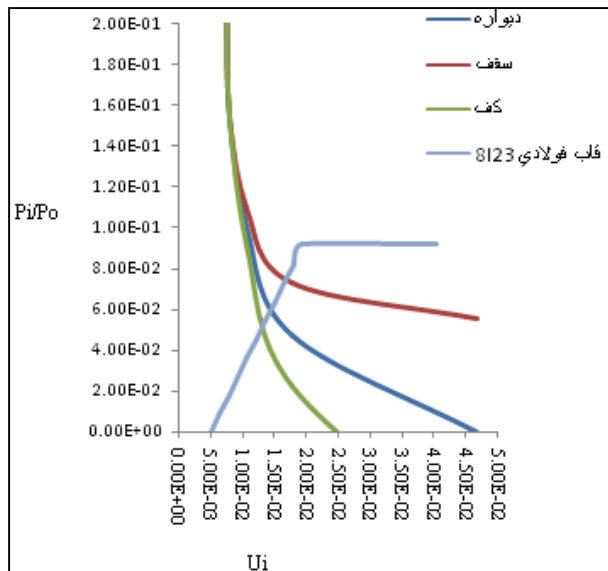
معادل آن‌ها اختلاف چندانی با سختی شاتکریت به تنهایی ندارد.

در مورد قاب‌ها، انواع مختلف امتحان شد که نمودارهای حاصل در زیر نشان داده شده است.

جدول ۴-۵ مشخصات قاب فولادی 8123 (با مقطع ۱ در سیستم استاندارد آمریکا) (بایرون، ۱۳۷۶)

قاب فولادی 8123 با فاصله‌داری ۱ متر	
عرض بال	0.1059 (m)
ارتفاع مقطع	0.2023 (m)
سطح مقطع	0.0043 (m^2)
ممان اینرسی مقطع	2.67e-5 (m^4)

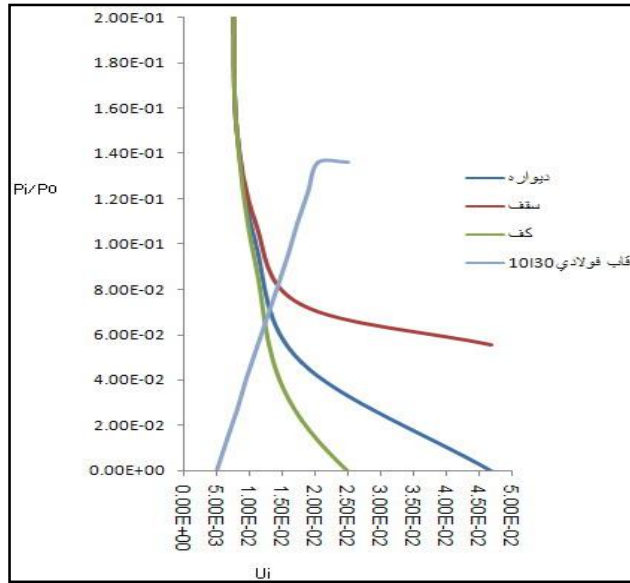
207000 (MPa)	مدول یانگ فولاد
245 (MPa)	مقاومت تسلیم فولاد



شکل ۴-۵ نمودار اندرکنش قاب فولادی 8123

جدول ۴-۶ مشخصات قاب فولادی 10130 (با مقطع ۱ در سیستم استاندارد آمریکا) (بایرون، ۱۳۷۶)

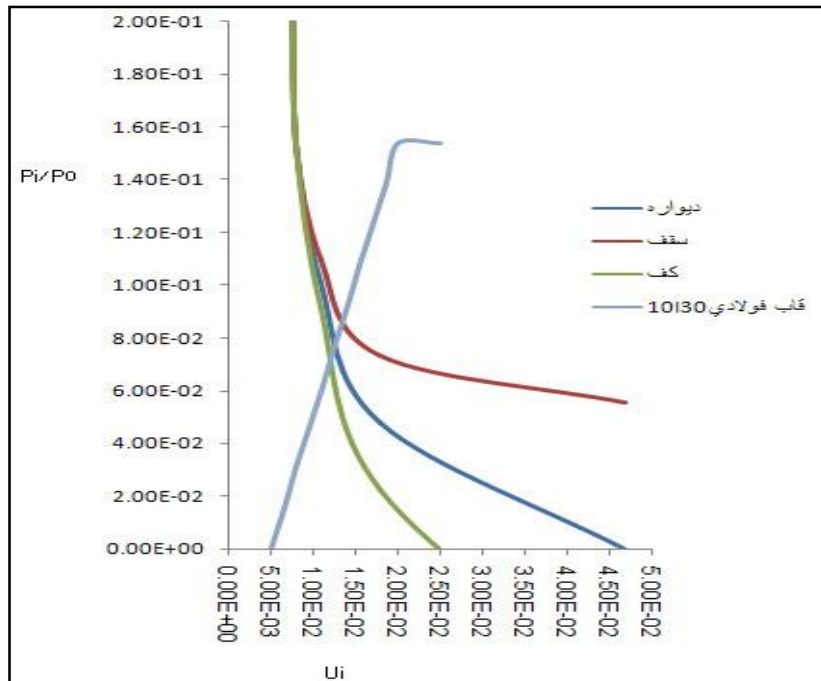
قاب فولادی 10130 با فاصله‌داری ۱ متر	
0.1293 (m)	عرض بال
0.254 (m)	ارتفاع مقطع
$0.00564 (m^2)$	سطح مقطع
$5.56e-5 (m^4)$	ممان اینرسی مقطع
207000 (MPa)	مدول یانگ فولاد
245 (MPa)	مقاومت تسلیم فولاد



شکل ۴-۶ نمودار اندرکنش قاب فولادی 10130

جدول ۴-۷ مشخصات قاب فولادی 10135 (با مقطع ۱ در سیستم استاندارد آمریکا) (بایرون، ۱۳۷۶)

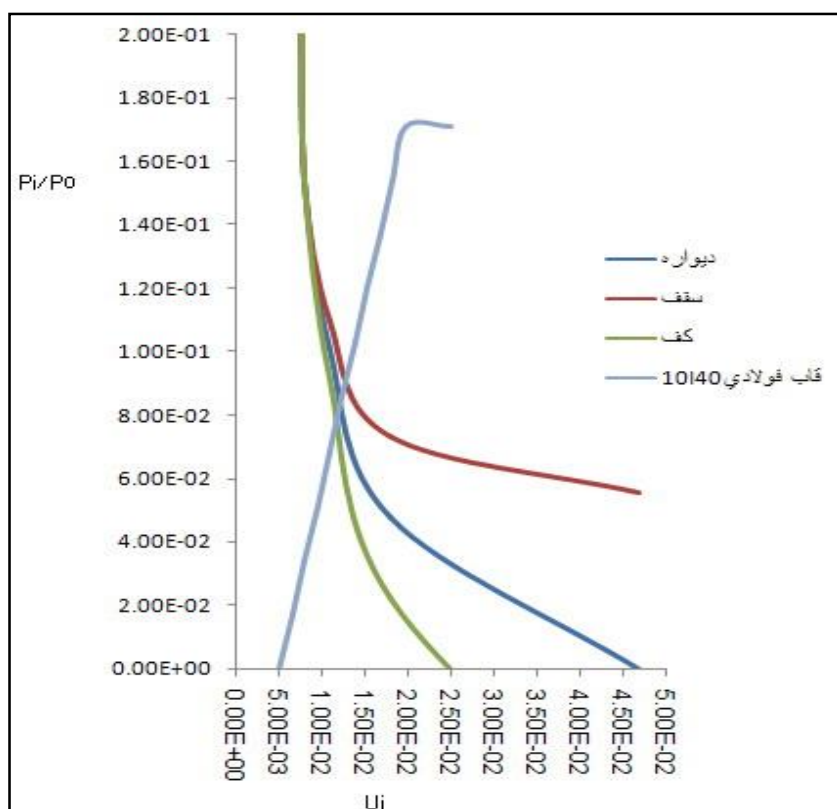
قاب فولادی 10135 با فاصله‌داری ۱ متر	
عرض بال	0.1256 (m)
ارتفاع مقطع	0.254 (m)
سطح مقطع	$0.00659 (m^2)$
ممان اینرسی مقطع	$6.07e-5 (m^4)$
مدول یانگ فولاد	207000 (MPa)
مقاومت تسلیم فولاد	245 (MPa)



شکل ۴-۷ نمودار اندرکنش قاب فولادی 10135

جدول ۴-۸ مشخصات قاب فولادی 10140 (با مقطع ۱ در سیستم استاندارد آمریکا) (بایرون، ۱۳۷۶)

قاب فولادی 10140 با فاصله‌داری ۱ متر	
0.1293 (m)	عرض بال
0.254 (m)	ارتفاع مقطع
0.00754 (m^2)	سطح مقطع
6.57e-5 (m^4)	ممان اینرسی مقطع
207000 (MPa)	مدول یانگ فولاد
245 (MPa)	مقاومت تسلیم فولاد



شکل ۴-۸ نمودار اندرکنش قاب فولادی 10I40

با توجه به نمودارهای اندرکنش بالا می‌توان چنین نتیجه گرفت که اگر به دلایل فنی و به دلیل خردشدگی زیاد زون CZ و چون احتمالاً به سیستم نگهداری نیاز خواهید داشت که خیلی سریع از تغییر شکل‌ها جلوگیری کند و به دلیل این که ما در آنالیزها در این بخش مقاومت فشاری ۲۸ روزه شاتکریت را منظور کردیم بنابراین ممکن است شاتکریت و یا پیچ‌سنگ‌های تزریقی به دلیل این که برای رسیدن به مقاومت نهایی خود به زمان نیاز دارند بنابراین به نظر می‌رسد که استفاده از قاب‌های فولادی در این زون محتمل خواهد بود. به عبارت دیگر قاب‌های فولادی می‌توانند خیلی سریع‌تر از شاتکریت و پیچ‌سنگ از ریزش جلوگیری نمایند. قاب فولادی که به این منظور پیشنهاد می‌شود با توجه به شکل‌های ۴-۵ تا ۴-۸ قاب فولادی 10I35 با فاصله‌داری یک متر خواهد بود.

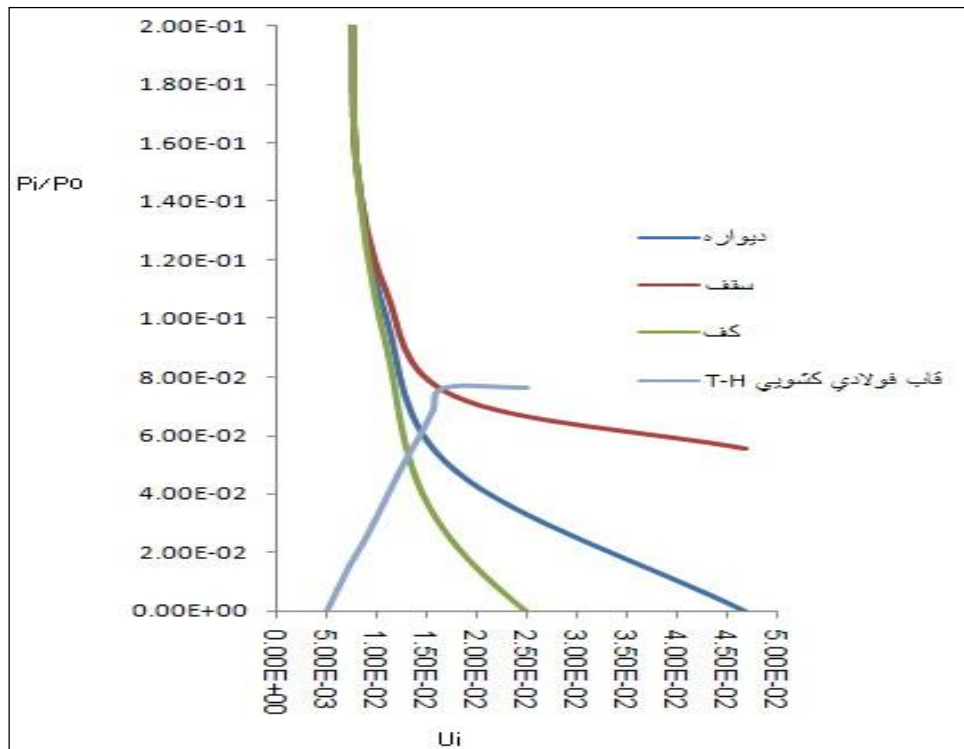
قابل ذکر است که انواع قاب‌های کشویی فولادی با نیمرخ توشینت- هینزمن (T.H) برای این زون

امتحان شد که فاکتور ایمنی بدست آمده مطلوب نبود (شکل ۴-۹). در زیر نمودار اندرکنش یکی از قوی‌ترین

انواع این نوع نیمرخ نشان داده شده است. مشخصات قاب مورد استفاده در جدول ۴-۹ آمده است.

جدول ۴-۹ مشخصات مقطع قاب کشویی توشینت- هینزمن (با یرون، ۱۳۷۶)

مشخصات مقطع قاب کشویی توشینت- هینزمن با فاصله‌داری ۱ متر	
وزن	44 (kg/m)
نوع	58
عرض	0.172 (m)
ارتفاع	0.148 (m)
سطح مقطع	56 (cm ²)
ممان اینرسی مقطع	1265 (cm ⁴)
مدول مقطع	171 (cm ³)



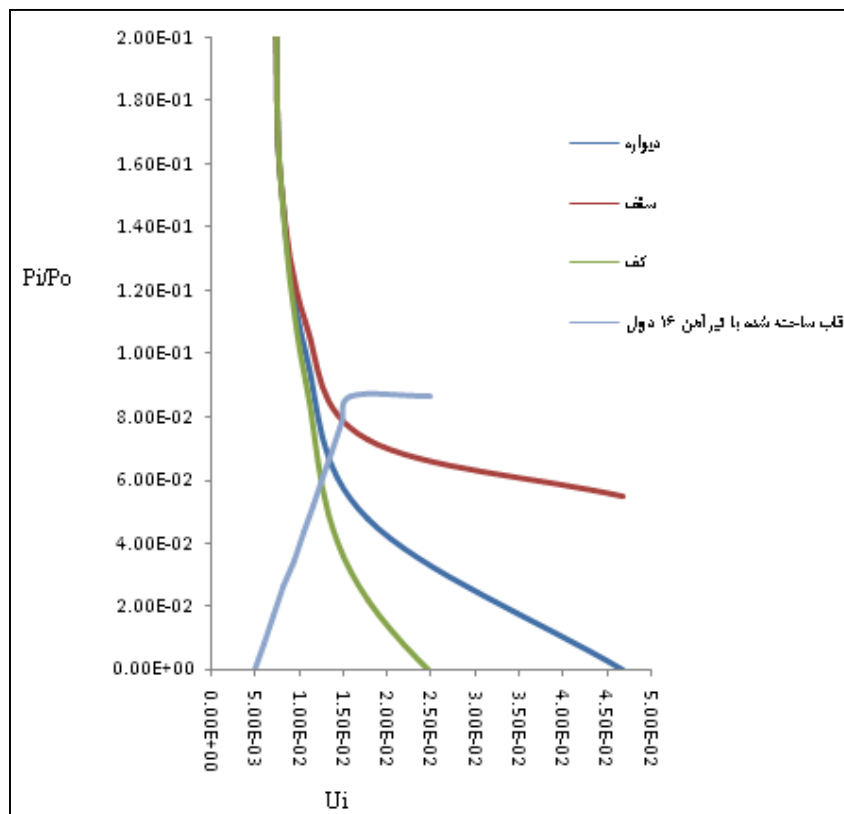
شکل ۴-۹ نمودار اندرکنش قاب فولادی کشویی T.H

البته با توجه به این که در ایران و بخصوص در پروژه‌های عمرانی استفاده از تیرآهن‌های ۱۶ با مقطع ۱ متداول است، استفاده از قاب ساخته شده با این نوع تیرآهن در مقطع CZ مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که قاب‌های ساخته شده از تیرآهن ۱۶ دویل با فاصله‌داری ۷۰ سانتی‌متر می‌توانند تونل را در این مقطع نگهداری کنند. مشخصات مقطع تیرآهن ۱۶ در جدول ۴-۱۰ و نمودار اندرکنش قاب ساخته شده و تونل در شکل ۴-۱۰ آمده است.

جدول ۴-۱۰ مشخصات تیرآهن ۱۶ با مقطع ۱ (بایرون، ۱۳۷۶)

عرض بال	82 mm
ارتفاع مقطع	160 mm
سطح مقطع	20.1 (cm ²)

ممان اینرسی	
مقطع	$869(cm^4)$
مدول مقطع	$109(cm^3)$



شکل ۴-۱۰ نمودار اندرکنش قاب ساخته شده از تیر آهن ۱۶ دول

۹-۴- نتیجه گیری

در این فصل ابتدا با استفاده از معادلات و فرضیات پیشنهاد شده توسط Ladanyi، نمودار تغییر شکل توده سنگ اطراف تونل در زون‌های مختلف ترسیم گردید که با توجه به این نمودارها، شرایط توده سنگ اطراف تونل در زون‌های LM-1 و LM-2 بسیار خوب بوده و تغییر شکل‌های اتفاق افتاده در این زون‌ها در محدوده الاستیک می‌باشد. بنابراین تونل‌ها در این دو زون پایدار بوده و نیاز به سیستم نگهداری موقت نخواهند داشت. البته اجرای شاتکریت لایه اول بمنظور جلوگیری از هوازدهی و ایجاد سطحی نسبتاً صاف الزامی می‌باشد.

اما نمودار تغییر شکل بدست آمده برای زون خرد شده CZ بیانگر تغییر شکل‌های زیادی در دیواره‌ها و کف تونل بوده و در صورت عدم نصب سیستم نگهداری ریزش در سقف اتفاق خواهد افتاد. بنابراین با توجه به لزوم نصب سیستم نگهداری در این زون از تونل، سیستم‌های نگهداری مختلفی شامل پیچ‌سنگ، شاتکریت و قاب فولادی مورد تحلیل قرار گرفت. در نهایت با توجه به نمودارهای اندرکنش سنگ-حائل بدست آمده، سیستم نگهداری مرکب از شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر و پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله‌داری ۱/۵ متر پیشنهاد شد. ولی با این وجود بدلیل این که سیستم نگهداری باید بلافاصله در این زون فعال شود و با در نظر گرفتن این نکته که دوغاب یا شاتکریت برای رسیدن به مقاومت نهایی خود نیازمند زمان هستند، تصمیم گرفته شد که قابلیت استفاده از قاب‌های فولادی نیز در این زون بررسی شود. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که قاب فولادی ساخته‌شده از دو تیرآهن ۱۶ می‌تواند با ضریب اطمینان خوبی نگهداری از تونل را در این زون برعهده بگیرد. البته قاب فولادی 10I35 هم مورد بررسی قرار گرفت که نتایج این تحلیل نیز حاکی از مناسب بودن این قاب در این زون می‌باشد. ولی بدلیل این که در پروژه‌های عمرانی کشور معمولاً تیرآهن‌های ۱۶ مورد استفاده قرار می‌گیرد و تهیه آن برای کارفرما آسان‌تر است، پیشنهاد می‌شود جهت نگهداری این زون، تیرآهن‌های ۱۶ مورد استفاده قرار گیرند.

۵-۱- مقدمه

روش‌های تحلیل فرم بسته^۸ جزء اولین روش‌های تحلیل پایداری تونل‌ها محسوب می‌شوند. این روش‌ها نقش مهم و اساسی در درک مفاهیم ریشه‌ای رفتار توده‌های سنگی ایفا می‌نمایند. با این وجود،

^۸ - Close Form

امروزه این مدل‌ها به علت استفاده از معادلات پیچیده و فرضیات محدود کننده از کاربرد محدودی برخوردار می‌باشند. به هر حال می‌توان نتایج بدست آمده از آن را (بصورت تقریبی) جهت آزمایش و مقایسه با نتایج حاصل از مدل‌های عددی استفاده کرد. برای استفاده از معادلات فرم بسته باید فرضیاتی را مدنظر قرار داد که شامل موارد زیر می‌باشد (Hoek, 2000) :

۱- مقطع تونل باید دایروی و متقارن باشد.

۲- تنش‌های در برگیرنده تونل در جهت‌های مختلف دارای مقادیر برابری باشند. به بیان دیگر تونل باید در محدوده تنش هیدرواستاتیک قرار داشته باشد. یعنی نسبت تنش افقی به تنش قائم برابر با یک باشد.

لازم به ذکر است که اگر چه فرض اول در مورد تونل ایمن صدق نمی‌کند ولی با این وجود برای بدست آوردن جواب‌های تقریبی، مناسب است.

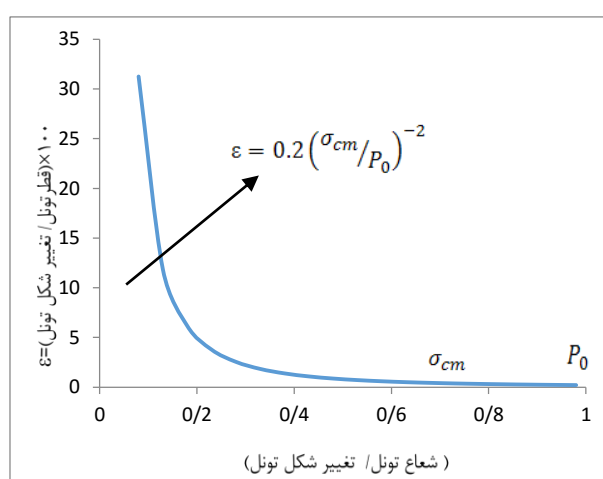
۵-۲- تحلیل پایداری تونل با روش‌های فرم بسته

۵-۲-۱- با استفاده از نمودارهای بی بعد

یکی از وسایل و ابزارهایی که توسط آن‌ها می‌توان روندهای کلی رفتار اجسام را مورد مطالعه قرار داد، استفاده از نمودارهای بی‌بعد حاصل از مطالعات پارامتریک است. در شکل ۵-۱ و ۵-۲ دو نمونه از این نمودارهای بی‌بعد ارائه شده است. در این تحلیل‌ها، پارامترهای ورودی، جهت تعیین مقاومت توده‌سنگ و تغییر شکل تونل، به صورت متغیرهای تصادفی، تغییر حاصل می‌نمایند. شکل ۵-۱ نموداری را نشان می‌دهد که در آن، نسبت شعاع پلاستیک به شعاع تونل در مقابل نسبت مقاومت سنگ به تنش برجا ترسیم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که وقتی مقاومت توده‌سنگ در برگیرنده به کمتر از ۲۰٪ تنش برجا برسد،

اندازه پهنه پلاستیک نیز با آهنگی بسیار سریع افزایش پیدا می‌کند (Hoek, 2000). در این مورد، تجارب عملی حاکی از آن است که وقتی این مرحله از رشد سریع بدست می‌آید، کنترل پایداری تونل بسیار سخت و مشکل خواهد شد.

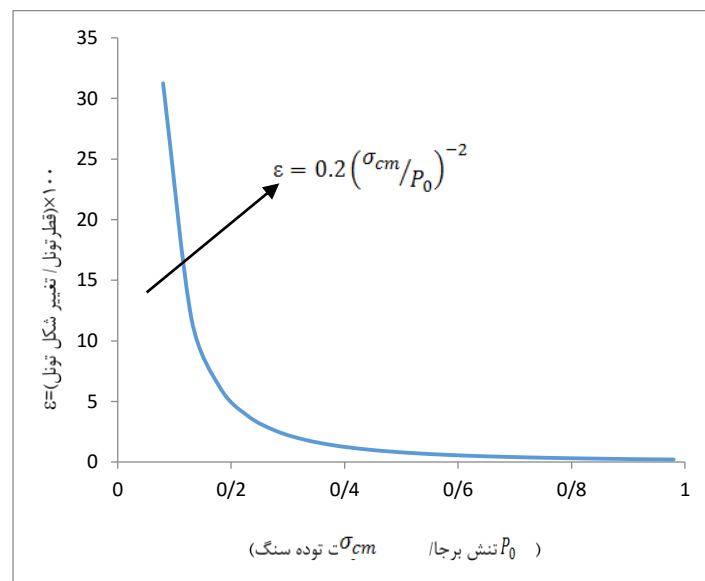
شکل ۵-۲ نیز نموداری را نشان می‌دهد که در آن، نسبت تغییر شکل تونل به شعاع تونل، در مقابل نسبت مقاومت توده‌سنگ به تنش برجا ترسیم شده است. در این حالت نیز هنگامی که مقاومت توده‌سنگ به کمتر از ۲۰٪ تنش برجای حاکم بر محیط برسد، تغییر شکل‌ها بطور اساسی افزایش یافته و احتمالاً ریزش تونل نیز متعاقب آن بوقوع می‌پیوندد؛ مگر اینکه این تغییر شکل‌ها کنترل شوند.



شکل ۵-۱ نمودار همگرایی تونل در مقابل نسبت مقاومت توده‌سنگ به تنش برجا (Hoek and Marinos, 2000)

برای تحلیل پایداری تونل‌های ایمن دو مقطع از تونل یکی در زون LM-1 (یا LM-2) با ارتفاع روباره ۶۵ متر و دیگری زون خرد شده (CZ) و عمق ۷۰ متر مورد بررسی قرار گرفته است. در زون LM-1 با در نظر گرفتن مقاومت توده‌سنگ معادل ۲/۷۹۱ مگاپاسکال و تنش برجای ۱/۷۵۵ مگاپاسکال (با توجه به عمق ۶۵ متری و وزن مخصوص ۰/۰۲۷ مگاپاسکالی سنگ)، نسبت بین این دو فاکتور حدود ۱/۶ می‌شود با این نسبت

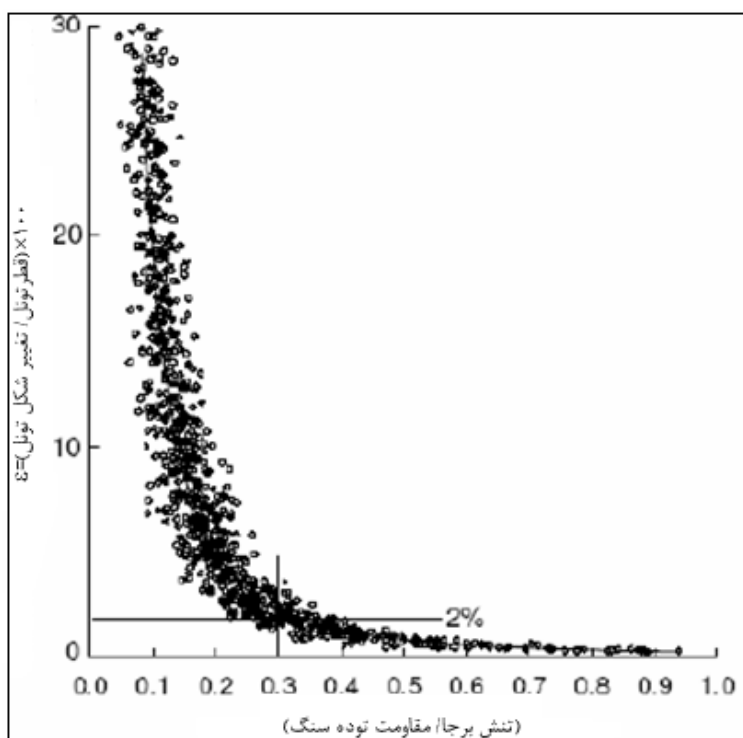
و با استفاده از شکل‌های ۱-۵ و ۲-۵ و با شعاع تونل معادل ۸ متر، شعاع پهنه پلاستیک ۷/۳۹ متر می‌شود یعنی هیچ قسمتی از اطراف تونل وارد شعاع پلاستیک نمی‌شود و همگرایی تونل تقریباً ۱۱ میلی‌متر خواهد شد. به نظر نمی‌رسد که با توجه به مقادیر به دست آمده مشکلی در نگهداری تونل در این مقطع وجود داشته باشد.



شکل ۲-۵ رابطه بین شعاع زون پلاستیک و نسبت مقاومت توده‌سنگ به تنش برجا (Hoek, 2000)

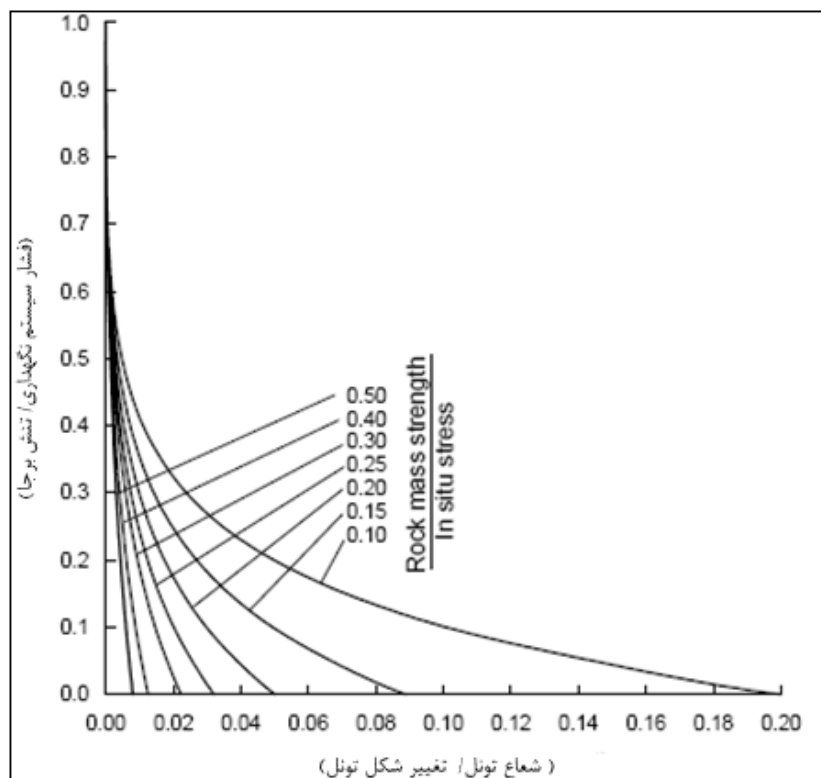
اما در مورد زون CZ با در نظر گرفتن مقاومت توده‌سنگ معادل ۰/۳۳۵ مگاپاسکال و تنش برجای ۱/۸۹ مگاپاسکال، نسبت بین این دو فاکتور حدود ۰/۱۷۷ می‌شود با این نسبت و با استفاده از شکل‌های ۱-۵ و ۲-۵ و با شعاع تونل معادل ۸ متر، شعاع پهنه پلاستیک ۲۷ متر می‌شود و تغییر مکانی بالغ بر ۱ متر را بوجود خواهد آورد. کاملاً مشخص است که بروز چنین شرایطی قابل قبول نبوده و در این حالت برای جلوگیری از تقارب و ریزش احتمالی این مقطع، به نصب مقادیر قابل توجهی از سیستم نگهداری نیاز خواهد بود.

تجربه نشان داده است که نسبت تغییر شکل تونل به شعاع تونل بایستی به مقداری کمتر از حدود $0/02$ ثابت نگه داشته شود تا در طی آن بتوان جلوی ناپایداری‌های جدی را گرفت. همانطور که در شکل ۵-۳ نشان داده شده است این مقدار متناظر با نسبت مقاومت توده سنگ به تنش بر جای $0/3$ است. بنابراین این عدد را می‌توان مرز محدوده بحرانی برای ناپایداری در نظر گرفت. بر طبق این منطق، عمق بحرانی تونل در زون CZ، ۴۱ متر خواهد بود. در اعماق بیشتر از این مقدار مشکلات نگهداری تونل پیچیده‌تر خواهد بود.



شکل ۵-۳ مرز بین تغییر شکل در تونل‌ها (Hoek, 1999 b)

شکل‌های ۵-۱ و ۵-۲ برای شرایطی که در آن فشار سیستم نگهدارنده صفر باشد تهیه شده است. تحلیل‌های مشابهی نیز برای منظور نمودن فشار سیستم نگهداری انجام پذیرفته است. نمودار شکل ۵-۴ بر این اساس بدست آمده است (Hoek, 2000). طبق این نمودار اگر ما بخواهیم تغییر شکل تونل را به کمتر از $0/02$ برسانیم بایستی نسبت فشار سیستم نگهدارنده به تنش برجا، مقداری بیش از $0/35$ باشد. چنین نسبتی معادل با $0/662$ مگاپاسکال از فشار سیستم نگهداری است.



شکل ۴-۵ رابطه بین فشار نگهدارنده و تغییر شکل تونل برای نسبت‌های مختلف مقاومت توده‌سنگ به تنش برجا (Hoek, 2000)

هوک و براون^۹ (۱۹۸۰) و بریدی و براون (۱۹۸۵) با انتشار معادلاتی پیچیده توانستند ظرفیت پیچ

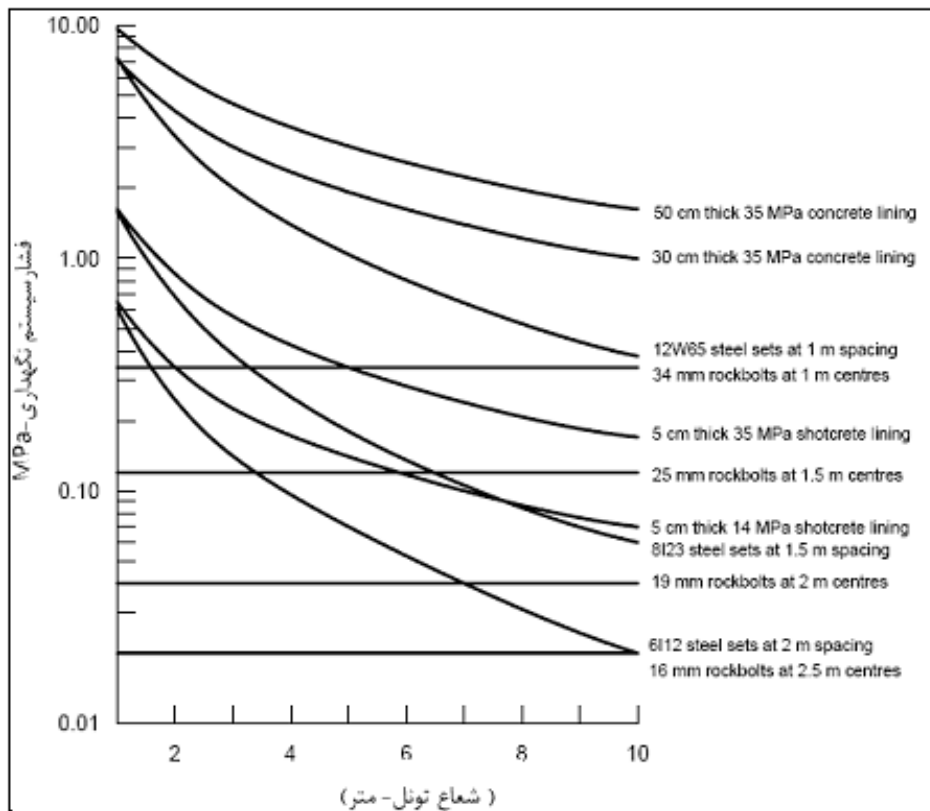
سنگ‌هایی با مهار مکانیکی، شاتکریت یا پوشش‌های بتنی و یا قاب‌های فلزی موجود در تونل‌های دایره‌ای را

به خوبی محاسبه نمایند. ارائه این فرمول‌ها خارج از بحث این مطالعه بوده ولی نموداری را که هوک براساس

همین روابط ارائه کرده در اینجا استفاده شده است. این نمودار (شکل ۵-۵) بر مبنای حداکثر فشار سیستم

نگهدارنده (P_i) و شعاع تونل، سیستم‌های مختلف نگهدارنده را ارائه می‌دهد.

^۹ Hoek And Brown-



شکل ۵-۵ ارزیابی‌هایی از ظرفیت سیستم نگهدارنده، برای تونل‌هایی با ابعاد مختلف (Hoek, 2000)

تحت این شرایط، سیستم نگهداری لازم برای پایدارسازی تونل مزبور مجموعه‌های فولادی 12W65

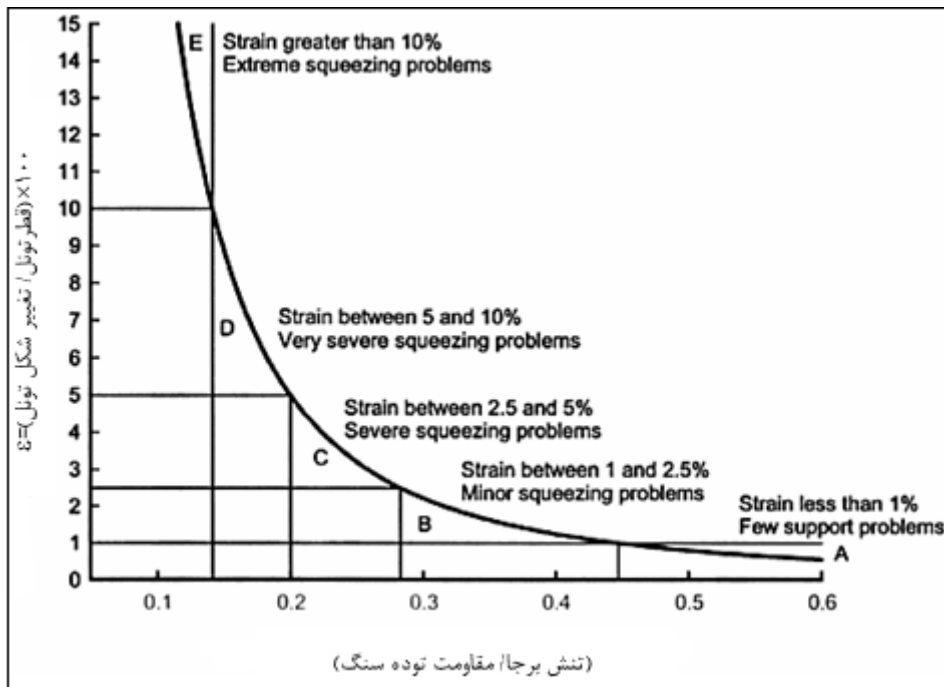
با فاصله یک متری یا شاتکریت به ضخامت ۲۰ سانتیمتر و مقاومت ۳۵ مگاپاسکال را پیشنهاد نمود.

اگر به نمودار شکل ۵-۶ که بیانگر رابطه بین مشکلات تونل سازی با میزان کرنش همان تونل

می‌باشد، توجه شود مشاهده می‌گردد که مقطع مورد بررسی در زون CZ در منطقه‌ای با مشکلات فشارندگی

زیاد قرار می‌گیرد و مقطع قرار گرفته در زون LM-1 و LM-2 در منطقه‌ای با مشکلات نگهداری کم قرار

می‌گیرد.



شکل ۵-۶ مشکلات تونل سازی مربوط به مقادیر مختلف کرنش (Hoek, 2001)

۶-۱- مقدمه

از جمله مهمترین مراحل تحلیل عددی، انتخاب نرم افزار مناسب با توجه به نحوه عملکرد و محدودیت‌های موجود در هر نرم افزار می‌باشد. با توجه به مطالعات انجام گرفته، آنچه کاملاً واضح و مشهود می‌باشد، غالب بودن سطوح درزه‌داری موجود در منطقه می‌باشد. به عبارتی ناپیوستگی‌ها نقش اساسی در تعیین پایداری یا عدم پایداری تونل دارند لذا می‌بایست نرم افزار یا نرم افزارهایی انتخاب گردند که قابلیت مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته را دارا بوده و بتوانند گویای شرایط واقعی باشند.

روش‌های پیوسته عددی در مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته، به هنگام تعریف ناپیوستگی‌ها و رفتار معرف سنگ درزه‌دار محدودیت دارند؛ این محدودیت‌ها شامل موارد زیر می‌باشند:

الف- تعداد درزه‌ها

ب- گستره و وسعت درزه‌های متقاطع

ج- مقدار جابجایی

د- عدم کارایی محاسباتی ناشی از فرض رفتار پیوسته

روش‌های ناپیوسته، تکنیک‌های عددی هستند که به ویژه برای تحلیل رفتار ناپیوستگی‌ها، فرمول‌بندی شده‌اند و در این بین معروف‌ترین و پیشرفته‌ترین روش ناپیوسته، روش اجزاء مجزا می‌باشد. روش اجزاء مجزا یکی از روش‌های عددی است که برای ارزیابی پایداری و بررسی تغییر شکل و شکست محیط‌های ناپیوسته به کار می‌رود و امروزه استفاده از آن به طور وسیعی در محیط‌های ناپیوسته مورد توجه قرار گرفته است (UDEEC Manual, 2004).

بمنظور تحلیل پایداری، نرم افزار UDEC با قابلیت فوق‌العاده در مدلسازی سطوح ناپیوستگی و بررسی تأثیر این سطوح در پایداری و یا عدم پایداری مورد استفاده قرار گرفته است.

با حفاری تونل وضعیت تنش‌های موثر بر زمین تغییر می‌کند که تغییر شکل‌هایی را به دنبال دارد. اگر برای مهار این تغییر شکل‌ها تدبیری اتخاذ نشود ممکن است که جابجایی در سقف تونل انجام شده و تأثیر آن به سطح زمین برسد.

در بعضی موارد طراحی و اجرای سیستم‌های نگهداری مناسب مانع از جابجایی می‌شود که میزان جابجایی به شرایط زمین‌شناسی، ابعاد تونل و روش حفاری و نگهداری بستگی دارد. جابجایی معمولاً در مورد زمین‌های خاکی مهمتر از زمین‌های سنگی است اما در پاره‌ای موارد اجرای نامناسب حفاری و نگهداری تونل در زمین‌های سنگی نیز جابجایی قابل توجهی را به دنبال داشته است.

به منظور مدلسازی عددی و تحلیل پایداری تونل می‌بایست تحلیل در مقاطع مختلف با توجه به ویژگی‌های خاص هر ناحیه صورت پذیرد. حاصل این فرایند ممکن است نشان دهد که شرایط و خصوصیات توده‌سنگ و ناپیوستگی‌ها بگونه‌ای است که نیازی به نصب سیستم نگهداری نیست و یا بالعکس برای حفظ پایداری بایستی سیستم نگهداری نصب گردد. لازم به ذکر است که پایداری و یا عدم پایداری یک سازه بستگی به عمر، کاربری و شرایط حاکم بر سازه دارد که می‌بایست در تحلیل‌ها مورد توجه قرار گیرد.

۶-۲- فرضیات و روند مدلسازی عددی

فرضیات انجام گرفته جهت مدل سازی عددی به شرح ذیل است (UDEEC Manual, 2004):

- ۱- مدلسازی در حالت دو بعدی، در یک مقطع عرضی عمود بر محور تونل انجام شده و در فرمولاسیون حل مدل فرض وجود شرایط کرنش صفحه‌ای لحاظ شده است.
- ۲- ابعاد مدل به‌گونه‌ای انتخاب شده که فاصله مرز مدل از جداره تونل، بیش از ۵ برابر شعاع باشد که البته این فاصله در شرایط توده سنگ ضعیف و اعماق زیاد ممکن است بیشتر باشد که در هنگام مدلسازی این موضوع باید کنترل شود. بدین ترتیب می‌توان شرایط جابجایی صفر در مرز مدل را در نظر گرفت.

۳- شرایط تنش‌های اولیه به صورت ثقلی و بر اساس ارتفاع روباره در نظر گرفته شده است. مقدار K

(نسبت تنش‌های قائم به افقی)، ۱ می‌باشد (براساس اطلاعات حاصل از مشاور).

۴- مدل رفتاری توده سنگ موهر کولمب است.

۵- سیستم نگهداری مرکب از شاتکریت، قاب و پیچ‌سنگ می‌باشد. برای مدلسازی شاتکریت و قاب از

المان تیر و برای پیچ‌سنگ‌ها از المان کابل (Cable) استفاده شده است.

پارامترهای ورودی برای شاتکریت شامل سطح مقطع، مدول الاستیسیته، ممان اینرسی می‌باشد و

برای المان کابل شامل سطح مقطع کابل، مدول الاستیسیته کابل، مقاومت تسلیم، سختی دوغاب (K_{bond}) و

حداکثر نیروی برشی در واحد طول (S_{bond}) می‌باشد. فرض می‌شود که دوغاب پیچ‌سنگ به عنوان یک ماده

الاستیک-کاملاً پلاستیک رفتار می‌کند. با توجه به جابجایی برشی U_a بین سطح کابل و دیواره چال، نیروی

برشی F_a در واحد طول کابل توسط رابطه (۱-۶) با سختی K_{bond} مربوط می‌شود (UDEEC Manual, 2004):

$$F_a = K_{bond} \cdot U_a \quad (1-6)$$

با توجه به عدم آزمایش‌های بیرون کشیدن پیچ‌سنگ، از رابطه (۲-۶) برای محاسبه سختی

K_{bond} استفاده شده که برای استفاده در نرم افزار UDEC نتایج منطقی و مناسبی ارائه می‌دهد (UDEEC

Manual, 2004).

$$K_{bond} = \frac{2\pi G_g}{10 \ln(1 + 2 \frac{2t}{D})} \quad (2-6)$$

t = ضخامت دوغاب اطراف کابل = ۱۳mm

G_g = مدول برشی دوغاب = ۸ GPa

D = قطر کابل = ۲۵mm

حداکثر نیروی برشی در واحد طول (S_{bond}) را می‌توان با استفاده از رابطه (۳-۶) محاسبه کرد (UDEC

Manual, 2004).

$$S_{bond} = \pi(D + 2t) \cdot \tau_{Peak} \quad (3-6)$$

که τ_{Peak} حداکثر مقاومت برشی است که از نتایج تست‌های بیرون کشیدن بدست می‌آید و در صورت

عدم دسترسی به نتایج این تست‌ها می‌توان آن‌ها را توسط رابطه (۴-۶) برآورد نمود (UDEC Manual, 2004).

$$\tau_{Peak} = \tau_i \cdot Q_B \quad (4-6)$$

که τ_i تقریباً نصف مقاومت فشاری تک محوری سنگ یا دوغاب (ضعیف‌ترین ماده) و Q_B کیفیت

تماس بین دوغاب و سنگ (برای تماس کامل $Q_B = 1$) است.

از آنجایی که نرم افزار UDEC یک نرم افزار دو بعدی است، باید به روشی بتوان سیستم سه بعدی

تحلیل پیچ‌سنگ‌ها را بصورت تقریبی به دو بعدی تبدیل نمود. در صورتی که کابل‌ها در امتداد عمود بر صفحه

آنالیز با فواصل منظم (S) نصب شده باشند، آن‌گاه باید در تحلیل دوبعدی پارامترهای مربوط به کابل را (بجز

کرنش گسیختگی) بر S تقسیم نمود.

با توجه به اطلاعات فوق، پارامترهای مربوط به سیستم نگهداری شاتکریت و پیچ‌سنگ مطابق جدول

۱-۶ و ۲-۶ می‌باشد.

جدول ۱-۶ مشخصات شاتکریت مورد استفاده در مدل‌سازی

نسبت پواسون	مقاومت فشاری (MPa)	وزن مخصوص (Kg/m ³)	مدول یانگ (GPa)
۰/۲۵	۲۵	۲۲۰۰	۲۰

جدول ۶-۲ مشخصات پیچ‌سنگ‌های مورد استفاده در مدل‌سازی

ارزش معادل (فاصله طولی پیچ‌سنگ برابر ۲ متر)	ارزش پایه	پارامتر
۱۱۰	۲۲۰	مدول یانگ (GPa)
۰/۰۹	۰/۱۸	نیروی فشاری جاری شده (MN)
۰/۰۹	۰/۱۸	نیروی کششی جاری شدن (MN)
۲/۶	۵/۲	سختی دوغاب K_{bond} (GPa)
۰/۰۴	۰/۰۸	حداکثر نیروی برشی در واحد طول (MN/m/m)
۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	کرنش گسیختگی

روند مدل‌سازی بدین ترتیب است که ابتدا مدل زمین قبل از حفاری، تهیه شده و در ادامه پس از حفر

تونل، حل مدل آغاز شده و تا جایی ادامه می‌یابد که حدوداً ۵۰ درصد جابجایی‌های قابل ایجاد در صورت عدم

نصب نگهداری، حادث شود. در انتها سیستم نگهداری شبیه سازی شده و رفتار زمین و سیستم نگهداری مورد

ارزیابی قرار خواهد گرفت.

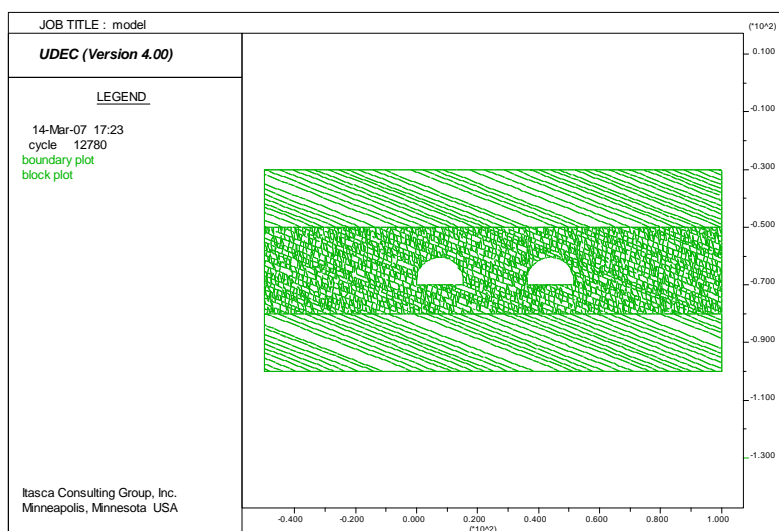
۶-۳- مدل‌سازی سیستم نگهداری

با توجه به شرایط زمین، تحلیل پایداری با استفاده از نرم افزار UDEC انجام گرفته است. مدلسازی به منظور تحلیل پایداری تونل‌ها و بررسی کارایی سیستم‌های نگهداری موقت پیشنهادی بارتن و بنیادسکی انجام می‌گیرد و مقاطع تهیه شده به منظور تحلیل، دارای حداکثر مقدار روباره در هر زون می‌باشند.

۴-۶- مدلسازی مقطع تونل در زون LM-1

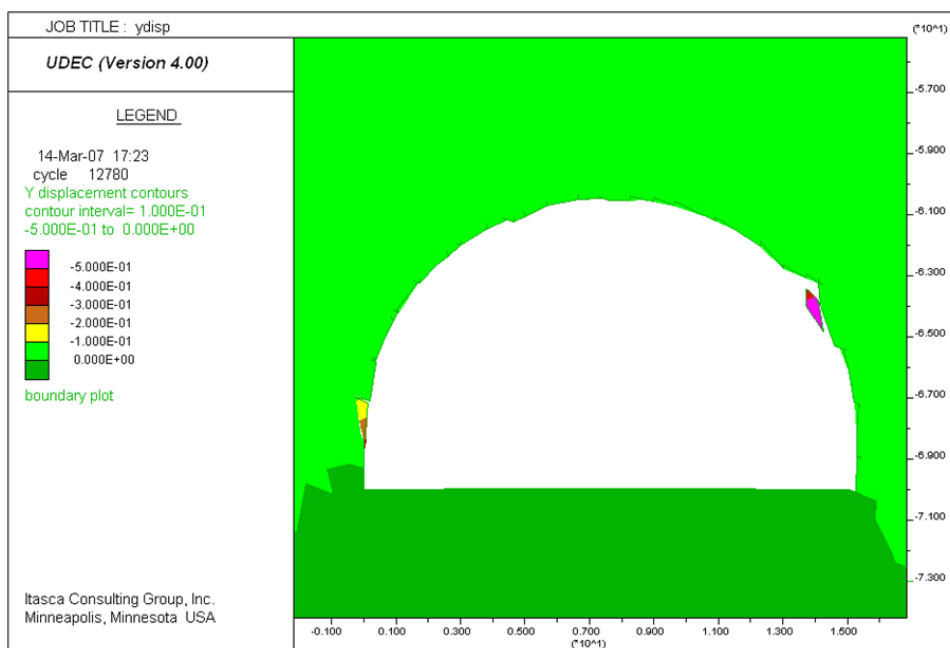
به منظور تحلیل پایداری تونل در زون LM-1 مدلی با ابعاد $70m \times 150m$ انتخاب شده است. مرزهای کناری مدل در جهت افقی و مرز پائینی در جهت قائم ثابت شده‌اند. مقطع انتخاب شده در زون LM-1 با روباره حداکثر ۷۰ متر انتخاب شده است. مدل ساخته شده در نرم افزار UDEC در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.

مقدار تنش قائم منطقه $1/9$ مگاپاسکال و تنش افقی نیز $1/9$ مگاپاسکال است ($k=1$). در ابتدا تنش‌های افقی و قائم منطقه ایجاد و مرحله تحکیم سازی مدل انجام شده است. پس از این مرحله، تونل حفر می‌شود و ابتدا اجرای برنامه تا زمان رسیدن مدل به حالت تعادل ادامه می‌یابد تا وضعیت پایداری زمین بدون نصب سیستم نگهداری مشخص شود.



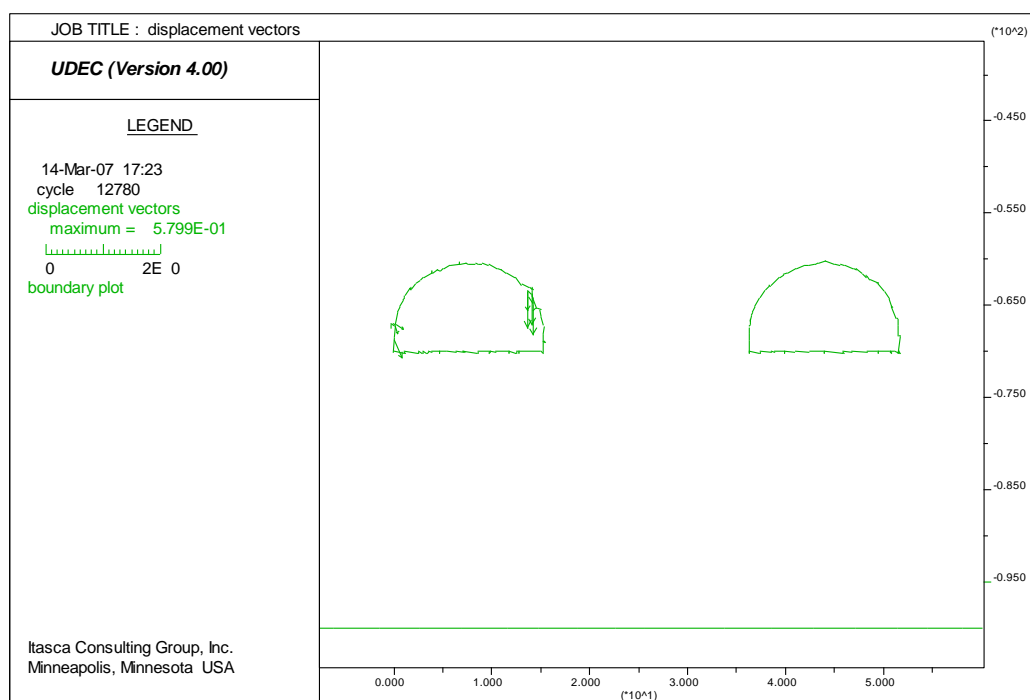
شکل ۱-۶ مدل ساخته شده از زون LM-1 در نرم افزار UDEC

نتایج حاصل از تحلیل مدل بدون نصب سیستم نگهداری که در شکل ۲-۶ آمده است نشان داد که در صورت عدم نصب سیستم نگهداری ریزش‌های بلوکی در دیواره راست و چپ تونل غربی اتفاق خواهد افتاد.



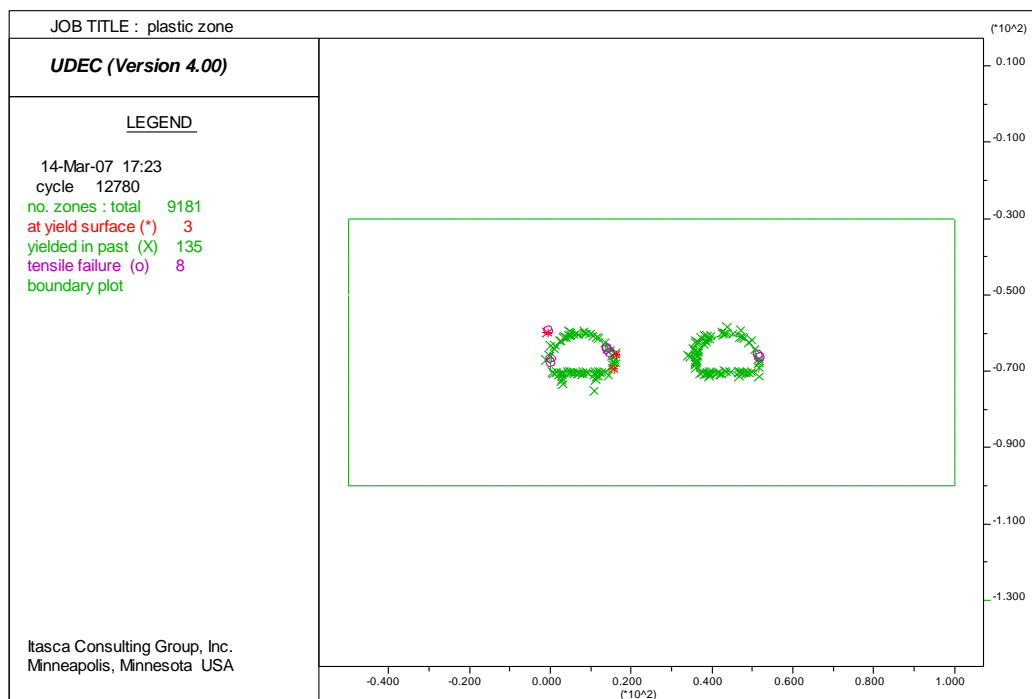
شکل ۲-۶ نمودار جابجایی در اطراف تونل غربی (خروجی جنوبی) بدون نصب سیستم نگهداری (زون LM-1)

ماکزیمم جابجایی اتفاق افتاده در سقف تونل‌ها ۱۰/۴ میلی‌متر می‌باشد که در حل مدل جهت نصب سیستم نگهداری باید مدل را ابتدا تا زمانی که جابجایی سقف به حدود ۵ میلی‌متر برسد باید تحلیل کرد و بعد سیستم نگهداری را نصب کرد. چون با استفاده از اطلاعات بدست آمده از مشاور میزان جابجایی قبل از نصب سیستم نگهداری حدود ۵۰٪ جابجایی کل در سقف است.



شکل ۳-۶ بردار جابجایی در اطراف تونل بدون نصب سیستم نگهداری (زون LM-1)

نمودار زون پلاستیک اطراف تونل که نشان دهنده نقاطی است که وارد حالت پلاستیک شده‌اند در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نقاط زیادی در اطراف تونل وارد شرایط پلاستیک شده‌اند.



شکل ۴-۶ منطقه پلاستیک ایجاد شده در زون LM-1 در نتیجه حفر تونلها

با توجه به نمودارها و شکل‌های آورده شده مشاهده شد که ضرورت نصب سیستم نگهداری در این منطقه از تونل وجود خواهد داشت. به این منظور و به منظور پایدار کردن گوه‌های تشکیل شده در اطراف تونل‌ها و همچنین کاهش جابجایی‌های ایجاد شده در سقف و دیواره‌ها و همچنین کاهش نقاط پلاستیک،

سیستم‌های نگهداری مختلفی مورد آزمایش و مدلسازی قرار گرفت و در نهایت استفاده از پیچ‌سنگ‌های تزریقی با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر مورد تأیید قرار گرفت.

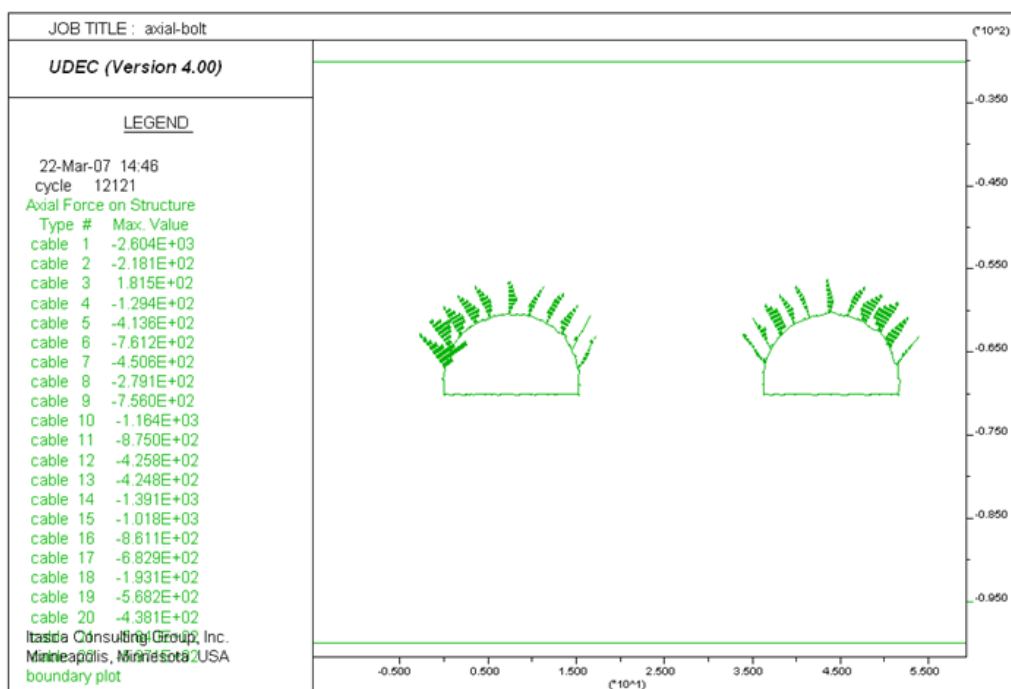
با استفاده از نیروی محوری و ممان خمشی وارد بر المان و محاسبه تنش‌های فشاری وارد بر هر المان شاتکریت، ضریب ایمنی برای هر المان محاسبه شد که مقدار ضریب محاسبه شده در همه المان‌ها بالاتر از ۱/۵ بوده که با توجه به آن که سیستم نگهداری طراحی شده موقت می‌باشد مناسب تشخیص داده شد. نمونه‌ای از این اطلاعات در جدول ۳-۶ آمده است.

همچنین مطابق شکل ۵-۶ حداکثر نیروی محوری پیچ‌سنگ معادل ۲/۶ کیلونیوتن است که با توجه به جدول ۳-۶، با در نظر گرفتن نیروی فشاری جاری شدن ۹۰ کیلونیوتن برای پیچ‌سنگ‌ها، نتایج بیانگر استقامت پیچ‌سنگ‌ها خواهند بود. در شکل ۶-۶ حداکثر نیروی برشی فصل مشترک دوغاب و پیچ‌سنگ نشان داده شده است. ماکزیمم نیروی برشی پیچ‌سنگ شماره ۱ و به میزان ۱/۷۴۴ کیلونیوتن در $\frac{1}{8}$ از طول پیچ‌سنگ ایجاد می‌شود. با توجه به جدول ۳-۶ حداکثر نیروی برشی قابل تحمل در واحد طول ۴۰ کیلونیوتن است که با توجه به حداکثر نیروی برشی ایجاد شده در مدل‌ها (۳/۵ کیلونیوتن در واحد طول) نتیجه می‌گردد که پیچ‌سنگ‌ها از ضریب اطمینان خوبی برخوردار هستند.

جدول ۳-۶ تنش فشاری و ضریب ایمنی مربوط به تعدادی از المان‌های تیر با ضخامت 10 cm (زون LM-1)

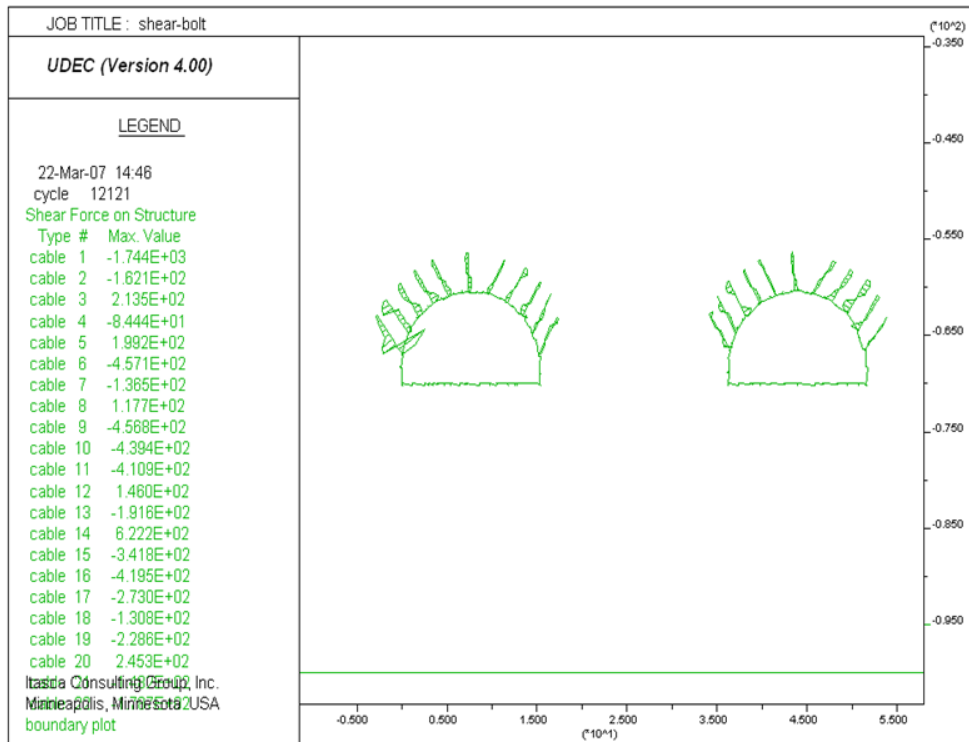
المان	نیروی محوری (N)	ممان خمشی (N-m)	تنش فشاری (Pa)	ضریب اطمینان
68	6.51E+05	-8.92E+02	7.04E+06	3.548898138
67	6.47E+05	2.09E+02	6.60E+06	3.788969552
66	5.62E+05	4.62E+02	5.89E+06	4.241414529
65	5.32E+05	-1.16E+03	6.01E+06	4.156552389

64	5.20E+05	6.35E+02	5.59E+06	4.476083391
63	4.95E+05	-3.79E+02	5.17E+06	4.832580095
62	4.60E+05	1.72E+03	5.63E+06	4.441759648
61	4.58E+05	-6.26E+02	4.96E+06	5.042640569
60	4.45E+05	-1.02E+03	5.06E+06	4.93954003
59	4.37E+05	6.90E+02	4.79E+06	5.223503257
58	4.50E+05	2.66E+02	4.66E+06	5.368654787
57	4.46E+05	-5.04E+03	7.49E+06	3.339210344
56	4.51E+05	3.67E+03	6.71E+06	3.727448934
55	4.51E+05	6.28E+03	8.27E+06	3.0218784
54	4.50E+05	-3.27E+03	6.46E+06	3.870807915
53	5.47E+05	-8.80E+03	1.08E+07	2.32553813
52	5.01E+05	1.89E+04	1.63E+07	1.530643483
51	4.99E+05	-1.19E+04	1.21E+07	2.058629776



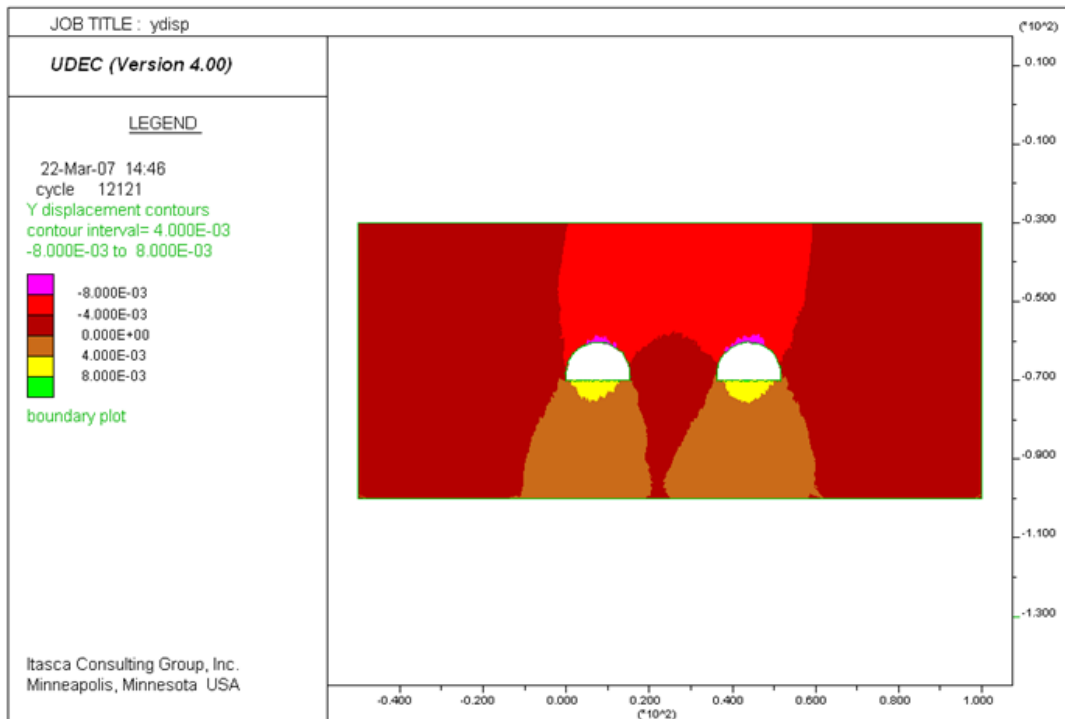
شکل ۵-۶ نیروی محوری پیچ‌سنگ‌های تونل در زون LM-1

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر



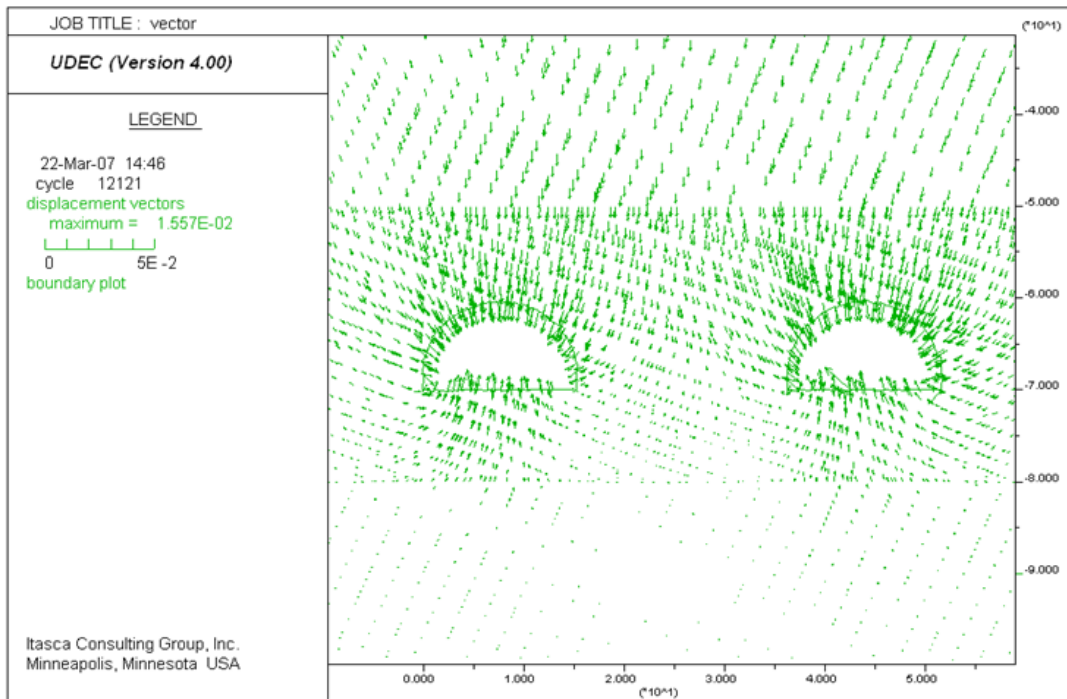
شکل ۶-۶ نیروی برشی پیچ‌سنگ‌های تونل در زون LM-1

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر



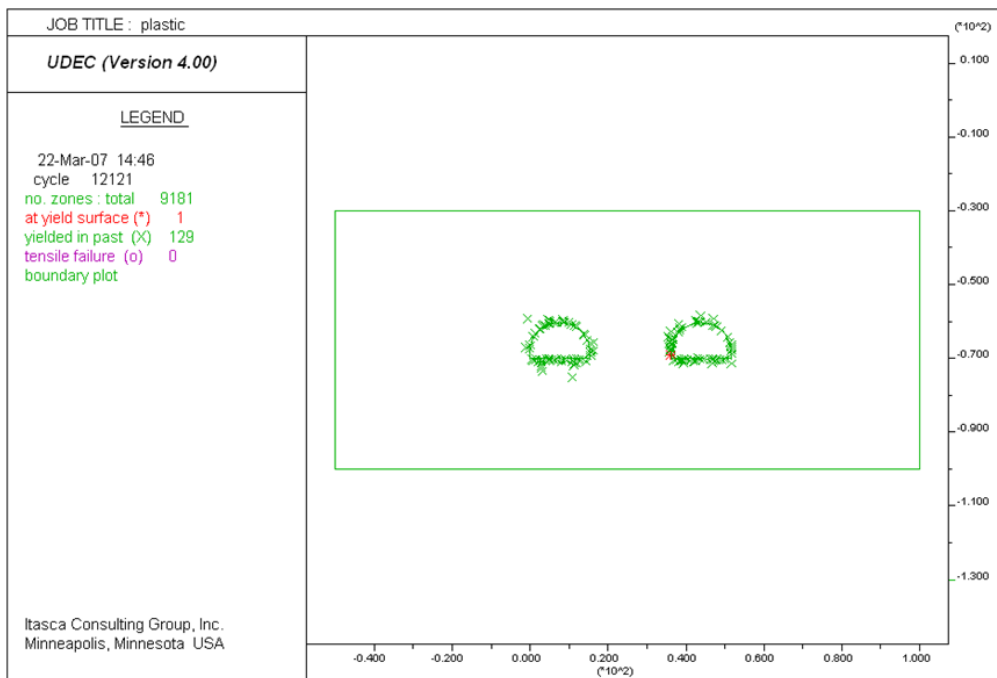
شکل ۶-۷ نمودار جابجایی در اطراف تونل‌ها در زون LM-1

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر



شکل ۶-۸ بردار جابجایی‌ها در اطراف تونل‌ها در زون LM-1

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر



شکل ۶-۹ منطقه پلاستیک ایجاد شده در تونل در زون LM-1

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر

البته به منظور طراحی ضخامت شاتکریت ابتدا اجرای یک لایه شاتکریت به ضخامت ۵ سانتی‌متر مدل

شد که با توجه به خروجی‌های بدست آمده که نمونه‌ای از آن در جدول ۶-۴ آمده است، ضریب اطمینان تعداد

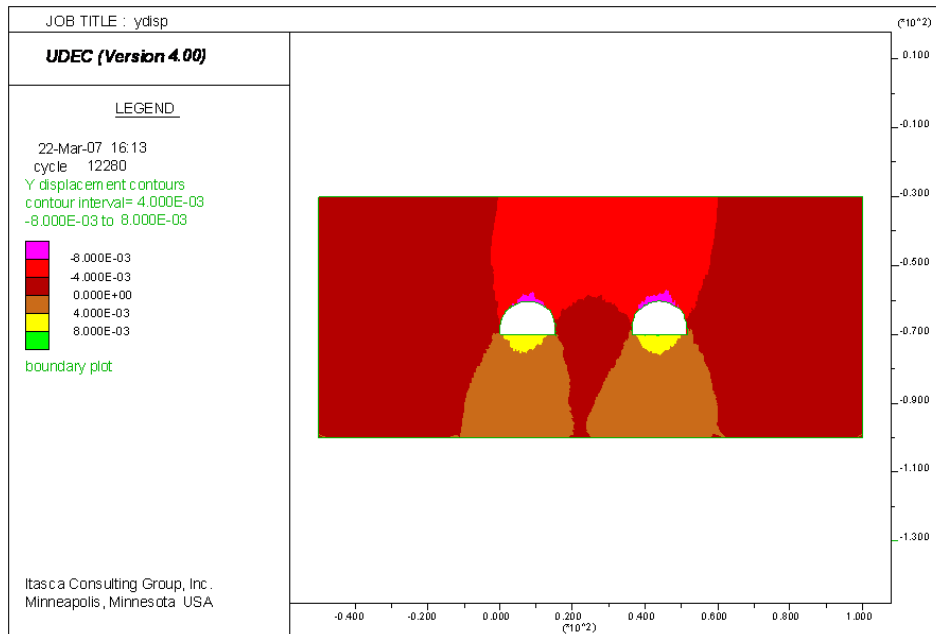
زیادی از المان‌های شاتکریت کمتر از ۱/۵ خواهد بود.

جدول ۶-۴ تنش فشاری و ضریب ایمنی تعدادی از المان‌های تیر با ضخامت 5 cm (زون LM-1)

المان	نیروی محوری (N)	ممان خمشی (N·m)	تنش فشاری (Pa)	ضریب اطمینان
55	2.14E+05	3.19E+03	1.19E+07	2.093662066
54	2.14E+05	-1.58E+03	8.08E+06	3.095898554
53	2.26E+05	-3.92E+03	1.39E+07	1.796441608
52	2.07E+05	8.38E+03	2.42E+07	1.031234016
51	2.06E+05	-4.83E+03	1.57E+07	1.591951095
50	2.08E+05	2.92E+02	4.86E+06	5.145811721
49	1.94E+05	3.89E+02	4.82E+06	5.183968681
48	1.83E+05	-1.46E+03	7.16E+06	3.490450128
47	1.74E+05	-2.73E+03	1.00E+07	2.495408448
46	1.73E+05	8.97E+03	2.50E+07	1.000720519
45	1.73E+05	-5.94E+03	1.77E+07	1.411950751
44	1.81E+05	1.22E+03	6.53E+06	3.82614019
43	1.54E+05	7.32E+02	4.84E+06	5.161535412
42	1.57E+05	-4.72E+03	1.45E+07	1.72661473
41	1.59E+05	7.28E+03	2.06E+07	1.211099485

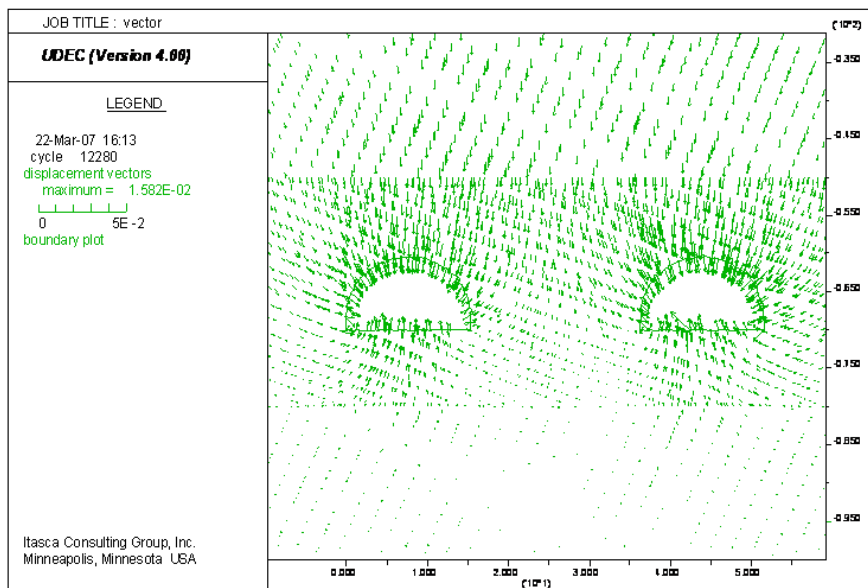
نمودارهای مربوط به جابجایی‌ها، زون پلاستیک و نیروهای وارد بر المان‌های پیچ‌سنگ‌ها و شاتکریت،

در این حالت در اشکال ۶-۱۰ تا ۶-۱۵ آورده شده است.



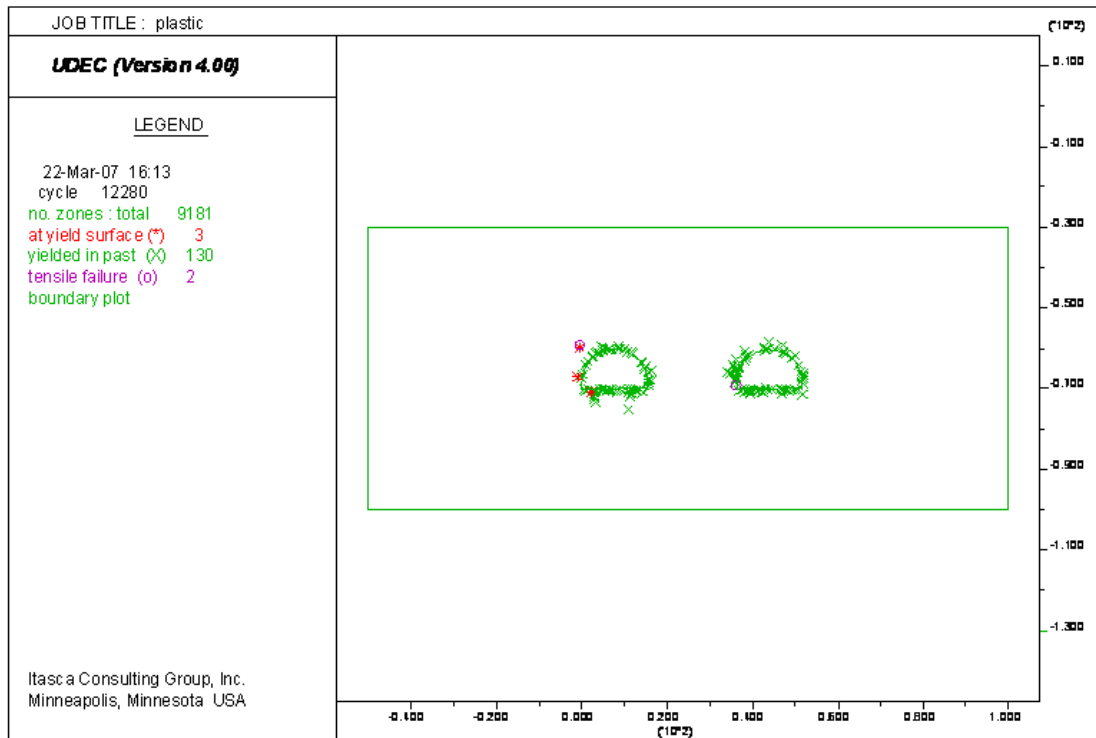
شکل ۶-۱۰ نمودار جابجایی در اطراف تونل‌ها بعد از نصب

پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر (زون LM-1)



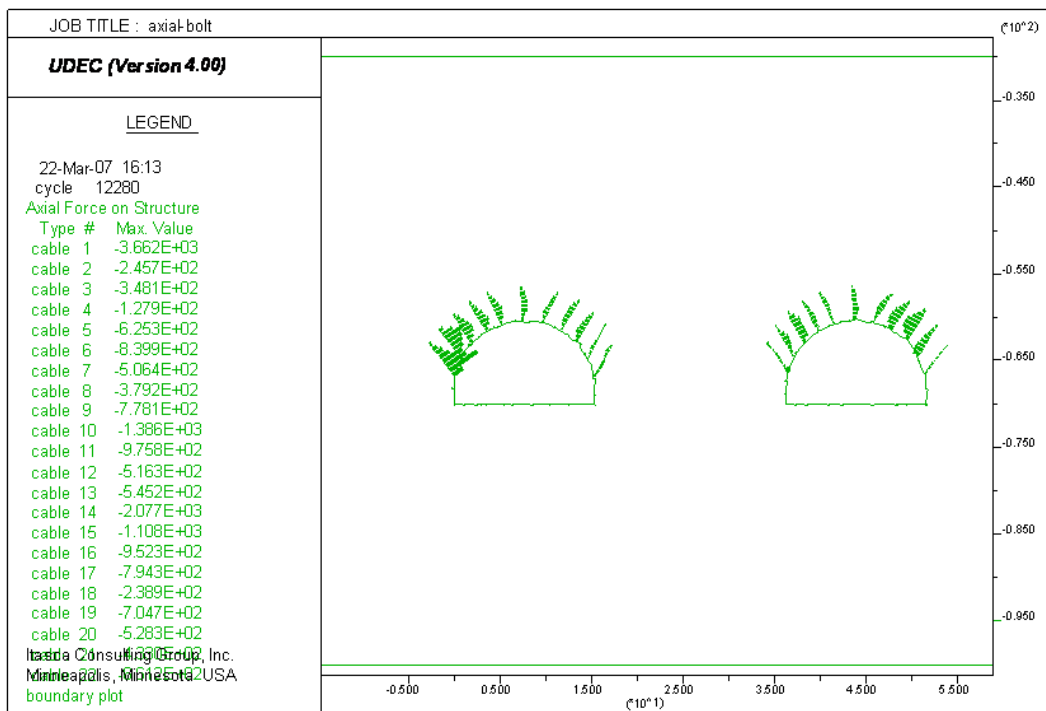
شکل ۶-۱۱ بردار جابجایی‌ها در اطراف تونل‌ها بعد از نصب

پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر (زون LM-1)



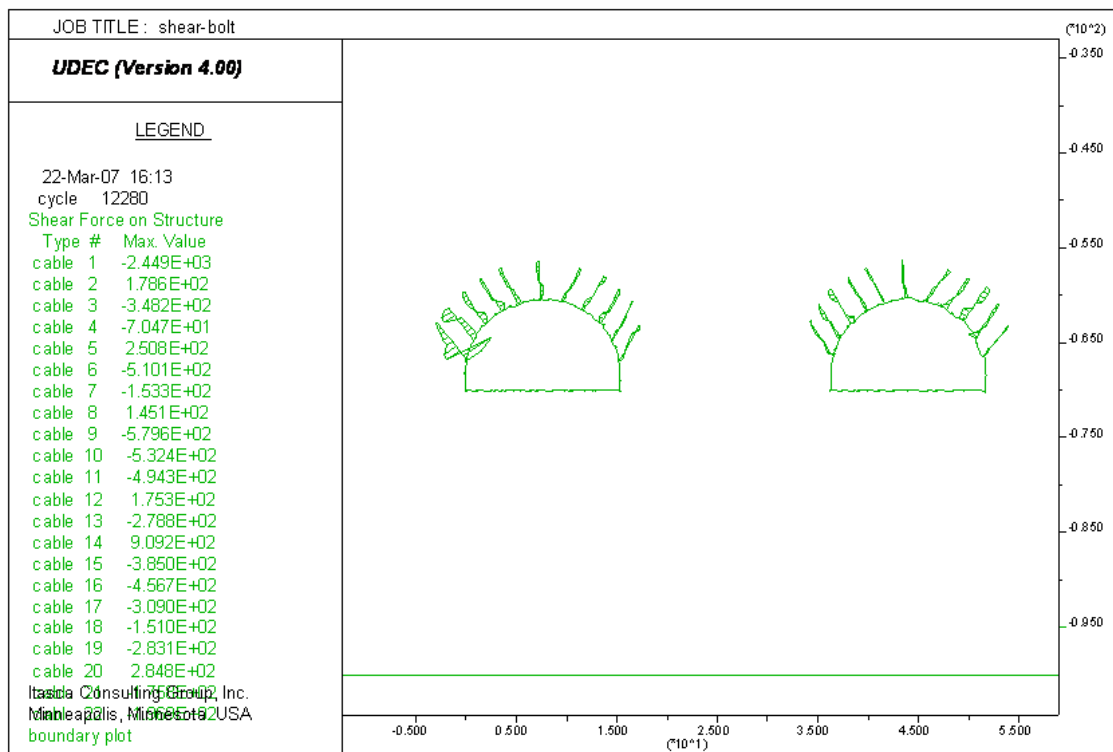
شکل ۶-۱۲ منطقه پلاستیک ایجاد شده در مقطع بعد از نصب

پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر (زون LM-1)



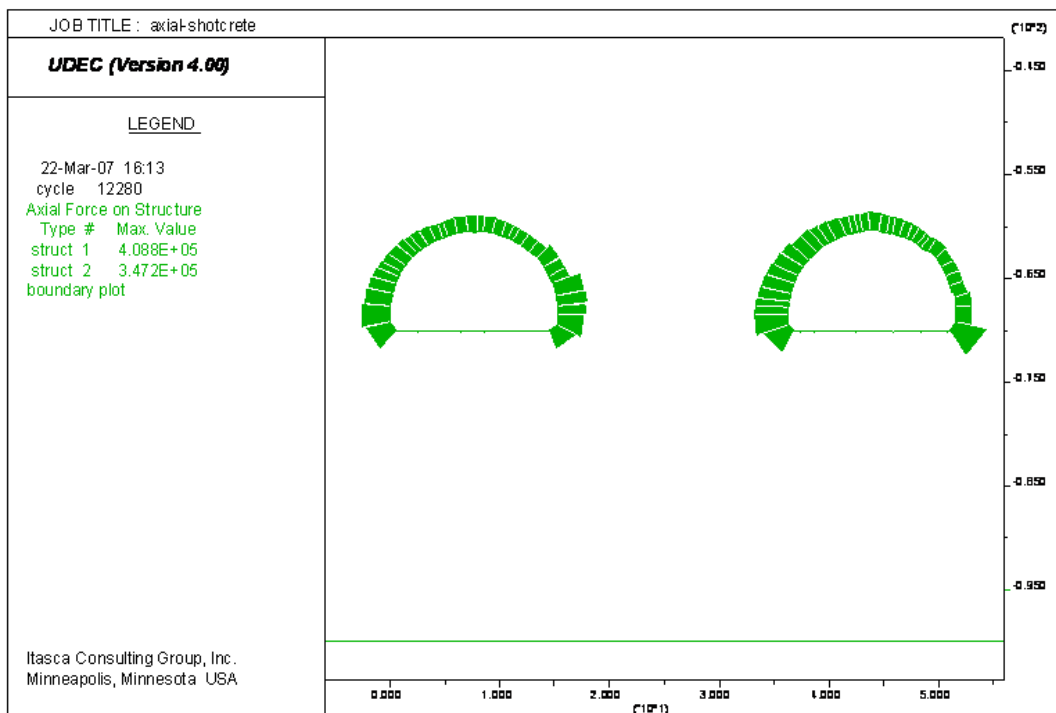
شکل ۶-۱۳ نیروی محوری پیچ‌سنگ‌های تونل در زون LM-1

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر



شکل ۶-۱۴ نیروی برشی پیچ‌سنگ‌های تونل در زون LM-1

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر



شکل ۶-۱۵ نیروی محوری شاتکریت در زون LM-1

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر

۶-۵- مدل‌سازی مقطع تونل در LM-2

مدل ساخته شده جهت تحلیل زون LM-2 از نظر ابعاد همانند زون LM-1 می‌باشد و تفاوت آن ناشی

از شیب و جهت شیب متفاوت ناپیوستگی‌ها و لایه‌بندی در این دو زون می‌باشد. مدل ساخته شده در نرم افزار

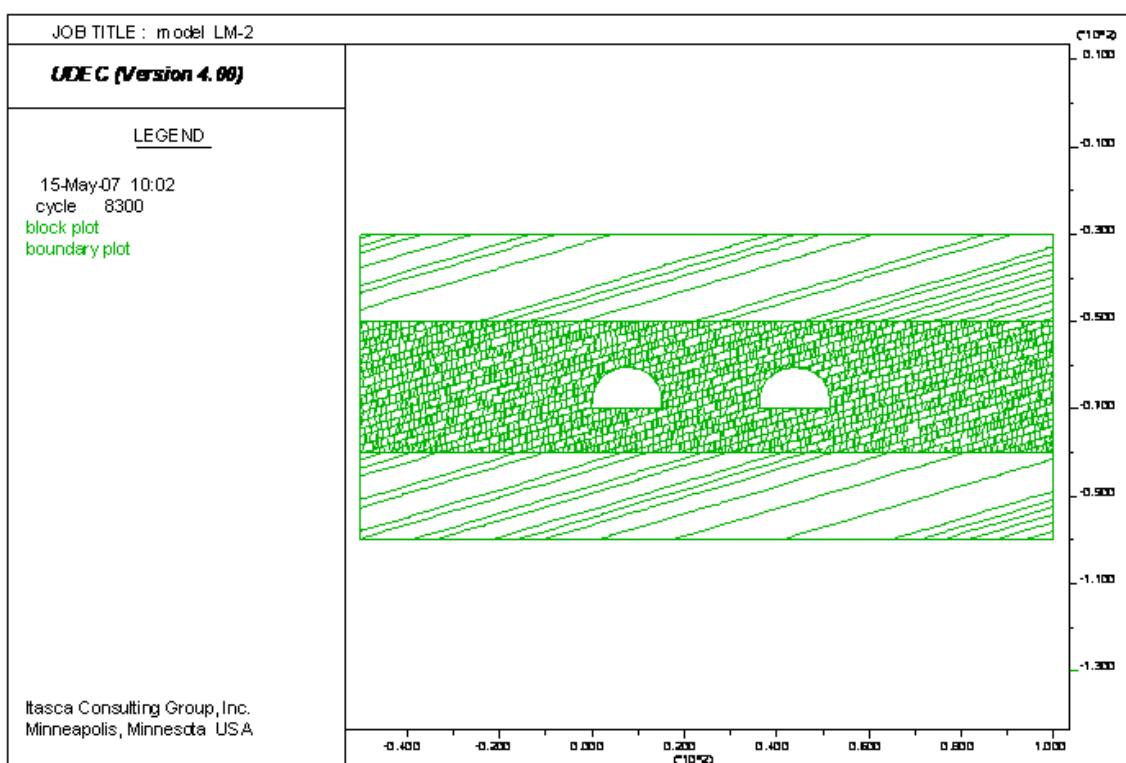
UDEC در شکل ۶-۱۶ نشان داده شده است.

مقدار تنش قائم منطقه ۱/۹ مگاپاسکال و تنش افقی نیز ۱/۹ مگاپاسکال است ($k=1$). در ابتدا تنش‌های

افقی و قائم منطقه ایجاد و مرحله تحکیم سازی مدل انجام شده است. پس از این مرحله، تونل حفر می‌شود

و ابتدا اجرای برنامه تا زمان رسیدن مدل به حالت تعادل ادامه می‌یابد تا وضعیت پایداری زمین بدون نصب

سیستم نگهداری مشخص شود.

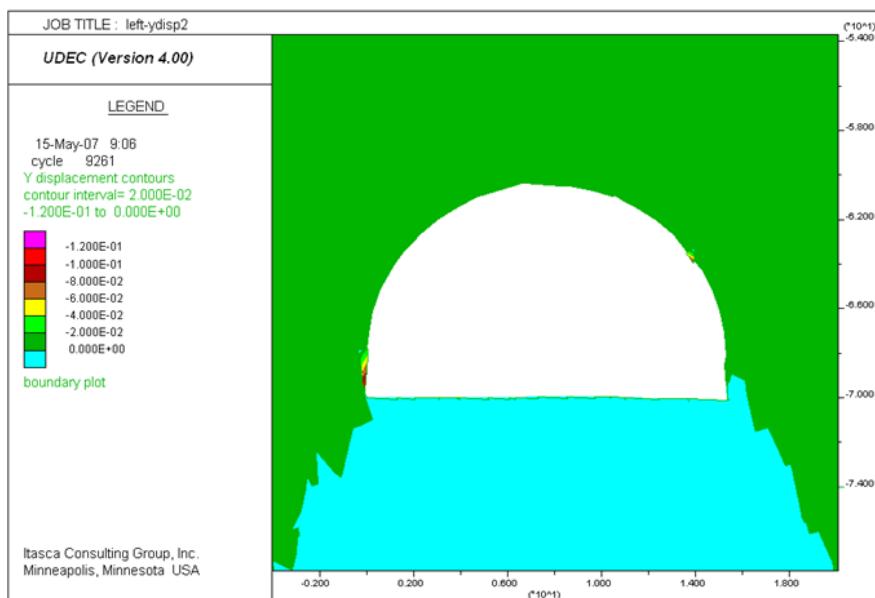


شکل ۶-۱۶ مدل ساخته شده از زون LM-2 در نرم افزار UDEC

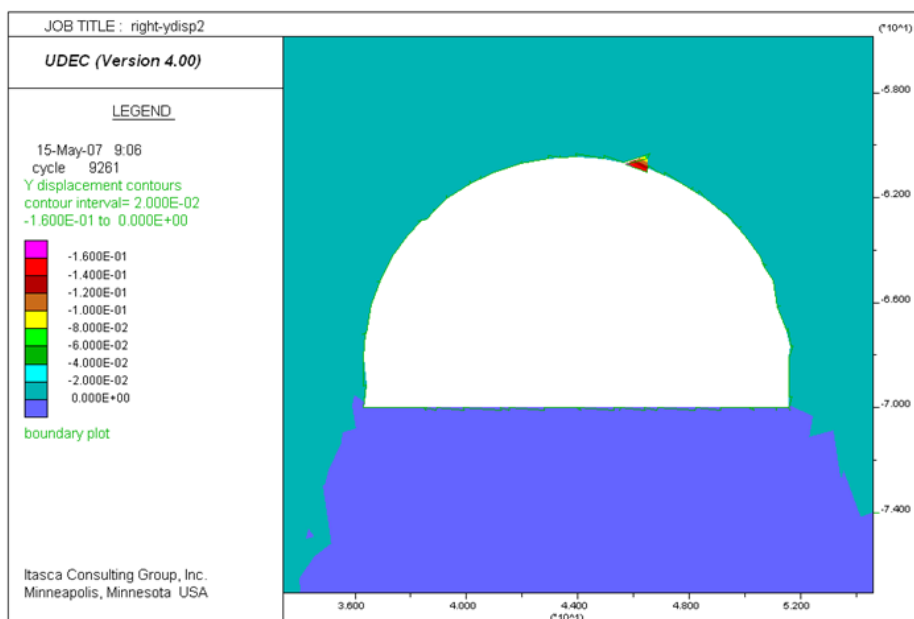
نتایج حاصل از حل مدل بدون نصب سیستم نگهداری که در شکل ۶-۱۷ و ۶-۱۸ آمده است نشان

داد که در صورت عدم نصب سیستم نگهداری، ریزش‌های بلوکی در دیواره‌ها و سقف هر دو تونل اتفاق خواهد

افتاد.



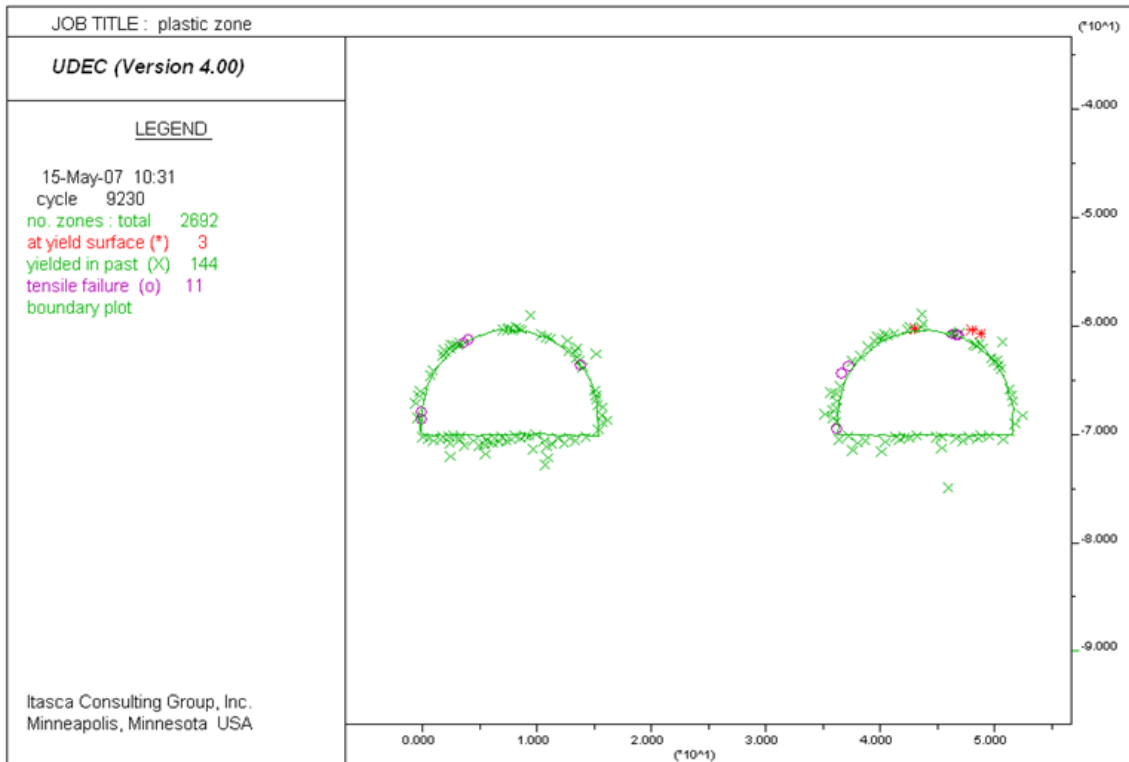
شکل ۶-۱۷ نمودار جابجایی در اطراف تونل ورودی جنوبی بدون نصب سیستم نگهداری (زون LM-2)



شکل ۶-۱۸ نمودار جابجایی در اطراف تونل خروجی شمالی بدون نصب سیستم نگهداری (زون LM-2)

ماکزیمم جابجایی اتفاق افتاده در سقف تونل ها ۹/۳ میلیمتر می باشد که در حل مدل جهت نصب سیستم نگهداری همانند زون LM-1 مدل را تا زمانی که ۵۰٪ جابجایی کل اتفاق افتد باید حل کرد و سپس اقدام به نصب سیستم نگهداری نمود.

نمودار زون پلاستیک اطراف تونل که نشان دهنده نقاطی است که وارد حالت پلاستیک شده اند در شکل ۶-۱۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود شعاع پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل ها بسیار محدود می باشد ولی به هر حال اجرای سیستم نگهداری به منظور کنترل سقوط گوه ها و همچنین جلوگیری از هوازدگی توده سنگ ضروری می باشد.



شکل ۶-۱۹ منطقه پلاستیک ایجاد شده در زون LM-2 در نتیجه حفر تونل‌ها

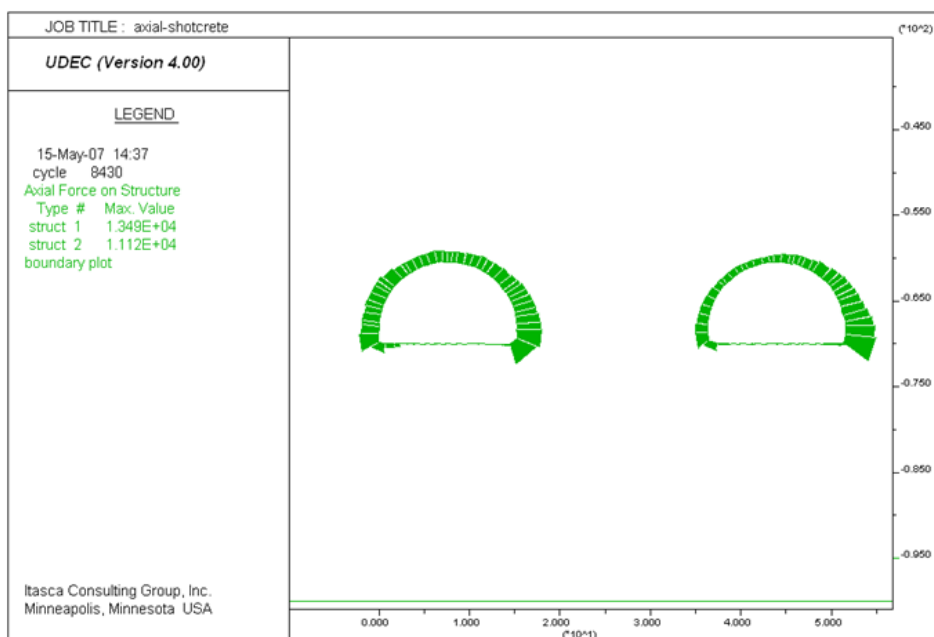
به این منظور و به منظور پایدار کردن گوه‌های تشکیل شده در اطراف تونل‌ها و همچنین کاهش جابجایی‌های ایجاد شده در سقف و دیواره‌ها و همچنین کاهش نقاط پلاستیک، سیستم‌های نگهداری مختلفی مورد آزمایش و مدلسازی قرار گرفت و در نهایت استفاده از پیچ‌سنگ‌های تزریقی با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر مورد تأیید قرار گرفت.

با استفاده از نیروی محوری و ممان خمشی وارد بر المان تیر و محاسبه تنش‌های فشاری وارد بر هر المان ضریب ایمنی برای هر المان تیر محاسبه شد که مقدار ضریب محاسبه شده در همه المان‌ها بالاتر از ۱/۵ بوده که با توجه به آن که سیستم نگهداری طراحی شده موقت می‌باشد مناسب تشخیص داده شد. نمونه ای از این اطلاعات در جدول ۶-۵ آمده است.

جدول ۶-۵ تنش فشاری و ضریب ایمنی تعدادی از المان‌های تیر با ضخامت 5 cm (زون LM-2)

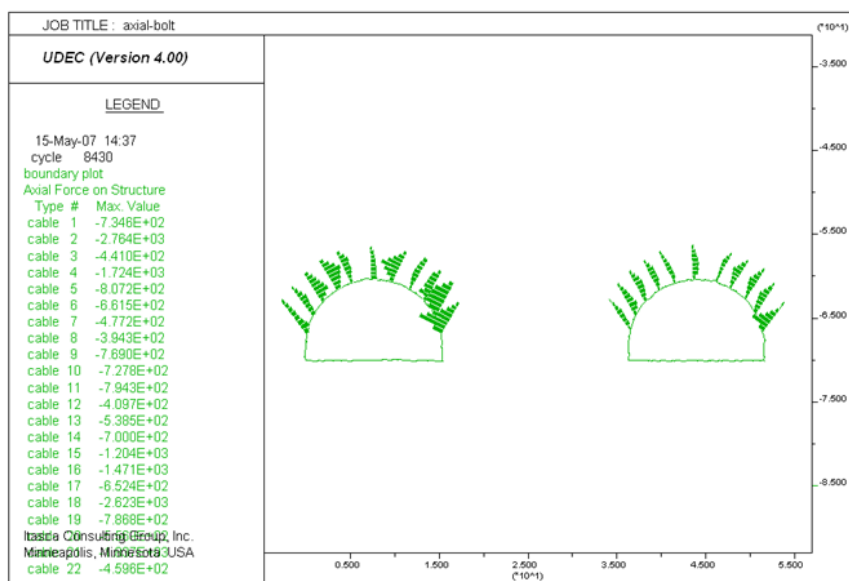
المان	نیروی محوری (N)	ممان خمشی (N-m)	تنش فشاری (Pa)	ضریب اطمینان
82	3.09E+03	-5.32E+03	1.28E+07	1.9478627
81	5.64E+03	1.45E+03	3.58E+06	6.9771596
80	5.27E+03	2.21E+03	5.41E+06	4.6194668
42	1.59E+03	2.05E+03	4.96E+06	5.0389816
41	4.27E+03	-6.80E+03	1.64E+07	1.523439
40	8.65E+03	2.16E+03	5.37E+06	4.6585298
39	7.66E+03	2.20E+03	5.44E+06	4.5972615
38	7.64E+03	-1.50E+03	3.75E+06	6.6616216
3	1.11E+04	-2.25E+03	5.62E+06	4.4522012
2	9.51E+03	6.77E+03	1.64E+07	1.5215161
1	3.62E+02	-2.03E+03	4.89E+06	5.1136959

همچنین مطابق شکل ۶-۲۱ نیروی محوری پیچ سنگ معادل ۲/۷۶۴ کیلونیوتن است که با توجه به جدول ۶-۲، با در نظر گرفتن نیروی فشاری جاری شدن ۹۰ کیلونیوتن برای پیچ سنگ‌ها، نتایج بیانگر استقامت پیچ سنگ‌ها خواهند بود. در شکل ۶-۲۲ حداکثر نیروی برشی فصل مشترک دوغاب و پیچ سنگ نشان داده شده است. ماکزیمم نیروی برشی پیچ سنگ شماره ۲ و به میزان ۱/۷۶ کیلونیوتن در $\frac{1}{8}$ از طول پیچ سنگ ایجاد می‌شود. با توجه به جدول ۶-۲ حداکثر نیروی قابل تحمل در واحد طول ۴۰ کیلونیوتن است که با توجه به حداکثر نیروی برشی ایجاد شده در مدل‌ها (۳/۵۲ کیلونیوتن در واحد طول) نتیجه می‌گردد که پیچ سنگ‌ها از ضریب اطمینان خوبی برخوردارند.



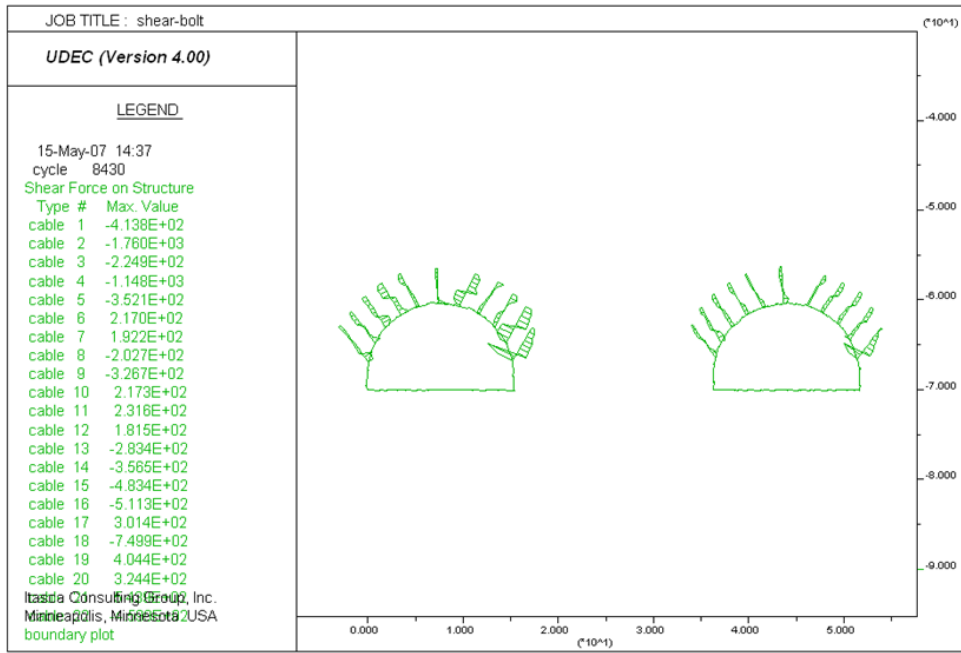
شکل ۶-۲۰ نیروی محوری شاتکریت در زون LM-2

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر



شکل ۶-۲۱ نیروی محوری پیچ‌سنگ‌های تونل در زون LM-2

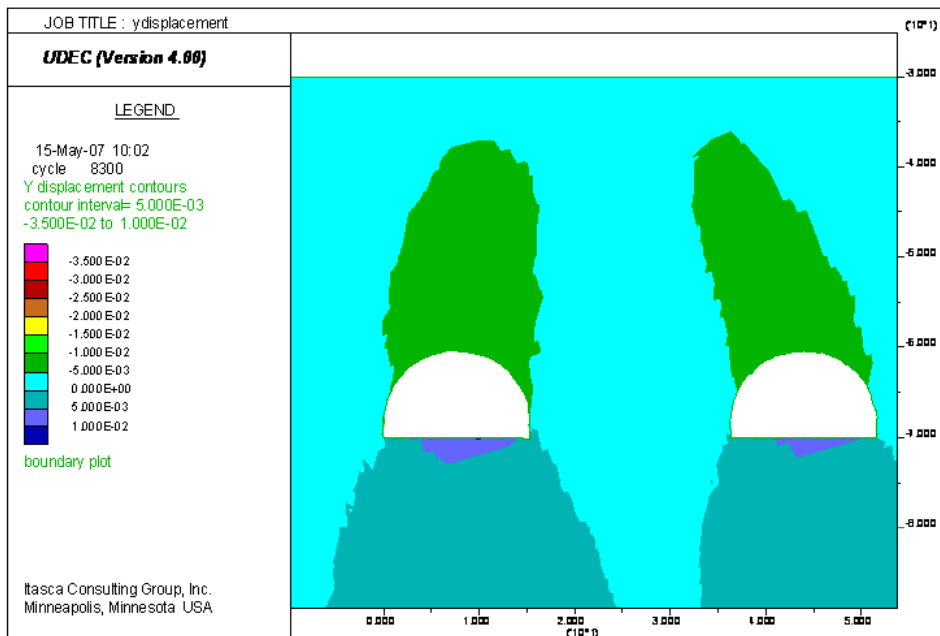
بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر



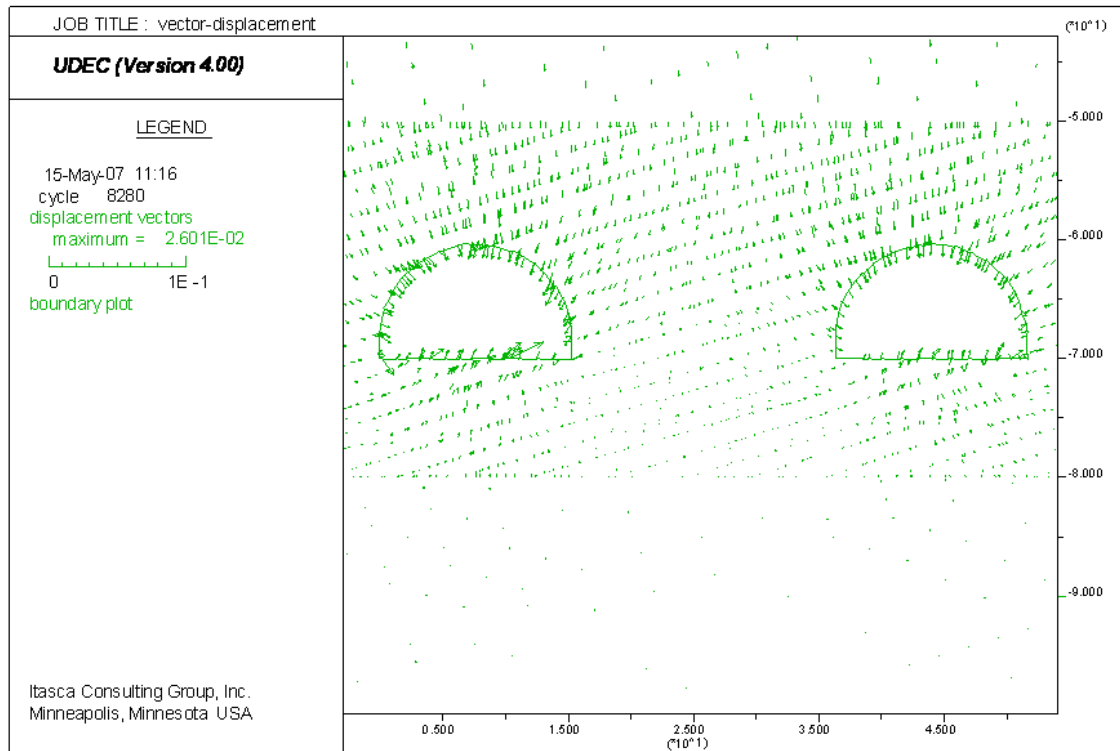
شکل ۶-۲۲ نیروی برشی پیچ‌سنگ‌های تونل در زون LM-2

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر

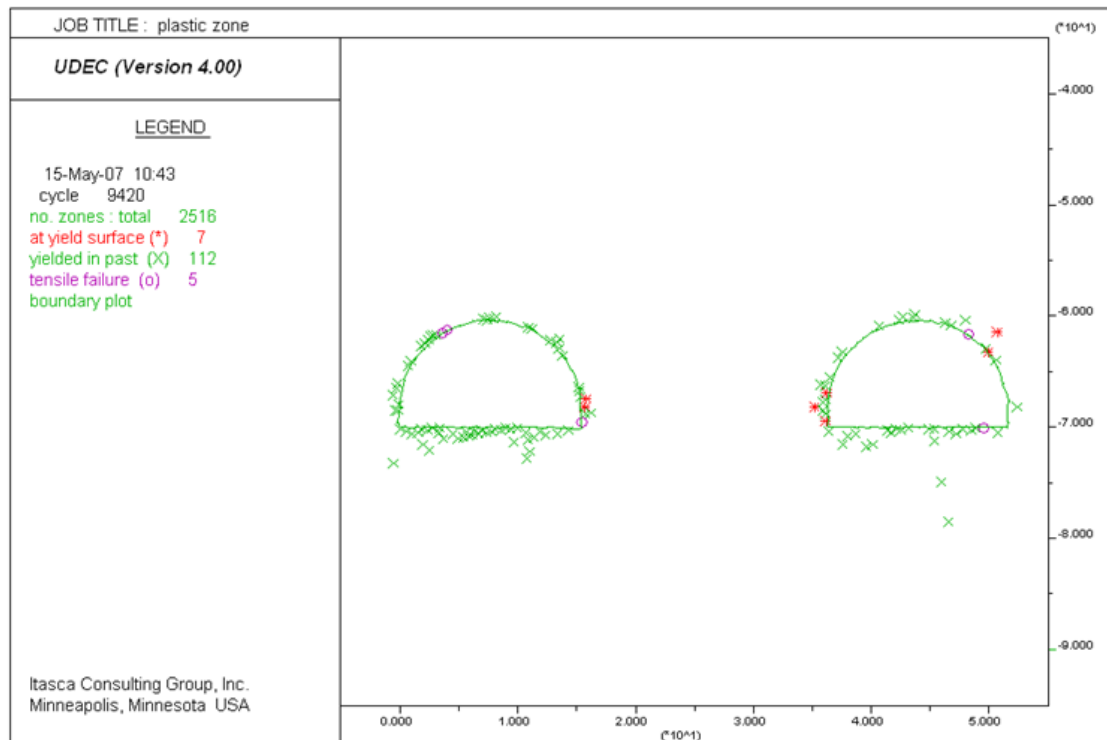
نمودار جابجایی و منطقه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل در شکل‌های زیر نشان داده شده‌است.



شکل ۶-۲۳ نمودار جابجایی در اطراف تونل‌ها بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر (زون LM-2)



شکل ۶-۲۴ بردار جابجایی‌ها در اطراف تونل‌ها بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر (زون LM-2)

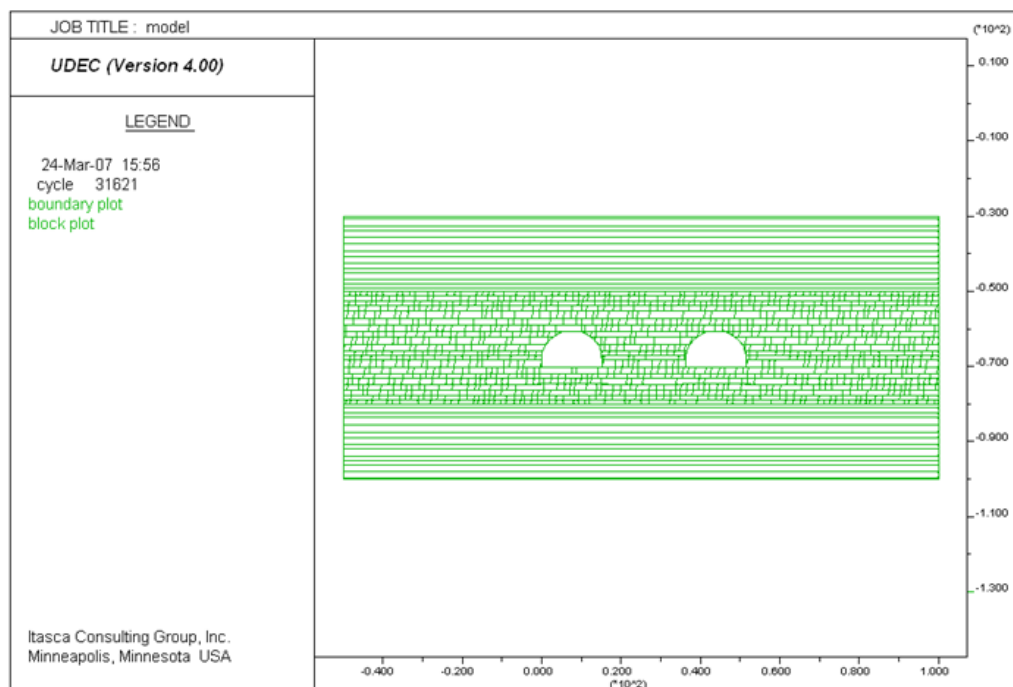


شکل ۶-۲۵ منطقه پلاستیک ایجاد شده در مقطع بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی‌متر (زون LM-2)

با توجه به شکل ۶-۲۵ سیستم نگهداری نصب شده تأثیر چندانی در کاهش منطقه پلاستیک نداشته ولی با این حال وظیفه خود را در کنترل جابجایی‌ها و ریزش گوه‌ها با ضریب اطمینان قابل قبولی، به انجام رسانده است.

۶-۶- مدلسازی مقطع تونل در CZ

به منظور تحلیل پایداری تونل در زون CZ مدلی با ابعاد $70m \times 150m$ انتخاب شده است. مرزهای کناری مدل در جهت افقی و مرز پائینی در جهت قائم ثابت شده‌اند. مقطع انتخاب شده در زون CZ با روباره حداکثر ۷۰ متر انتخاب شده است. مدل ساخته شده در نرم افزار UDEC در شکل ۶-۲۶ نشان داده شده است.



شکل ۶-۲۶ مدل ساخته شده از زون CZ در نرم افزار UDEC

مقدار تنش قائم منطقه ۱/۹ مگاپاسکال و تنش افقی نیز ۱/۹ مگاپاسکال است ($k=1$). در ابتدا

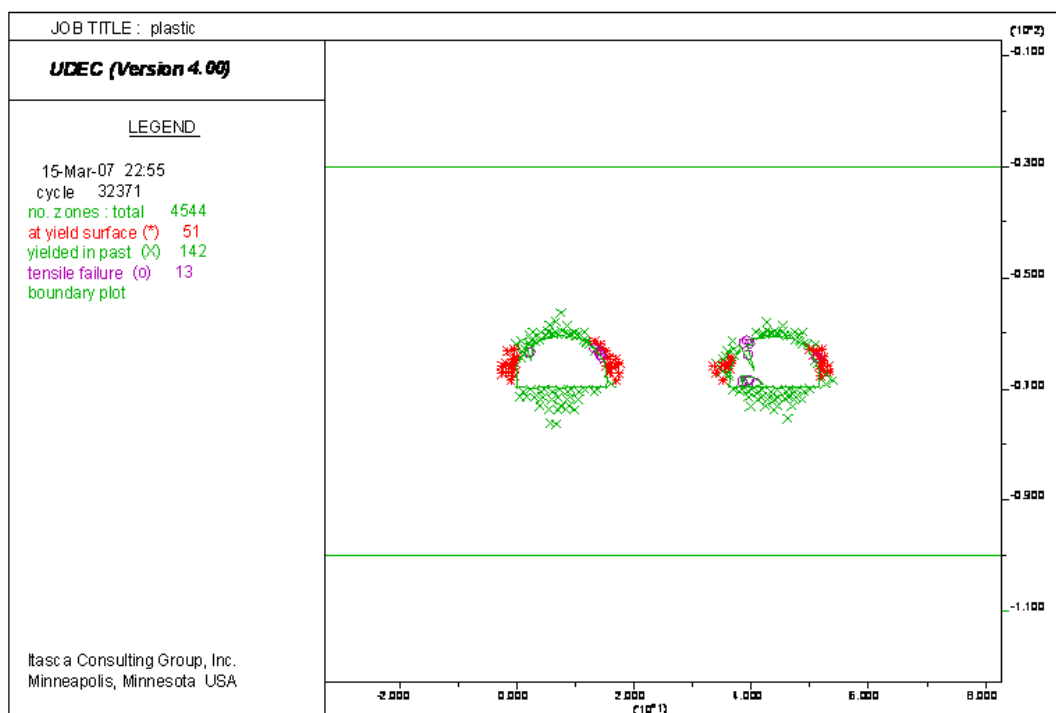
تنش‌های افقی و قائم منطقه ایجاد و مرحله تحکیم سازی مدل انجام شده است. پس از این مرحله، تونل حفر می‌شود و ابتدا اجرای برنامه تا زمان رسیدن مدل به حالت تعادل ادامه می‌یابد تا وضعیت پایداری زمین بدون نصب سیستم نگهداری مشخص شود.

همانطور که در شکل ۶-۲۷ مشاهده می‌شود شعاع پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل‌ها در نتیجه

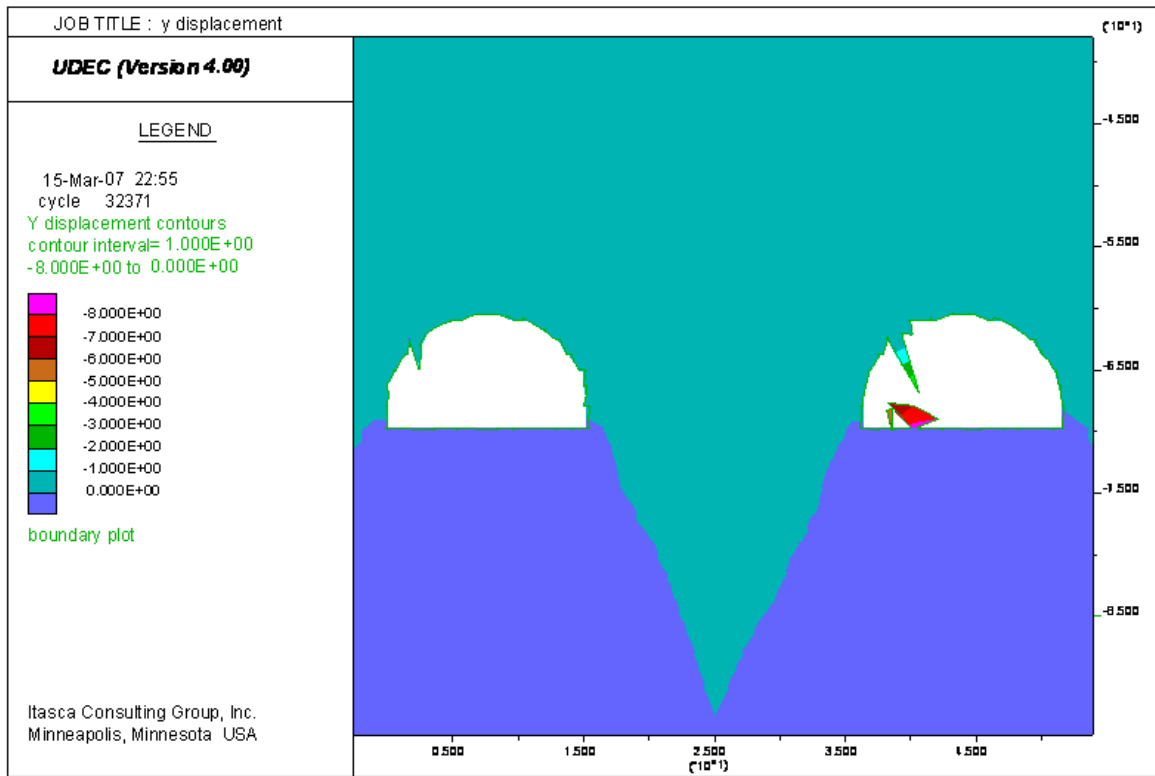
حفر آن‌ها بسیار وسیع بوده و عدم کنترل آن ممکن است باعث ناپایداری و ریزش در اطراف تونل‌ها شود. به

طوری‌که با توجه به شکل ۶-۲۸ و ۶-۲۹ ریزش بلوکی در جداره‌های هر دو تونل اتفاق خواهد افتاد و استفاده

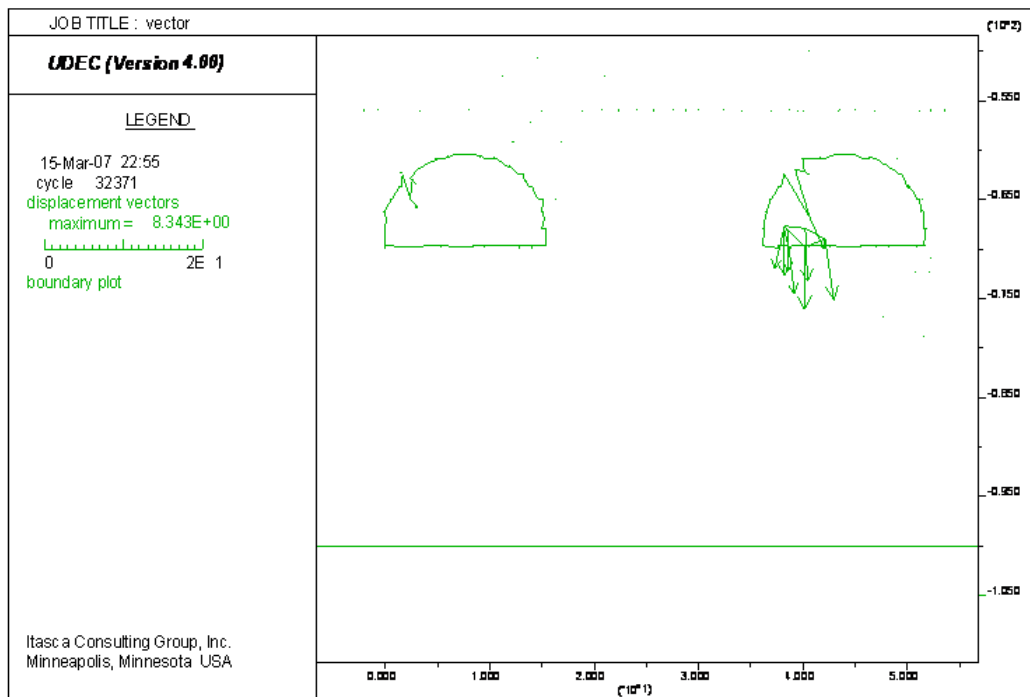
از یک سیستم نگهداری قوی در این مقطع امری بدیهی به نظر می‌آید.



شکل ۶-۲۷ منطقه پلاستیک ایجاد شده در زون CZ بدون نصب سیستم نگهداری



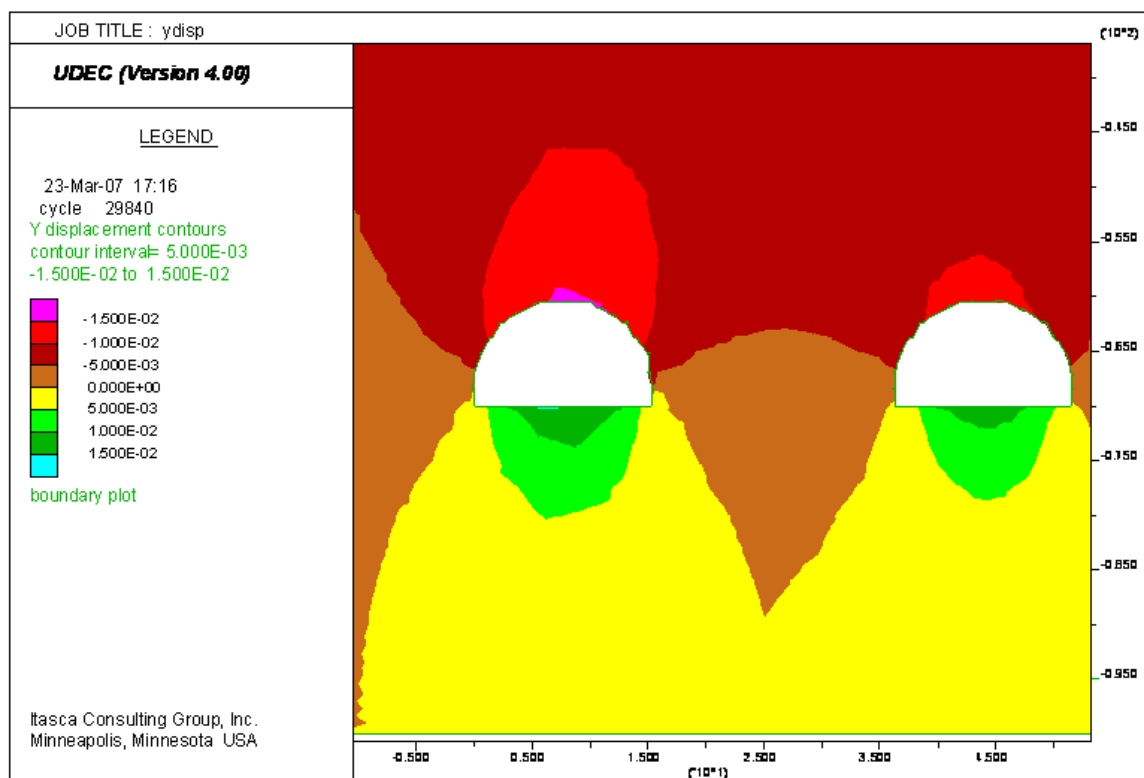
شکل ۶-۲۸ نمودار جابجایی در زون CZ بدون نصب سیستم نگهداری



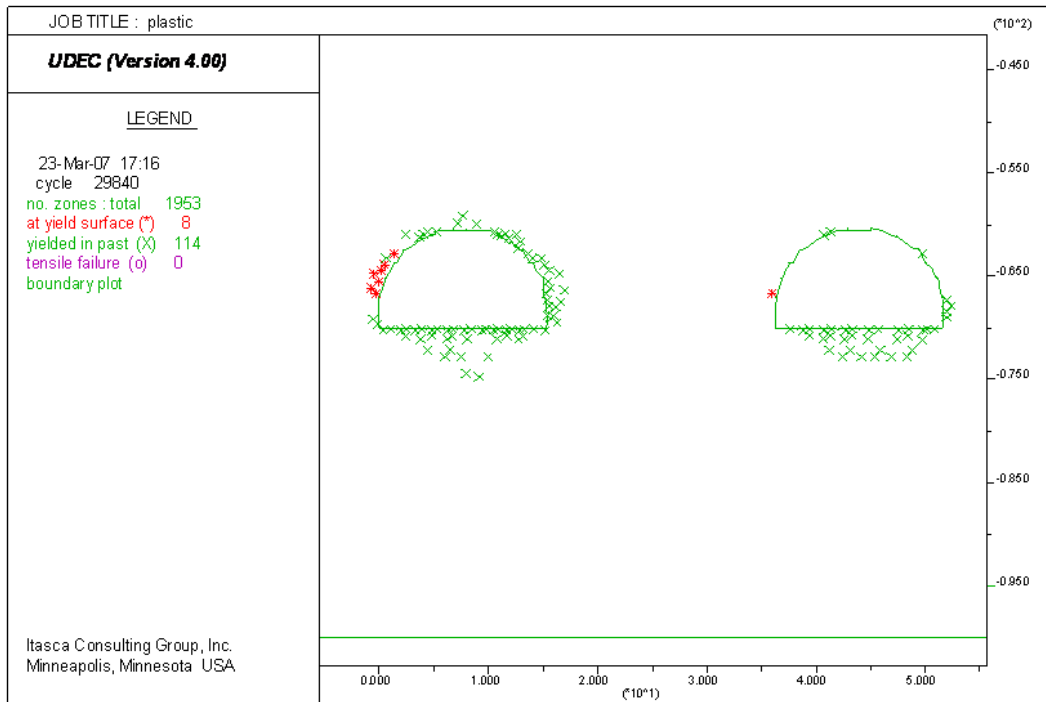
شکل ۶-۲۹ بردار جابجایی در زون CZ بدون نصب سیستم نگهداری

یافتن یک سیستم نگهداری برای این زون خرد شده بسیار مشکل است. با این حال با تلاش‌های زیادی موفق به یافتن چند نوع سیستم نگهداری شدیم که تا حدودی شرایط نامطلوب این زون را بهبود می‌بخشد. نکته قابل توجه این است که سیستم نگهداری باید بلافاصله و با حداقل تأخیر نصب شود. سیستم نگهداری ارائه شده پیچ‌سنگ‌های ۶ متری با فاصله داری ۱ متر در جهت عمود بر مدل است و تعداد آن‌ها در هر مقطع ۱۱ عدد است.

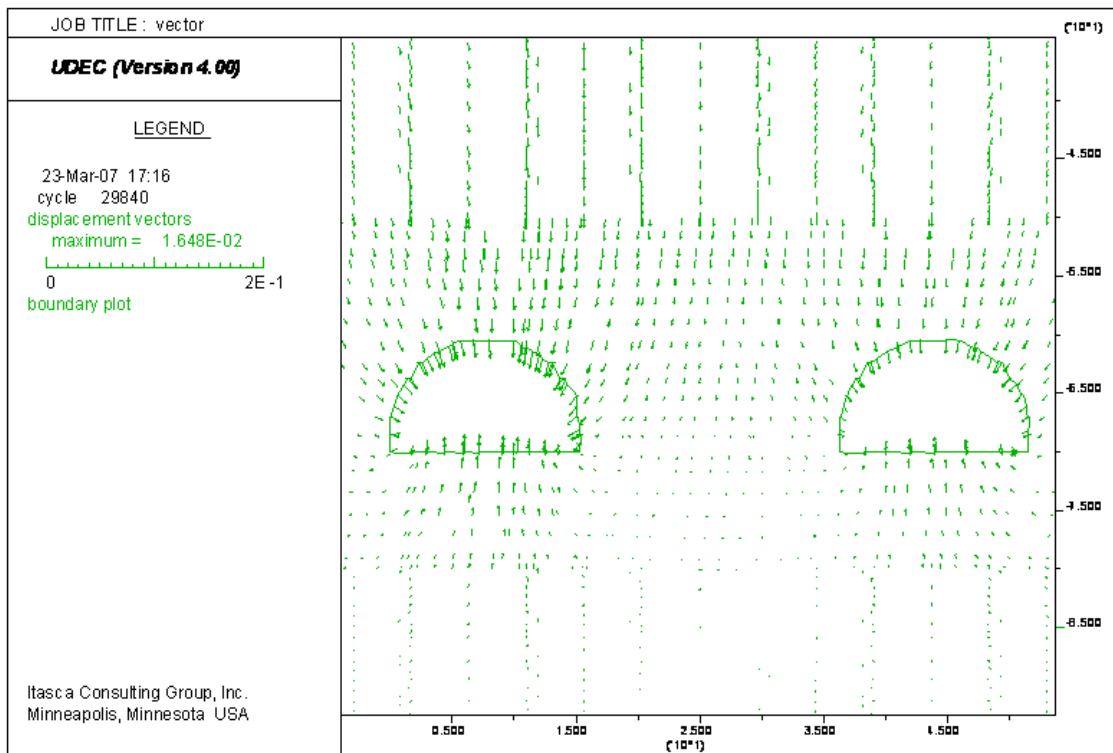
نمودارهای حاصل پس از نصب این سیستم نگهداری در شکل‌های ۶-۳۰ تا ۶-۳۵ آمده است.



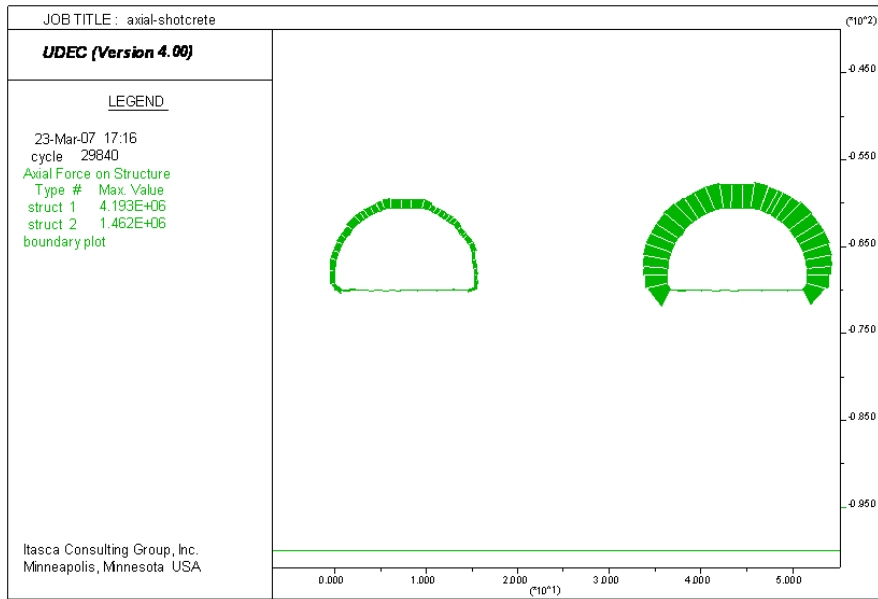
شکل ۶-۳۰ نمودار جابجایی در زون CZ بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۶ متری با فاصله داری ۱ متر و شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر



شکل ۶-۳۱ منطقه پلاستیک ایجاد شده در زون CZ بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۶ متری با فاصله داری ۱ متر و شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر



شکل ۶-۳۲ بردار جابجایی در زون CZ بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۶ متری با فاصله داری ۱ متر و شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر



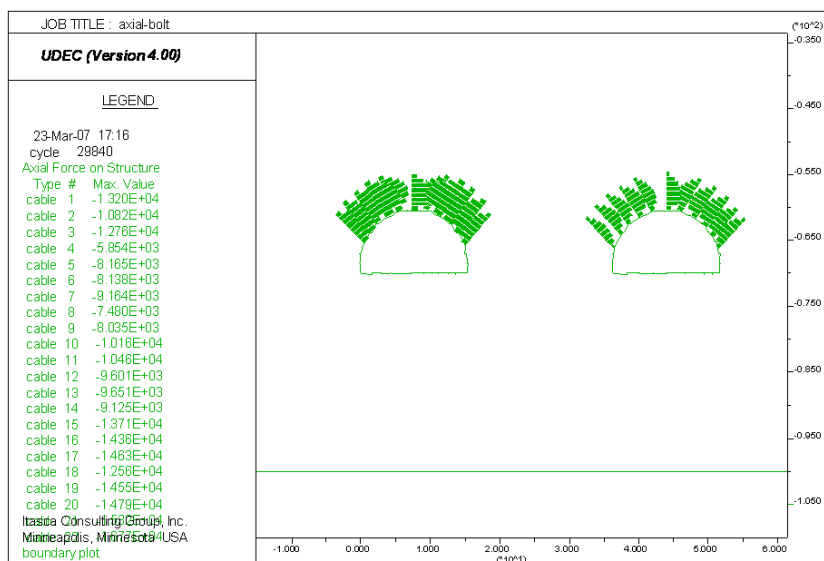
شکل ۳۳-۶ نیروی محوری شاتکریت در زون CZ

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۶ متری با فاصله داری ۱ متر و شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر

مطابق شکل ۳۴-۶ نیروی محوری پیچ‌سنگ معادل ۱۶/۷۷ کیلونیوتن است که با توجه به جدول ۶-۶-

۲، با در نظر گرفتن نیروی فشاری جاری شدن ۱۸۰ کیلونیوتن برای پیچ‌سنگ‌ها، نتایج بیانگر استقامت

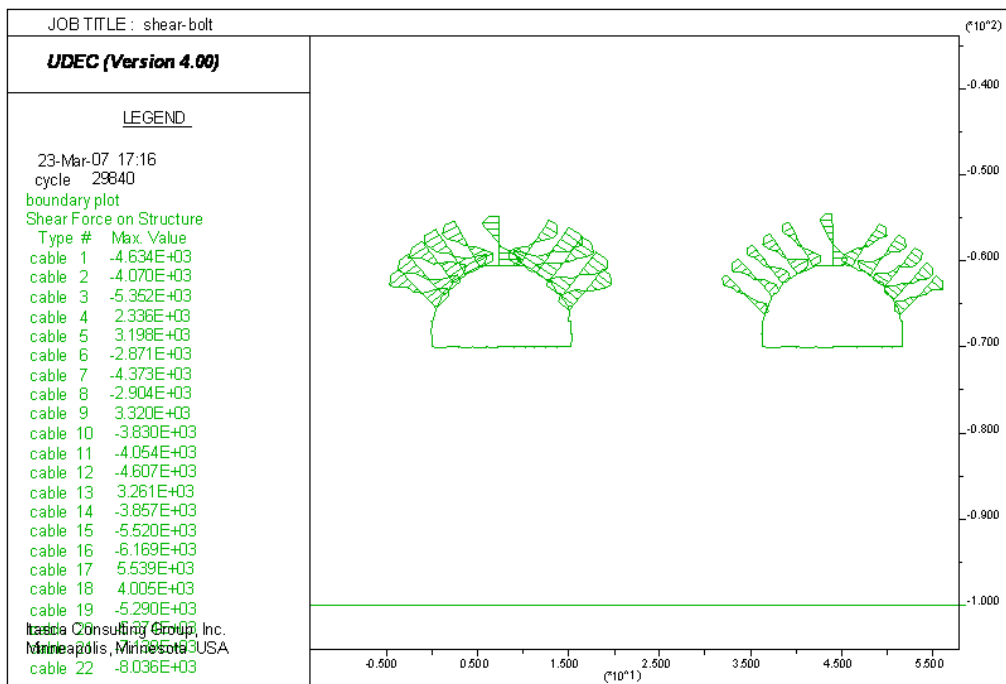
پیچ‌سنگ‌ها خواهند بود.



شکل ۳۴-۶ نیروی محوری پیچ‌سنگ‌های تونل در زون CZ

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۶ متری با فاصله داری ۱ متر و شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر

در شکل ۶-۳۵ حداکثر نیروی برشی فصل مشترک دوغاب و پیچ‌سنگ نشان داده شده‌است. ماکزیمم نیروی برشی پیچ‌سنگ شماره ۲۲ و به میزان ۸ کیلونیوتن در $1/8$ از طول پیچ‌سنگ ایجاد می‌شود. با توجه به جدول ۶-۲ حداکثر نیروی قابل تحمل در واحد طول ۸۰ کیلونیوتن است که با توجه به حداکثر نیروی برشی ایجاد شده در مدل‌ها (۱۶ کیلونیوتن در واحد طول) نتیجه می‌گردد که پیچ‌سنگ‌ها از ضریب اطمینان خوبی برخوردار هستند.



شکل ۶-۳۵ نیروی برشی پیچ‌سنگ‌های تونل در زون CZ

بعد از نصب پیچ‌سنگ‌های ۶ متری با فاصله داری ۱ متر و شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر

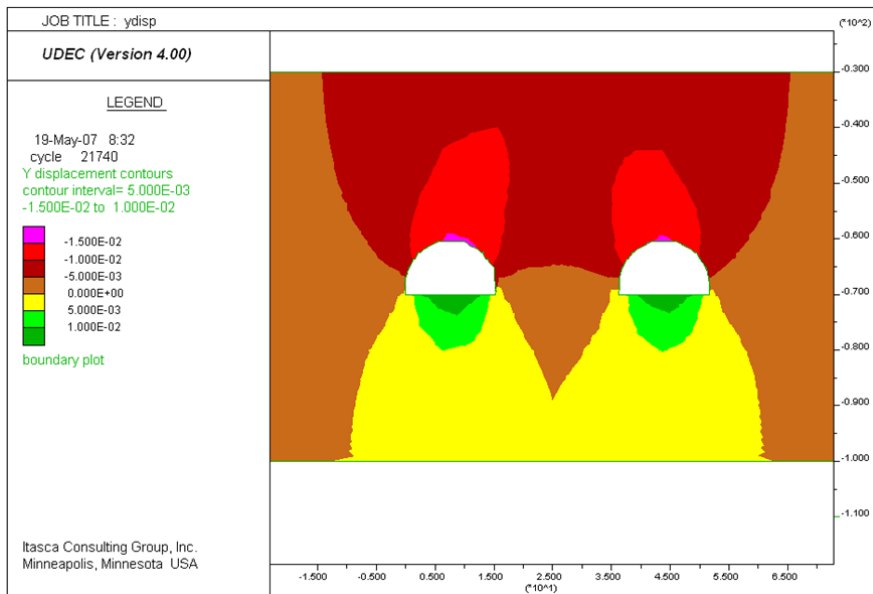
با استفاده از نیروی محوری و ممان خمشی وارد بر المان و محاسبه تنش‌های فشاری وارد بر هر المان ضریب ایمنی برای هر المان تیر محاسبه شد که مقدار ضریب محاسبه شده در همه المان‌ها بالاتر از $1/5$ بوده

که با توجه به آن که سیستم نگهداری طراحی شده موقت می‌باشد مناسب تشخیص داده شد. نمونه‌ای از این اطلاعات در جدول ۶-۶ آمده است.

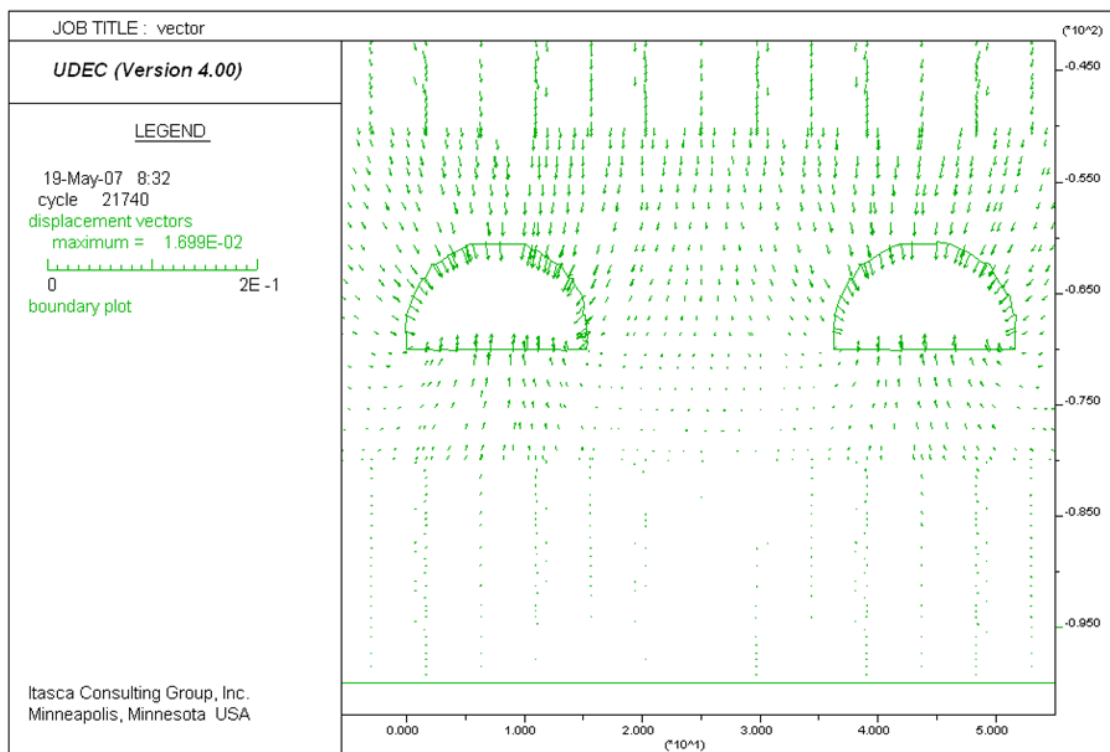
جدول ۶-۶ تنش فشاری و ضریب ایمنی تعدادی از المان‌های تیر با ضخامت 25 cm (زون CZ)

المان	نیروی محوری (N)	ممان خمشی (N-m)	تنش فشاری (Pa)	ضریب اطمینان
36	5.62E+05	1.20E+05	1.38E+07	1.817177415
35	7.92E+05	-2.50E+04	5.57E+06	4.492266115
34	7.95E+05	7.17E+03	3.87E+06	6.463769795
33	8.53E+05	-4.43E+03	3.84E+06	6.518428902
32	9.03E+05	-3.00E+04	6.49E+06	3.849659998
31	9.07E+05	6.14E+04	9.52E+06	2.625123906
30	1.18E+06	-6.63E+04	1.11E+07	2.257784842
29	1.18E+06	-3.72E+04	8.28E+06	3.02066619
28	1.17E+06	2.14E+04	6.73E+06	3.713871458
27	1.27E+06	3.85E+04	8.78E+06	2.848366633
26	1.28E+06	3.20E+04	8.17E+06	3.058148866
25	1.32E+06	-5.67E+04	1.07E+07	2.330698091
24	1.46E+06	-4.11E+04	9.79E+06	2.553188013
23	1.38E+06	3.47E+04	8.85E+06	2.824475777
22	1.35E+06	4.10E+04	9.35E+06	2.673773914
21	1.30E+06	-9.50E+04	1.43E+07	1.745576012

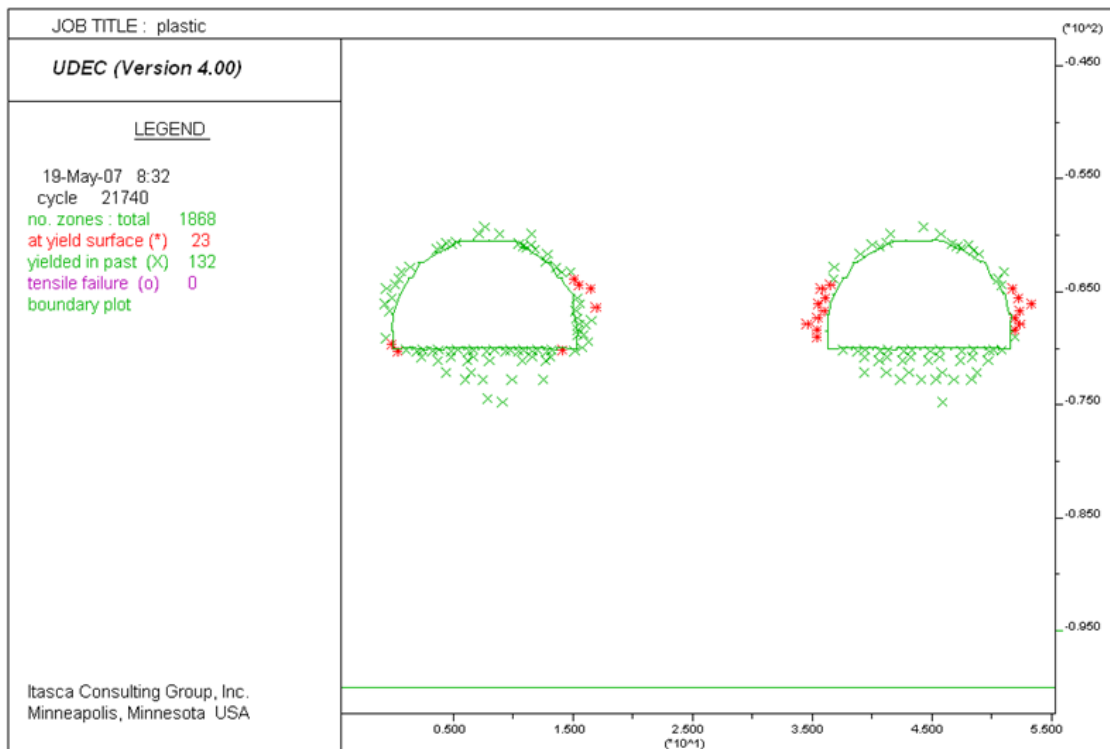
با توجه به اینکه در طراحی سیستم نگهداری انجام شده در فصول قبل برای این زون، استفاده از قاب‌های فولادی نیز پیشنهاد شده است؛ بنابراین در این فصل و در مدلسازی سیستم نگهداری مربوط به این زون، استفاده از قاب فولادی 10I35 و قاب ساخته شده از تیر آهن 16I در این زون بررسی شده است که نتایج حاصل از این مدلسازی در زیر آمده است.



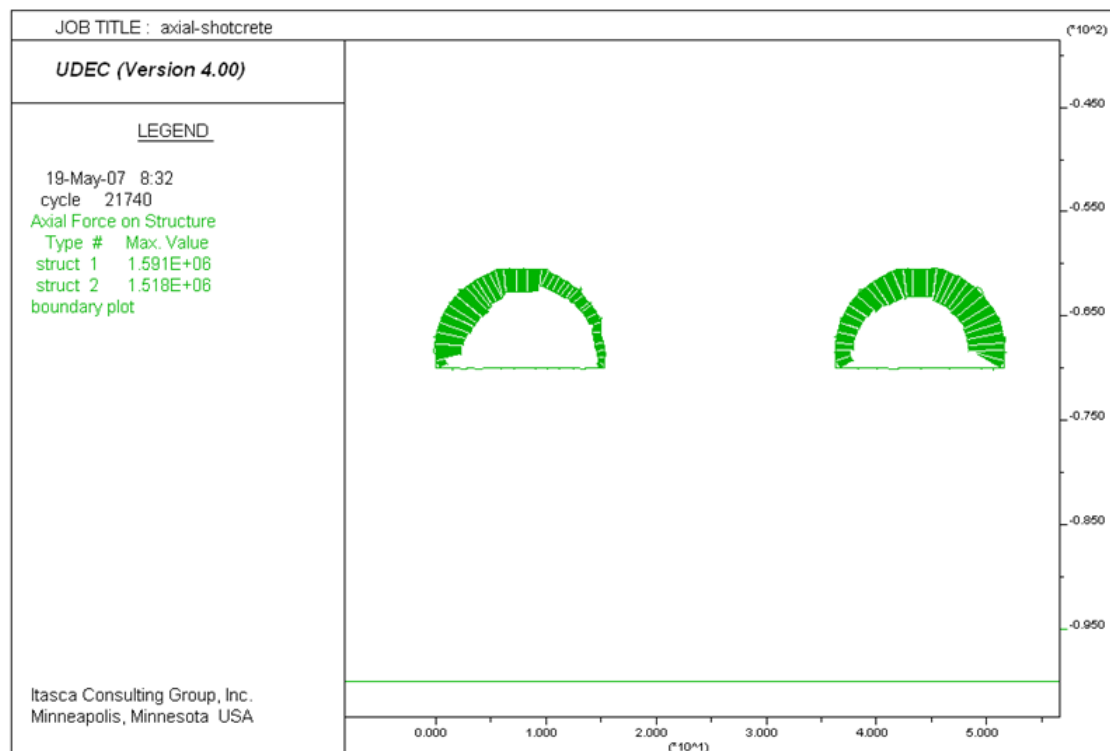
شکل ۳۶-۶ نمودار جابجایی در اطراف تونل‌ها پس از نصب قاب 10135 با فاصله‌داری یک متر



شکل ۳۷-۶ بردار جابجایی در اطراف تونل‌ها پس از نصب قاب 10135 با فاصله‌داری یک متر



شکل ۳۸-۶ منطقه پلاستیک در اطراف تونل‌ها پس از نصب قاب 10135 با فاصله‌داری یک متر



شکل ۳۹-۶ نیروهای محوری وارد بر هر المان قاب 10135 در زون CZ

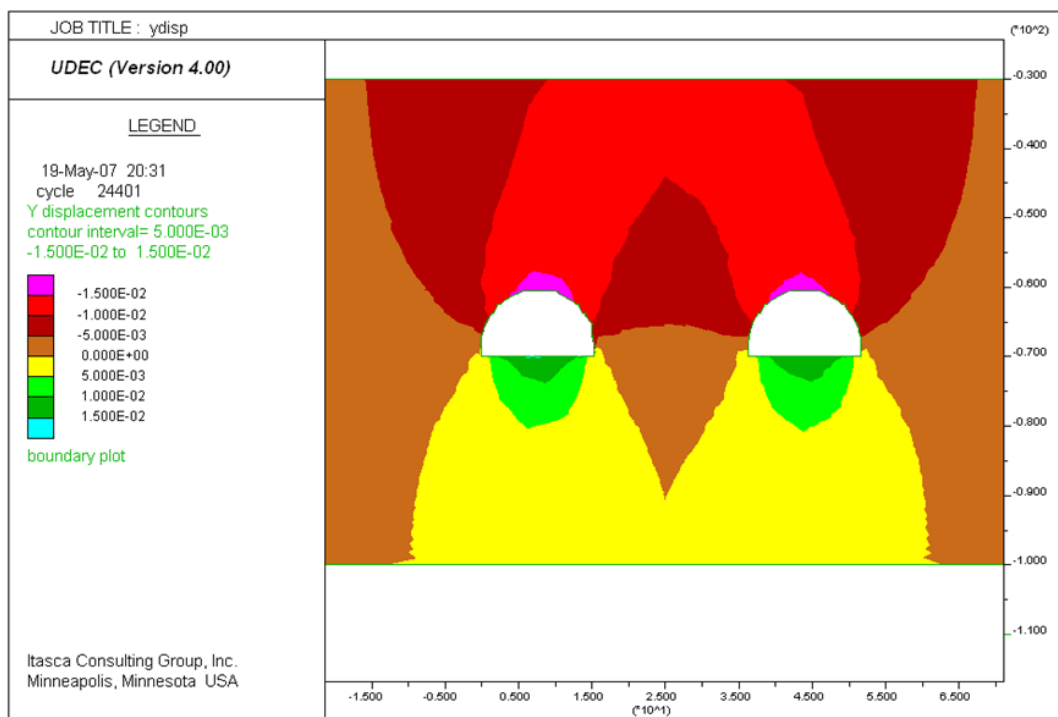
با مقایسه نتایج حاصل از استفاده از قاب 10I35 و سیستم ترکیبی شاتکریت و بولت می‌توان دریافت که نتایج مدلسازی حاصل از این دو سیستم بسیار به هم نزدیک می‌باشد ولی در هر حال محاسبه ضرایب ایمنی مربوط به المان‌های تیر نشان داد که استفاده از این نوع قاب از ضریب ایمنی کمتری برخوردار است (جدول ۶-۷).

از آنجا که قاب‌های ساخته شده با تیر آهن ۱۶ در ایران بسیار متداول است این نوع قاب نیز در نرم افزار مدل شد. این قاب در زون CZ در تعدادی از المان‌ها دارای ضریب ایمنی کمتر از یک می‌باشد بنابراین تصمیم گرفته شد که قاب ساخته شده با دو تیر آهن ۱۶ نیز مورد بررسی قرار گیرد. نتایج حاصل از این مدلسازی در اشکال و جداول زیر آمده است.

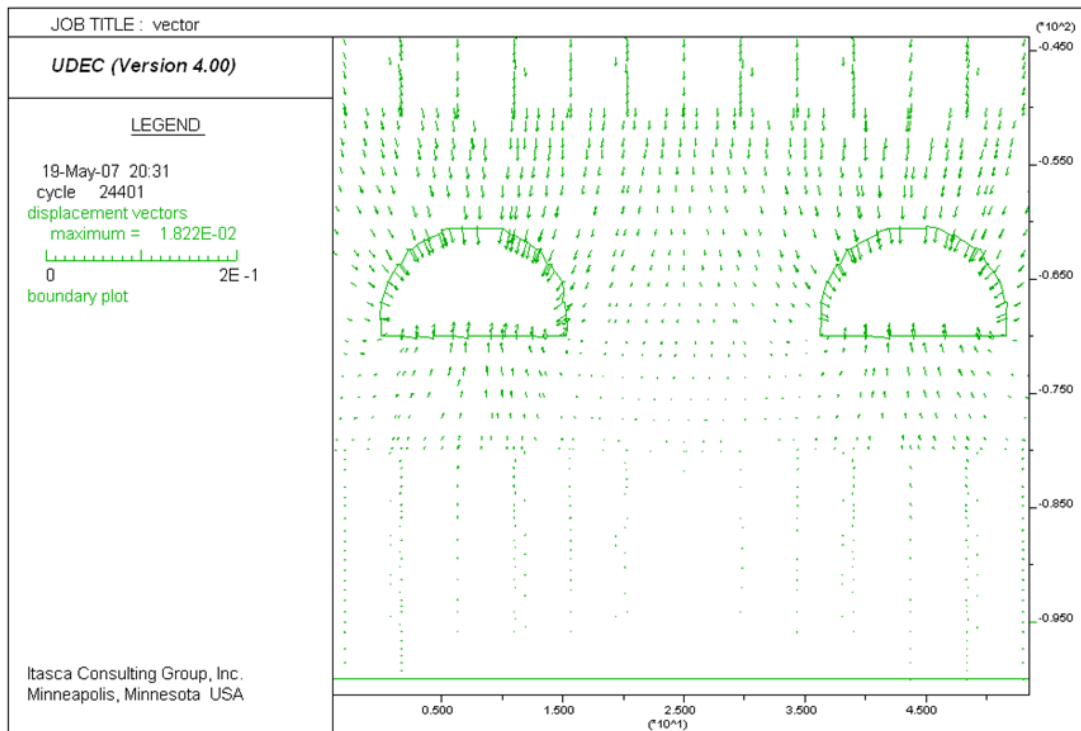
جدول ۶-۷ تنش فشاری و ضریب ایمنی تعدادی از المان‌های قاب 10I35 (زون CZ)

المان	نیروی محوری (N)	ممان خمشی (N-m)	تنش فشاری (Pa)	ضریب اطمینان
63	7.74E+05	1.39E+03	1.20E+08	2.03
62	7.79E+05	1.09E+04	1.41E+08	1.74
61	8.15E+05	3.65E+03	1.31E+08	1.87
60	8.85E+05	7.44E+03	1.50E+08	1.64
59	9.18E+05	4.23E+03	1.48E+08	1.65
58	9.97E+05	4.51E+03	1.61E+08	1.52
57	1.11E+06	2.19E+03	1.73E+08	1.41
56	1.19E+06	3.65E+03	1.88E+08	1.30
55	1.27E+06	1.29E+03	1.95E+08	1.26
54	1.29E+06	1.21E+04	2.21E+08	1.11
53	1.38E+06	1.65E+04	2.44E+08	1.01
52	1.27E+06	1.35E+04	2.21E+08	1.11
51	1.28E+06	1.21E+04	2.20E+08	1.11

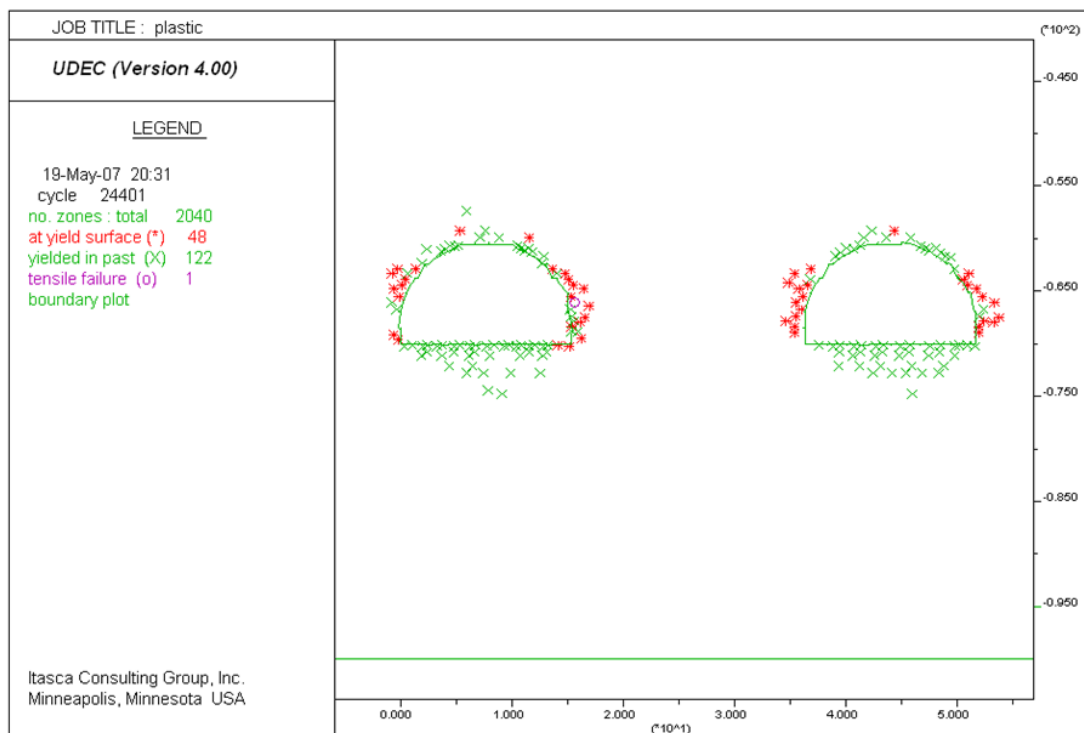
50	1.30E+06	1.29E+04	2.24E+08	1.10
49	1.44E+06	1.04E+04	2.40E+08	1.02
48	1.47E+06	1.04E+04	2.45E+08	1.00
47	1.47E+06	9.76E+03	2.43E+08	1.01
46	1.48E+06	2.96E+03	2.31E+08	1.06
45	1.50E+06	4.61E+03	2.37E+08	1.03
44	1.55E+06	2.66E+03	2.41E+08	1.02
43	1.51E+06	7.58E+03	2.45E+08	1.00
42	1.51E+06	2.64E+03	2.35E+08	1.04
41	1.58E+06	1.86E+03	2.43E+08	1.01



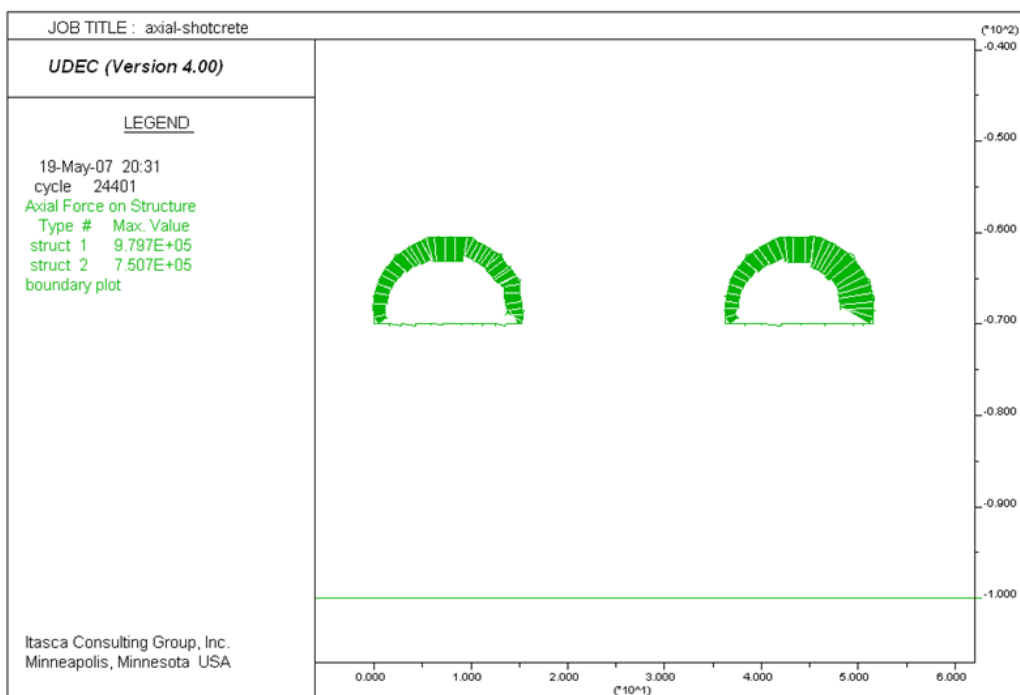
شکل ۶-۴۰ نمودار جابجایی در اطراف تونل‌ها پس از نصب قاب 161 دوپل با فاصله‌داری یک متر



شکل ۴۱-۶ بردار جابجایی در اطراف تونل‌ها پس از نصب قاب 161 دابل با فاصله‌داری یک متر



شکل ۴۲-۶ منطقه پلاستیک در اطراف تونل‌ها پس از نصب قاب 161 دابل با فاصله‌داری یک متر



شکل ۴۳-۶ نیروهای محوری وارد بر هر المان قاب 161 دابل در زون CZ

جدول ۸-۶ تنش فشاری و ضریب ایمنی تعدادی از المان‌های قاب 161 دابل (زون CZ)

المان	نیروی محوری (N)	ممان خمشی (N-m)	تنش فشاری (Pa)	ضریب اطمینان
63	3.71E+05	1.37E+03	9.84E+07	2.49
62	3.73E+05	6.18E+03	1.21E+08	2.02
61	3.89E+05	5.27E+02	9.92E+07	2.47
60	4.20E+05	3.58E+02	1.06E+08	2.31
59	4.43E+05	2.68E+03	1.22E+08	2.00
58	4.73E+05	2.15E+03	1.27E+08	1.92
57	5.37E+05	2.38E+03	1.44E+08	1.70
56	5.73E+05	8.91E+02	1.47E+08	1.67
55	6.10E+05	1.05E+03	1.57E+08	1.56
54	6.22E+05	5.62E+03	1.81E+08	1.36
53	7.24E+05	7.31E+03	2.14E+08	1.15
52	7.83E+05	4.53E+03	2.15E+08	1.14

51	7.90E+05	1.79E+03	2.05E+08	1.20
50	7.90E+05	1.00E+03	2.01E+08	1.22
49	9.34E+05	1.45E+03	2.39E+08	1.03
48	9.33E+05	2.80E+03	2.45E+08	1.00
47	9.29E+05	3.01E+03	2.45E+08	1.00
46	9.27E+05	8.15E+02	2.34E+08	1.05
45	9.53E+05	2.87E+02	2.38E+08	1.03
44	9.80E+05	2.87E+02	2.45E+08	1.00
43	9.03E+05	4.43E+03	2.45E+08	1.00
42	9.03E+05	2.92E+03	2.38E+08	1.03

همانطور که از جدول ۶-۸ نیز پیداست ضریب ایمنی تمامی المان‌ها بزرگتر از یک می‌باشد ولی این حداقل ضریب ایمنی بوده و برای کارهای مهندسی این ضریب بایستی حداقل ۱/۵ باشد. با این حال با توجه به دیدی که از منطقه در ذهن وجود دارد و همچنین با ایجاد استحکامات و ارتباطات کامل بین قاب‌ها مثلاً استفاده از ناودانی نمره ۱۰، اتصال ضربدري ميلگردهای ۲۵، مش‌بندی و شاتکریت فواصل قاب‌ها، می‌توان سیستم نگهداری اولیه مناسبی ایجاد نمود. حتی می‌توان در صورت امکان فواصل قاب‌ها را تا ۷۰ سانتیمتر کاهش داد. البته علت اصرار به جایگزینی سیستم قاب به جای استفاده از پیچ‌سنگ و شاتکریت این است که این زون بسیار خرد شده بوده و مدت زمان خودنگهداری تونل بسیار کوتاه می‌باشد لذا اکثر مهندسان پیشنهاد می‌کنند در چنین زون‌هایی از قاب‌ها به جای پیچ‌سنگ‌ها استفاده شود.

۶-۷- نتیجه‌گیری

سیستم نگهداری طراحی شده با استفاده از نرم افزار UDEC برای سه زون مورد نظر به شرح زیر می‌باشد:

زون LM-1: نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله ۲ متر از هم و اجرای شاتکریت به ضخامت ۱۰

سانتیمتر.

زون LM-2: نصب پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله ۲ متر از هم و اجرای شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر.

زون CZ: نصب پیچ‌سنگ‌های ۶ متری با فاصله داری یک متر و شاتکریت به ضخامت ۲۵ سانتیمتر. بجای سیستم نگهداری فوق می‌توان از قاب ساخته شده با دو تیر آهن ۱۶ به عنوان نگهدارنده استفاده کرد. البته پیشنهاد می‌شود به منظور افزایش ضریب ایمنی و یکپارچگی سیستم نگهداری، علاوه بر نصب ناودانی نمره ۱۰ و میلگرد ۲۵ به عنوان رابط، با بستن دو لایه مش در فواصل قاب‌ها، یک لایه شاتکریت نیز اجرا شود.

۷-۱- مقدمه

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل عددی لازم است که پتانسیل تشکیل گوه در زمان حفر تونل‌های مورد مطالعه نیز تجزیه و تحلیل گردد و بررسی شود که آیا سیستم نگهداری پیشنهاد شده در تحلیل عددی، توانایی نگهداری بلوک‌های احتمالی ایجاد شده را خواهد داشت؟ در فضاهای حفاری شده در سنگ‌های درزه‌دار و در اعماق نسبتاً کم، رایج‌ترین نوع شکست، افتادن گوه از سقف یا دیواره‌های کناری فضاهای زیرزمینی می‌باشد. گوه‌ها از تقاطع ساختارهای زمین‌شناسی مانند صفحات لایه‌بندی و درزه‌ها که سنگ را به توده‌های مجزا ولی قفل شده در هم تقسیم می‌کنند، شکل می‌گیرند. وقتی سطح آزاد بوسیله حفاری ایجاد گردید محدودیت از بین می‌رود و امکان لغزش یک یا تعداد بیشتری گوه وجود دارد. اگر امکان افتادن یا لغزش برای یک گوه یا تعداد بیشتری موجود باشد، محدودیت و قفل شدگی توده‌سنگ کاهش یافته و این خود منجر به سقوط گوه‌های بیشتری می‌شود. این روند ادامه می‌یابد تا جایی که یا قوس طبیعی

در توده‌سنگ از تخریب زیاد جلوگیری کند یا داخل فضای زیرزمینی با مواد ریزشی پر شود (فردوسی، ۱۳۷۶). برای بررسی احتمال وقوع ریزش بلوک‌ها یا گوه‌های احتمالی موارد زیر لازم است:

۱- معین کردن متوسط شیب و امتداد شیب دسته ناپیوستگی اصلی توده‌سنگ

۲- شناسایی گوه‌هایی که دارای پتانسیل لغزش بوده یا امکان افتادن به داخل فضا را داشته باشند.

۳- محاسبه فاکتور اطمینان این گوه‌ها

۴- محاسبه میزان نگهداری برای بدست آوردن فاکتور اطمینان قابل قبول

۷-۲- حفاری در سنگ‌های بلوکی (تئوری بلوک‌ها)

عملیات حفاری درون توده‌سنگ‌های همراه با چندین دسته ناپیوستگی، موجب جدایی و آزاد شدن بلوک‌های سنگی با اندازه‌های مختلف از دل توده‌سنگ می‌گردد. جابجایی‌های بالقوه سنگ‌هایی که در بحرانی‌ترین حالت قرار دارند، ممکن است موجب کنده شدن بلوک‌های مجاور گردد و اثرات لغزش یا سقوط این بلوک‌ها، می‌تواند ایمنی طرح را به مخاطره اندازد. چنانچه حفاریات و سازه تحت نگهداری قرار نگیرد، جابجایی و لغزش بلوک‌ها می‌تواند در حد زیاد و غیرقابل قبولی، محیط و جوانب سازه را تغییر دهد و سبب ایجاد خسارت جانی و مالی گردد.

برابر شکل ۷-۱ بلوکی از سنگ که بوسیله تقاطع ناپیوستگی و سطوح حفاری، از بلوک‌های اطراف

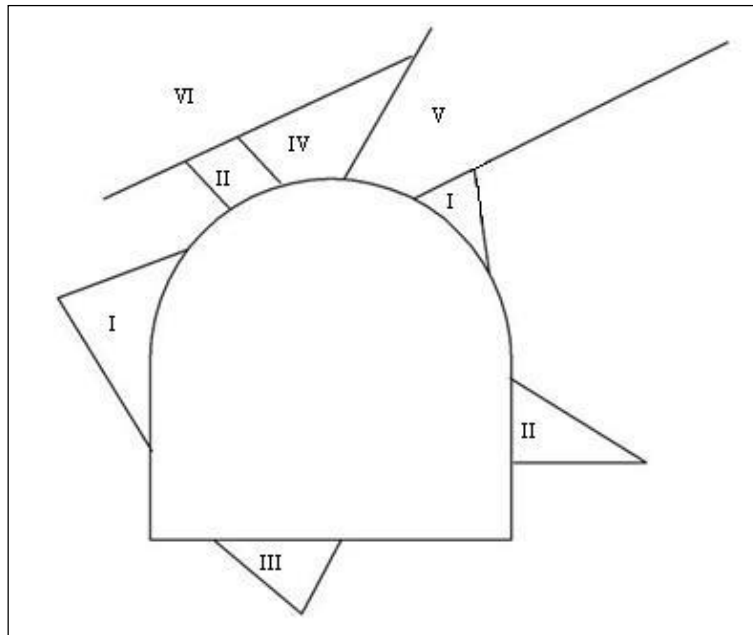
جدا شده است را در نظر بگیرید. مهم نیست که این بلوک دارای چند وجه می‌باشد. حرکت و جابجایی بلوک

صرفاً به چند طریق خلاصه می‌شود: سقوط کردن، لغزش بر روی یک وجه یا لغزش بر روی دو وجه و یا

بوسیله ترکیبی از لغزش و چرخش. تمام این حرکات نیازمند سطوح باز و معینی در بلوک هستند. بنابراین اولین هشدار یا علامت جابجایی یک بلوک، تراکم درزه‌ها در اطراف آن می‌باشد (Goodman 1985,1989).

بلوک‌هایی که در خطرناک‌ترین حالت و وضعیت قرار گرفته اند " بلوک‌های کلیدی " نام دارند. شکل ۷-۱، ۶ نوع بلوک را که در اطراف یک فضای زیرزمینی تشکیل می‌شود را نشان می‌دهد. نوع ششم یک بلوک درزه‌دار می‌باشد که در اطراف فضای مزبور دارای سطح باز نمی‌باشد. بعبارت دیگر دارای هیچ گونه سطح آزادی نیست. نوع پنجم دارای یک سطح آزاد است ولی بلوک نامحدود می‌باشد. بجز در حالتی که شکاف‌های جدیدی در اطراف حفره مذکور ایجاد گردد، هیچ یک از این دو بلوک نمی‌توانند بلوک‌های کلیدی تلقی گردند. این مطلب برای بلوک نوع چهارم نیز که مخروطی شکل است، صادق می‌باشد. این بلوک مخروطی شکل نمی‌تواند در هیچ جهتی به سمت فضای حفرشده حرکت نماید مگر آنکه در ضمن حرکت به بلوک‌های اطراف خود فشار وارد نماید و در نتیجه سقوط احتمالی آن‌ها، این بلوک هم ریزش کند. سایر بلوک‌ها همگی محدود و دارای پتانسیل جابجایی می‌باشند. این موضوع که آیا این بلوک‌ها از جای خود حرکت خواهند کرد یا خیر، نه تنها به شکل هندسی آن‌ها، بلکه به جهت نیروی برابند و مقادیر زاویه اصطکاک سطوح نیز بستگی دارد. بلوک نوع سوم، تحت تأثیر نیروی ثقل ایمن می‌باشد.

بلوک‌های نوع دوم بعلاوه تأثیر اصطکاک ایمن می‌باشند. از بین بلوک‌های نوع دوم، آن که در سقف واقع است دارای سطوح موازی بوده و از این‌رو صرفاً می‌تواند در یک جهت که عمده‌تاً موازی همان سطوح است حرکت نماید (Goodman, 1989).



شکل ۷-۱ بلوک‌های احتمالی در اطراف یک فضای زیرزمینی (Goodman, 1989)

بلوک نوع دومی که در دیواره واقع است، دارای قاعده مسطح می‌باشد بنابراین چنانچه زاویه اصطکاک سطح، مقادیر معقولی داشته باشد، حرکت آن نامحتمل به نظر می‌رسد مگر آن که نیروی آب یا نیروی دیگری جهت نیروی برآیند را با چرخش از حالت قائم به سمت فضای آزاد تغییر دهد.

به محض جدا شدن سنگ‌ها و تشکیل بلوک‌های مجزا در نتیجه عملیات حفاری، بلوک‌های نوع اول به احتمال زیاد دچار حرکت خواهند شد مگر آن که بلافاصله پس از عملیات حفاری تحت نگهداری قرار گیرند. حرکت بلوک نوع اول در سقف، سقوطی و حرکت بلوک نوع اول در دیواره، لغزشی می‌باشد. این بلوک‌ها، بلوک‌های کلیدی هستند و بلوک‌های نوع دوم، بلوک‌های کلیدی بالقوه نام دارند (Goodman, 1989).

۷-۳- شناسایی گوه‌های دارای پتانسیل ریزش

اندازه و شکل گوه‌ها در توده‌سنگ به اندازه، شکل، جهت فضای زیرزمینی و جهت دسته درزه‌های مهم بستگی دارد و از این رو شکل سه بعدی آن‌ها برای محاسبات دقیق لازم می‌باشد. بازدهی انجام این کار به طور دستی بسیار کمتر از حالتی است که تحلیل بوسیله یک رایانه انجام می‌گیرد. نرم افزار تعادل حدی UNWEDGE برای حل چنین مواردی در توده‌سنگ نسبتاً سخت ارائه شده است که در این بخش استفاده خواهد شد (معظمی، ۱۳۷۸).

ورودی‌های این برنامه شامل سه دسته ناپیوستگی ساختاری همراه با مقطع عرضی تونل، آزمون و شیب محور تونل می‌باشد. با دادن اطلاعات فوق و اجرای برنامه، موقعیت و ابعاد بزرگترین گوه‌هایی را که می‌توانند در سقف، کف یا دیواره‌های فضای زیرزمینی شکل بگیرند، تعیین خواهد شد. این گوه‌ها بزرگترین گوه‌هایی هستند که می‌توانند بوسیله شرایط هندسی زمین شکل بگیرند. در محاسبات فرض می‌شود که ناپیوستگی‌ها در هر جای توده‌سنگ می‌توانند اتفاق بیافتند. درزه‌ها، صفحات لایه‌بندی و دیگر ساختارهای زمین شناسی در آنالیز، پیوسته فرض می‌شوند. این بدان معنی است که این برنامه همواره بزرگترین گوه تشکیل شده را به ما می‌دهد. نتایج بدست آمده معمولاً محافظه‌کارانه می‌باشد چون اندازه گوه‌های شکل گرفته، بوسیله وجود فاصله داری بین ساختارها محدود می‌شوند. برنامه UNWEDGE برای وضعیت‌هایی که سطح تنش برجا پائین و از تأثیر آن بتوان چشم پوشی کرد، کارایی مناسبی دارد. در جاهایی که میزان تنش‌های زمین زیاد است فاکتور اطمینان پیش بینی شده توسط این برنامه ممکن است اشتباه باشد (Hoek, 1995). برای تحقیق در مکانیزم شکست در جاهایی که تأثیر تنش‌های برجا خیلی بحرانی است (برای مثال فضا‌های بزرگ) روش پیچیده‌تری ممکن است لازم باشد. مشخصه شکست گوه‌ای در سنگ‌های بلوکی این است که قبل از شکست، حرکت خیلی کمی در توده‌سنگ اتفاق می‌افتد. برای گوه‌های واقع در

سقف و خصوصاً دیواره، لغزش به اندازه چند میلی‌متر در طول صفحه یا خط تقاطع دو صفحه، معمولاً برای غلبه بر مقاومت این صفحات کافی است (معظمی، ۱۳۷۸).

۷-۴- تحلیل پایداری تونل‌های ایمن شیراز با استفاده از نرم افزار UNWEDGE

یکی از معمول‌ترین مکانیسم‌های ناپایداری در حفاریات زیرزمینی که درون توده‌سنگ‌های درزه‌دار حفر می‌شوند، ناپایداری‌های بلوکی است. بلوک‌های مورد اشاره از تقاطع سطوح ناپیوستگی با یکدیگر در سقف، دیواره و یا جبهه کار تونل تشکیل می‌شوند. ناپایداری این بلوک‌ها ممکن است بصورت سقوط، لغزش یا چرخش باشد. ضریب پایداری این بلوک‌ها را می‌توان براساس مشخصات هندسی و مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها، شرایط آب زیرزمینی و وزن مخصوص سنگ بدست آورد.

چنانچه بخواهیم قبل از حفاری تونل، وضعیت پایداری بلوک‌های احتمالی را بررسی نمائیم، می‌توان ابعاد بزرگترین بلوک‌های قابل تشکیل در اطراف تونل را براساس مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها، مشخصات هندسی مقطع تونل، شیب و امتداد تونل پیش بینی نمود و با فرض پارامترهای مقاومت برشی برای هریک از سطوح ناپیوستگی، ضریب ایمنی پایداری آن‌ها را محاسبه نمود. نرم افزار UNWEDGE تسهیلات خاصی در انجام این‌گونه تحلیل‌ها در اختیار می‌گذارد.

همزمان با حفاری تونل می‌توان دسته درزه‌های مهم را شناسایی کرد و مشخصات آن‌ها را برداشت نمود. با ترسیم این عوارض ساختاری برروی شبکه‌های استریونت می‌توان پایداری گوه‌های احتمالی را در حین اجرا نیز بررسی نموده و طرح نگهداری آن را اصلاح کرد. یکی از مزایای UNWEDGE قابلیت استفاده از شاتکریت و پیچ‌سنگ به عنوان سیستم نگهداری و مشاهده کردن تأثیر حضور آن‌ها بر پایداری گوه‌ها می‌باشد. محدود بودن انتخاب سه دسته درزه از میان تعداد زیادی ناپیوستگی و همچنین نامعلوم بودن

موقعیت گوه‌هایی که می‌توانند در امتداد یک حفاری زیرزمینی تشکیل شوند، از معایب این نرم افزار می‌باشد.

داده‌های ورودی نرم افزار UNWEDGE شامل موارد ذیل می‌باشد:

- شیب و جهت شیب دسته درزه‌ها
- زاویه اصطکاک و چسبندگی سطوح درزه
- شکل مقطع تونل، جهت حفر و شیب آن
- وزن مخصوص سنگ، تنش منطقه و در صورت وجود آب، فشار آب

به کمک این برنامه و براساس داده‌های فوق، مشخصات بزرگترین گوه‌هایی که ممکن است در سقف و دیواره‌های تونل تشکیل شوند، تعیین شده، وزن، حجم و ضریب اطمینان هر گوه محاسبه و ارائه می‌گردد. در این تحلیل فرض بر آن است که گوه‌های بوجود آمده توسط ناپیوستگی‌ها فقط تحت تاثیر وزن خود قرار دارند. همچنین میدان تنشی که در اطراف فضای زیرزمینی بوجود می‌آید، در نظر گرفته نمی‌شود. یادآور می‌گردد وجود تنش‌های القایی اطراف تونل در جهت افزایش تنش‌های نرمال وارده بر سطح درزه‌ها عمل می‌کنند که به مفهوم افزایش مقاومت برشی سطوح ناپیوستگی می‌باشد و وارد نکردن آن‌ها در محاسبات در جهت محافظه کاری است.

مطابق پلان طرح، تونل‌های ایمن در امتداد ۲۴۹ درجه و با شیب حدود ۱/۸٪ درصد حفاری خواهد

شد. مشخصات هندسی ناپیوستگی‌های موجود، در جدول ۷-۱ آمده است.

جدول ۷-۱ مشخصات دسته درزه‌های محدوده تونل‌های ایمن

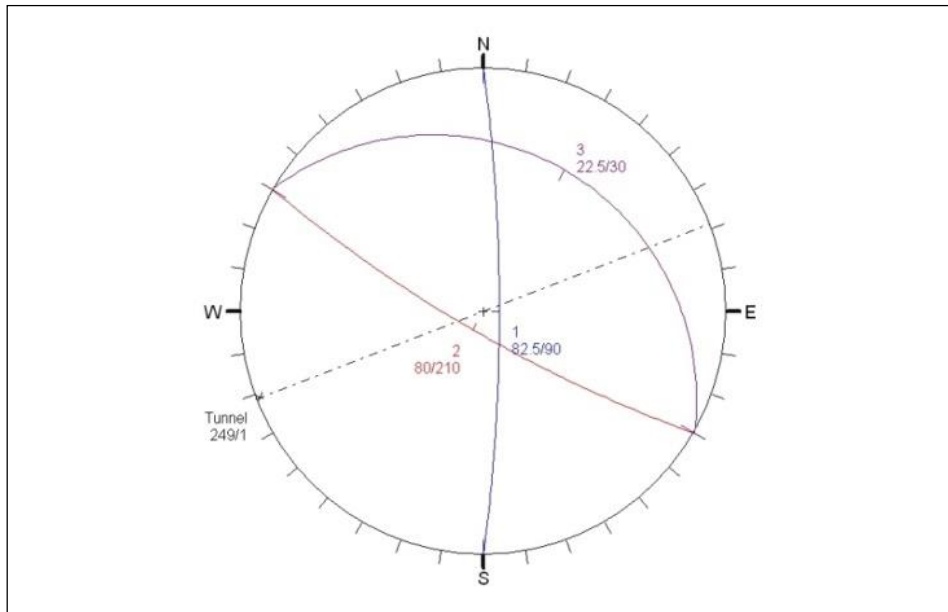
فاصله داری (cm)	شیب (درجه)	امتداد (درجه)	ناپیوستگی	سازند زمین شناسی
۱۰۰-۳۰۰	۸۰-۸۵	۰	دسته درزه ۱	یال شمالی تپه (LM-1)
۴۰-۱۵۰	۸۵-۷۵	۱۲۰	دسته درزه ۲	
۱۰۰-۲۰۰	۲۵-۲۰	۳۰۰	سطوح لایه‌بندی	
۱۰۰-۱۵۰	۸۰-۸۵	۱۸۰	دسته درزه ۱	یال جنوبی تپه (LM-2)
۱۰۰-۱۵۰	۷۵-۸۵	۳۰۰	دسته درزه ۲	
۱۵۰-۲۰۰	۱۵-۲۰	۱۵۰	سطوح لایه‌بندی	

در اثر تقاطع این دسته درزه‌ها و فضاهای زیرزمینی امکان تشکیل گوه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این بخش وضعیت پایداری بلوک‌های احتمالی در سقف و دیواره‌های تونل ایمان با توجه به سیستم نگهداری پیشنهادی، بررسی می‌شود. شایان ذکر است که در تحلیل‌ها و بررسی پایداری بلوک‌ها، فقط سیستم نگهداری پیچ‌سنگ در مدل‌ها اعمال گردیده است. شاکریت به همراه مش که در سیستم نگهداری فضاهای زیرزمینی پیش‌بینی شده است می‌تواند پایداری مضاعفی را برای بلوک‌ها در دراز مدت تأمین نماید.

۷-۴-۱- زون LM-1 (یال شمالی تپه)

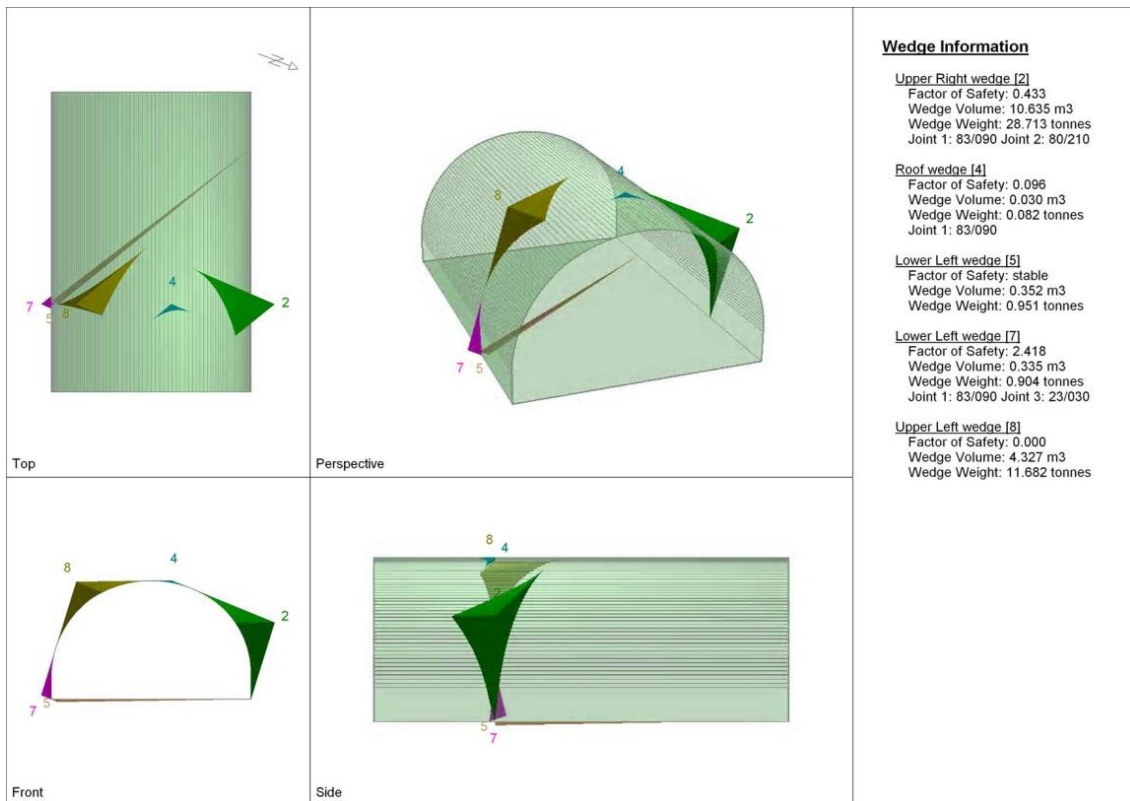
در شکل ۷-۲ تصاویر استریوگرافیک دسته درزه‌های موجود در یال شمالی تپه (LM-1) و امتداد تونل

ایمان آمده است.



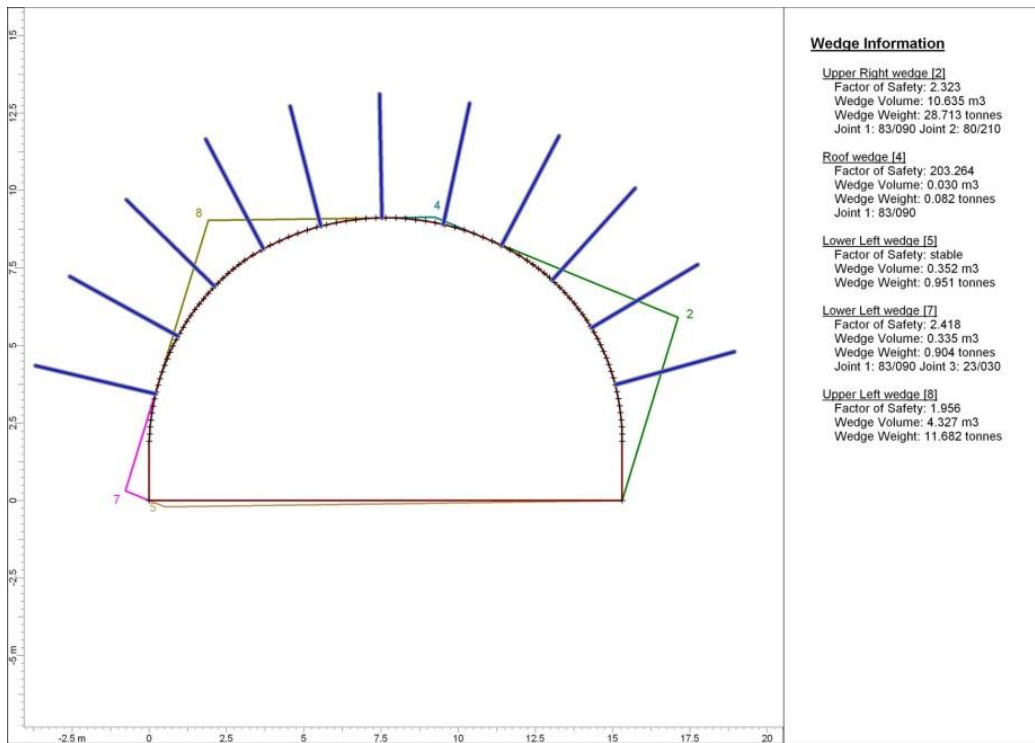
شکل ۷-۲ تصویر استریوگرافیک دسته درزه‌ها، لایه‌بندی و امتداد تونل در زون LM-1

با اعمال پارامترهای اولیه مشخصات بزرگترین گوه‌هایی که امکان تشکیل شدن در دیواره و سقف تونل در این یال را دارند، تعیین می‌گردد که نتایج تحلیل در شکل ۷-۳ آمده است. در راهنمای شکل، وزن گوه‌ها، ضریب اطمینان و جهت لغزش احتمالی بدون نصب سیستم نگهداری دیده می‌شود. مطابق شکل گوه‌های شماره ۲، ۴ و ۸ دارای ضریب اطمینان کمتر از یک هستند. امکان تشکیل گوه شماره ۲ در دیواره راست، گوه شماره ۴ در سقف و گوه شماره ۸ در دیواره چپ وجود دارد. البته گوه شماره ۴ در بزرگترین حالت خود، وزنی معادل ۰/۰۸۲ تن دارد.



شکل ۷-۳ هندسه و مشخصات گوه‌های تشکیل شده احتمالی در تونل (زون LM-1)

از سیستم نگهداری که در بخش‌های قبلی برای این مقطع پیشنهاد گردید، به منظور پایداری تونل استفاده می‌شود. در شکل ۷-۴ گوه‌ها و مشخصات آن‌ها، با در نظر گرفتن تأثیر سیستم نگهداری دیده می‌شود. سیستم نگهداری نصب شده پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله‌داری ۲ متر می‌باشد. پیچ‌سنگ‌ها از میلگردهای آجدار با قطر ۲۵ میلیمتر ساخته شده‌اند. نتایج حاکی از افزایش ضریب اطمینان در بلوک‌های تشکیل شده می‌باشد.

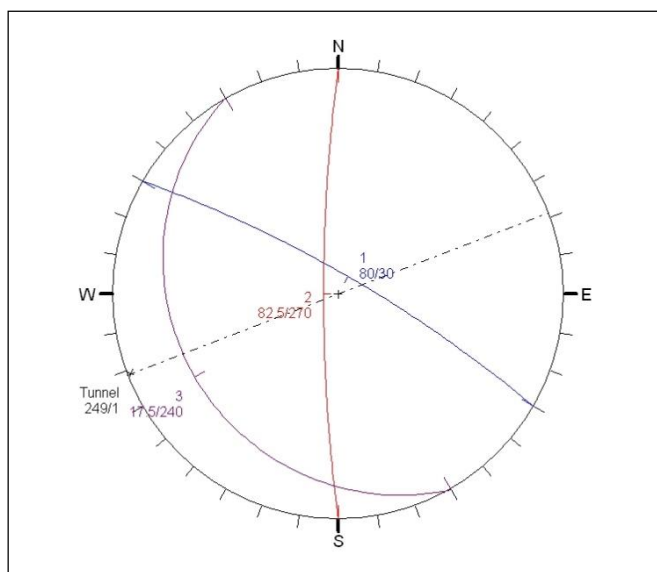


شکل ۴-۷ افزایش ضریب اطمینان گوه‌های لغزشی در تونل با اعمال پیچ‌سنگ (LM-1)

۴-۲-۷- زون LM-2 (بال جنوبی تپه)

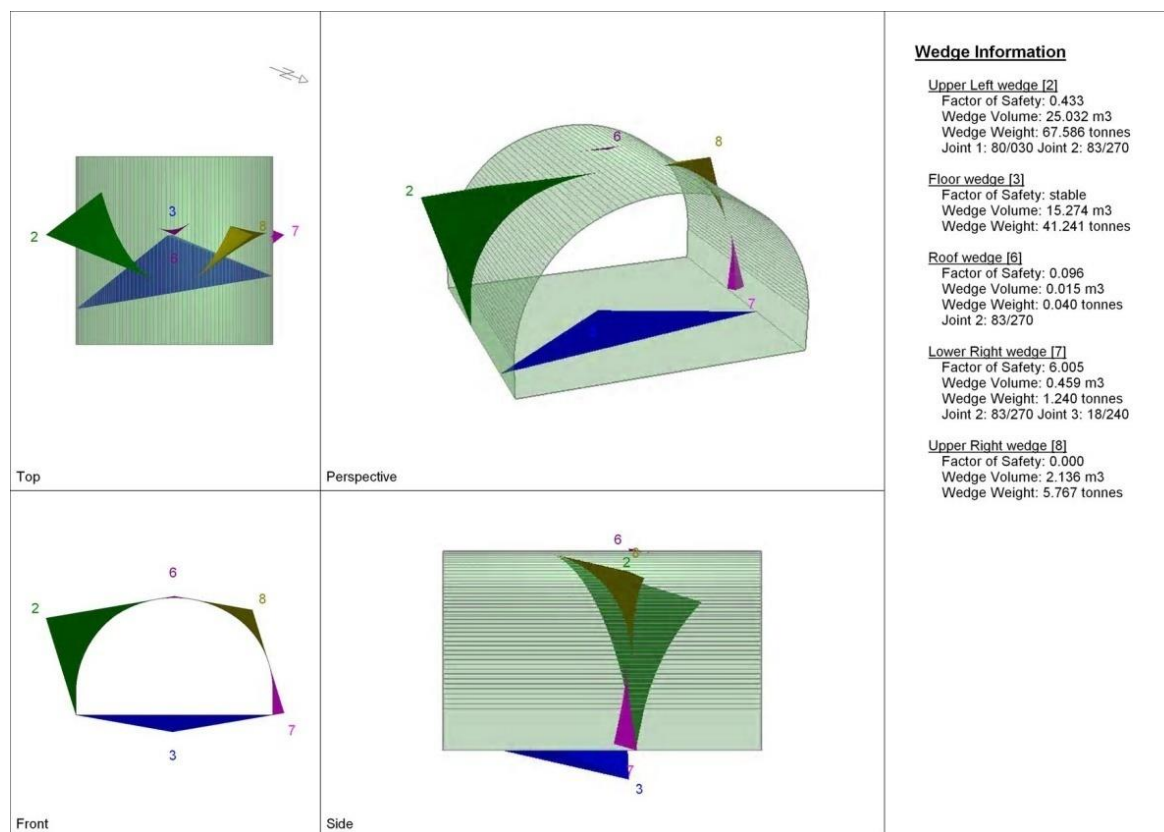
تصاویر استریوگرافی ناپیوستگی‌ها و تونل ایمن در محدوده زون LM-2 در شکل ۵-۷ نشان داده شده

است.



شکل ۵-۷ تصویر استریوگرافیک دسته درزه‌ها، لایه‌بندی و امتداد تونل در زون LM-2

با وارد کردن مشخصات هندسی تونل و همچنین دسته درزه‌ها و لایه‌بندی موجود در منطقه، مشخصات بزرگ‌ترین گوه‌هایی که ممکن است در اطراف تونل در این زون تشکیل شوند، تعیین گردید که در شکل ۶-۷ قابل مشاهده می‌باشد. همانطور که در این شکل هم مشاهده می‌کنید ضریب ایمنی بلوک‌های ۲، ۶ و ۸ کمتر از یک می‌باشد. امکان تشکیل بلوک ۲ در دیواره چپ، بلوک ۶ در سقف و بلوک ۸ در دیواره و سقف سمت راست پیش‌بینی می‌شود.

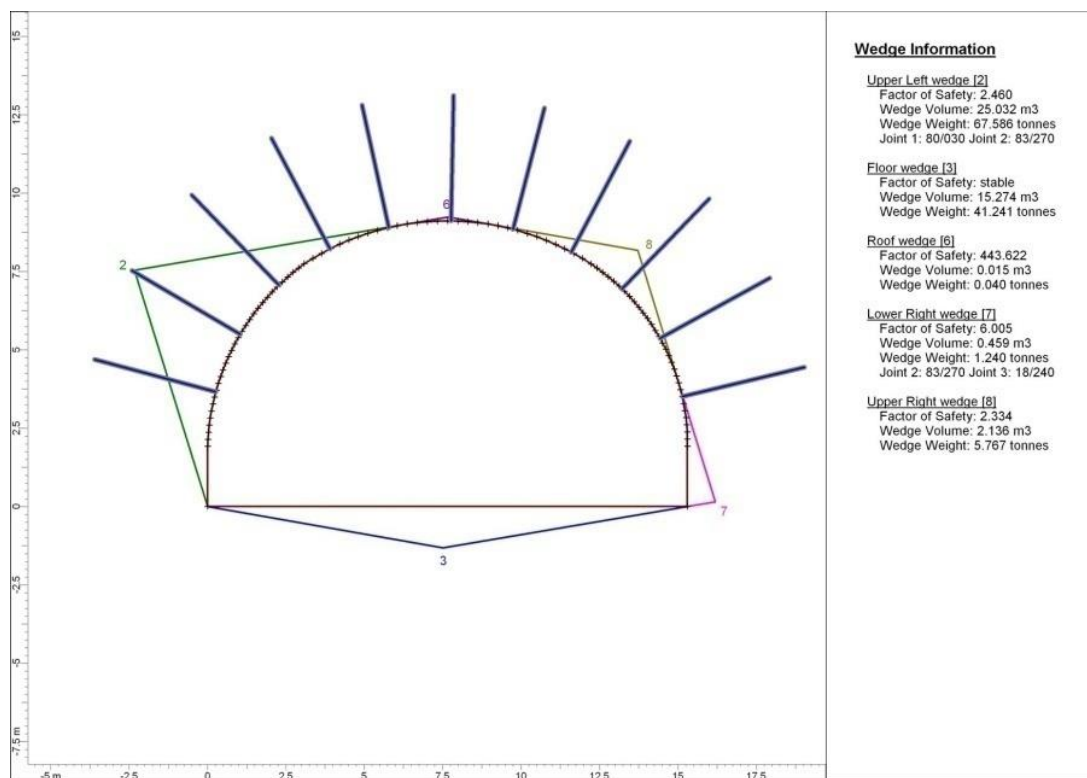


شکل ۶-۷ هندسه و مشخصات گوه‌های تشکیل شده احتمالی در تونل (زون LM-2)

آرایش پیچ‌سنگی که در فصل قبل توسط مدل‌های عددی مورد تأیید قرار گرفت بر روی این مقطع نصب گردید، طول پیچ‌سنگ‌ها ۴ متر و فاصله داری طولی و محیطی آن‌ها ۲ متر می‌باشد.

در شکل ۷-۷ نتایج نصب پیچ‌سنگ‌ها نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از

این سیستم نگهداری باعث پایداری بزرگترین گوه‌های احتمالی در این مقطع خواهد شد.



شکل ۷-۷ افزایش ضریب اطمینان گوه‌های لغزشی در تونل با اعمال پیچ‌سنگ (LM-2)

در زون CZ علاوه بر لایه‌بندی فقط یک‌سری ناپیوستگی دیگر وجود خواهد داشت که آن هم دسته

درزه‌ای با شیب ۹۰ درجه و امتداد شیب ۳۰ درجه است و بنابراین نرم افزار نمی‌تواند گوه‌ای را تشخیص دهد.

۷-۵- نتیجه‌گیری

سازه‌هایی که در توده‌های سنگی با چند دسته ناپیوستگی حفر می‌شوند، ممکن است با بلوک‌های

سنگی دارای اندازه‌های متفاوت در سطح خود مواجه شوند در چنین وضعیتی باید سقوط و لغزش بالقوه

بلوک‌ها ملاک طراحی قرار گیرد زیرا جابجایی بلوک‌هایی که بحرانی‌ترین نحوه استقرار را دارند می‌توانند

بلوک‌های مجاور خود را سست کنند و سقوط و لغزش آن‌ها می‌تواند برای فضای مورد نظر تهدید کننده باشد. امکان تشکیل این بلوک‌ها و ضریب اطمینان آن‌ها در واحدهای مختلف تونل ایمان مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به نمودارهای ارائه شده در این فصل مشخص گردید که آرایش پیچ‌سنگ تأیید شده توسط مدلسازی عددی، می‌تواند با ضریب اطمینان مناسب، از سقوط و یا لغزش بلوک‌های ناپایدار جلوگیری کند.

۸-۱- نتیجه‌گیری

به منظور توسعه شبکه ارتباطی شهر شیراز احداث مسیر، شامل راه، پل و تونل به صورت بزرگراه در شمال شرقی شیراز و عبور از محله پشت مله و قطع کوه‌های آهکی خیار سوخته و عبور روگذر از بزرگراه چمران به طرف میدان قصرالدشت بوسیله شهرداری مدنظر می‌باشد. با وجود ارتفاعات کوهستانی در محدوده شمال شهر به منظور برقراری ارتباط عبوری از منطقه پشت مله به پل عبوری از بزرگراه چمران، تونل ارتباطی در نظر گرفته شده است. این طرح دارای دو تونل دسترسی شهری با فاصله ۲۱ متر از یکدیگر که هر یک با طول حدوداً ۲۵۰ متر دارای مقطع نیم دایره، و دارای مسیر سه خطه در هر تونل می‌باشند. در این پایان‌نامه تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت تونل‌های ایمان با استفاده از سه روش تجربی، تحلیلی و عددی ارائه شد. در ابتدا سیستم نگهداری تونل با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی ارائه شد. نتایج تحلیل پایداری با استفاده از روش‌های تجربی نشان داد که کیفیت توده‌سنگ‌ها برای زون‌های LM1, LM2 در حد متوسط و برای زون CZ ضعیف می‌باشد.

سیستم نگهداری پیشنهادی با استفاده از سیستم طبقه‌بندی RMR در زون LM1 شبکه مربعی پیچ‌سنگ به طول ۴ متر با فاصله ۱/۵ متر و شاکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر می‌باشد.

در زون LM2 سیستم نگهداری پیشنهادی، پیچ‌سنگ به طول ۳ متر با فاصله داری ۲/۵ متر و شاکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر است. در زون CZ سیستم نگهداری پیشنهادی، پیچ‌سنگ بطول ۵ متر با فاصله داری ۱ متر و شاکریت به ضخامت ۱۵ سانتیمتر است و در صورتی که سیستم پیچ‌سنگ در این زون کارایی نداشته باشد می‌توان از قاب‌های فولادی با فاصله ۱/۵ متر از هم استفاده کرد.

سیستم نگهداری پیشنهادی با استفاده از سیستم Q در زون LM1 و LM2 شبکه منظم پیچ‌سنگ به طول ۴ متر با فاصله ۲ متر و شاکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر است ولی در زون CZ پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله ۱/۵ متر و شاکریت به ضخامت ۱۲ سانتیمتر در نظر گرفته شده‌است.

برای مشخص کردن وسعت زون پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل‌ها و عکس العمل سیستم نگهداری بر آن، تحلیل‌ها بر اساس منحنی مشخصه زمین-سیستم نگهداری صورت پذیرفت. مطالعات انجام شده نشان داد که در زون CZ منطقه پلاستیک نسبتاً بزرگی در اطراف تونل‌ها وجود خواهد داشت که با توجه به نتایج محاسبات، اعمال سیستم نگهداری مرکب از پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۱/۵ متر و شاکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر پیشنهاد شده است و در صورت عدم کارایی پیچ‌سنگ‌ها می‌توان از قاب‌های فولادی 10I35 و یا قاب ساخته شده از دو تیر آهن 16I استفاده کرد. در مورد زون‌های LM1, LM2 مسأله حادی مشاهده نشد و نمودارهای بدست آمده خطی و الاستیک می‌باشند.

از آنجایی که تحلیل پایداری به روش تجربی و منحنی مشخصه زمین دارای محدودیت‌هایی هستند به عنوان نمونه در مورد روش‌های تجربی، میزان تنش‌های موجود در توده سنگ، ضریب K، شکل هندسی

تونل دارای کمیتی نبوده و علاوه بر آن بر مبنای تجارب دیگران استوار می‌باشند؛ بالطبع نتایج آن‌ها برای کارهای اجرایی ممکن است زیاد اطمینان بخش نباشد. در مورد منحنی مشخصه زمین نیز، واحد در نظر گرفتن ضریب K ، فرض مقاطع دایره‌ای و تقارن شعاعی از محدودیت‌های این روش می‌باشند. بنابراین برای رسیدن به تحلیل کامل‌تر پایداری تونل‌های مذکور، روش عددی که بسیاری از محدودیت‌های فوق‌الذکر را به همراه ندارد مناسب تشخیص داده شد. سیستم نگهداری پیشنهادی با استفاده از روش عددی برای زون LM1 پیچ‌سنگ‌های ۴ متری با فاصله داری ۲ متر و شاکریت به ضخامت ۱۰ سانتیمتر است. در مورد زون LM2 آرایش پیچ‌سنگ‌ها مشابه LM1 است ولی ضخامت شاکریت ۵ سانتیمتر تعیین شده است.

سیستم نگهداری پیشنهادی در زون CZ با سیستم نگهداری پیش‌بینی شده به روش‌های قبل بسیار متفاوت بوده و سیستم نگهداری مناسب پیچ‌سنگ به طول ۶ متر با فاصله داری یک متر و شاکریت به ضخامت ۲۵ سانتیمتر تعیین شد در صورت عدم کارایی پیچ‌سنگ در این زون می‌توان از قاب فولادی 10I35 یا قاب ساخته شده از دو تیر آهن 16I استفاده کرد.

با تمام بررسی‌های انجام شده، مناسب دیده شد که تونل‌های ایمن از نظر ایجاد گوه در مسیر حفر مورد بررسی قرار گیرند؛ به همین دلیل پتانسیل تشکیل گوه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و در نهایت برای بزرگترین بلوک‌های ایجاد شده در مسیر حفر تونل‌ها سیستم نگهداری پیشنهاد گردید. این سیستم نگهداری ارتباط و هماهنگی نسبتاً مناسبی با نتایج حاصل از تحلیل عددی دارد و بالطبع سیستم‌های نگهداری پیشنهادی روش عددی برای سه زون ملاک نهایی ما برای تحلیل بلوکی می‌باشد.

۸-۲- پیشنهادات

به منظور تحلیل مناسب رفتار تونل‌ها و کارایی سیستم نگهدری ارائه شده نکات زیر پیشنهاد می‌شود:

- با ایجاد ایستگاه‌های ابزار دقیق در مسیر تونل علاوه بر مشاهده رفتار تونل در حین اجرا می‌توان با استفاده از آنالیز برگشتی، پارامترهای توده‌سنگ و همچنین شرایط توزیع تنش را با دقت بالایی تعیین نمود.

- به منظور شناسایی دقیق زون CZ که در واقع زون خرد شده مسیر تونل می‌باشد، شایسته است که یکی از گمانه‌های اکتشافی به این منطقه اختصاص داده شود.

- به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر تغییر شیب لایه‌بندی نسبت به امتداد حفر تونل، پیشنهاد می‌شود از نرم‌افزار سه بعدی 3DEC نیز کمک گرفته شود.

شاخص کیفیت سنگ (RQD)

در سال ۱۹۶۷ Deere و همکارانش شاخص کیفیت سنگ (RQD) را برای ارائه یک تخمین کمی از کیفیت توده سنگ که از مغزه‌های حفاری حاصل می‌شود، پیشنهاد کردند. RQD بعنوان درصد قطعات مغزه سالم بلندتر از صد میلی‌متر (چهار اینچ)، نسبت به طول کل مغزه بدست آمده تعریف می‌شود. حداقل قطر

مغزه باید اندازه NX (قطر ۵۴/۷ میلی‌متر) بوده و توسط مغزه گیر دو جداره حفاری شده باشد. پالمستروم (۱۹۸۲) پیشنهاد می‌نماید که چنانچه هیچ‌گونه مغزه‌ای وجود نداشته باشد اما طول اثر ناپیوستگی‌ها در رخنمون‌های سطحی و یا تونل‌های اکتشافی قابل مشاهده باشند، مقدار RQD را می‌توان از طریق شمارش تعداد ناپیوستگی‌های موجود در واحد حجم توده‌سنگ مورد بررسی، ارزیابی نمود. رابطه پیشنهادی برای سنگ‌های عاری از رس عبارتند از:

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad \text{اگر } J_v > 4.5 \quad \text{(الف-۱)}$$

$$RQD = 100 \quad \text{اگر } J_v < 4.5 \quad \text{(الف-۲)}$$

که در آن J_v مجموع تعداد درزه‌ها در واحد حجم توده سنگ است که به عنوان درزه‌های حجمی حساب می‌شوند.

اصولاً RQD پارامتری است که شدیداً به جهت اندازه‌گیری و پیمایش وابسته است. به طوری که بسته به جهت‌یابی گمانه، مقدار آن می‌تواند به طور قابل توجهی تغییر حاصل نماید. با استفاده از روش شمارش حجمی درزه‌ها می‌توان تا حد زیادی، این وابستگی (به جهت) را کاهش داد.

Merritt در سال ۱۹۷۲ دریافت که RQD می‌تواند برای برآورد وسایل نگهداری در تونل‌های سنگی

بکار رود که در جدول ۱ آمده است.

جدول الف-۱ توصیه‌های نگهداری تونل‌های سنگی (قطر ۶ تا ۱۲ متر- حفاری سنتی) بر مبنای RQD

کیفیت سنگ	پیچ سسنگ	شاتکریت	قاب فولادی
عالی RQD>90	فاقد تا استفاده گاهگداری	بدون استفاده تا استفاده گاهگداری کاربرد موضعی ۲ تا ۳ اینچ	بدون نگهداری تا گاهگاهی نگهداری سبک
خوب	بر طبق نقشه به	استفاده گاهگداری با کاربرد موضعی	نگهداری سبک به فاصله ۵ الی ۶ فوت

	به ضخامت ۲ تا ۳ اینچ	فاصله ۵ الی ۶ فوت	75<RQD<90
نگهداری سبک تا متوسط	در تاج و دیواره‌های تونل به	بر طبق نقشه به	متوسط
به فاصله ۴ الی ۵ فوت با یکدیگر	ضخامت ۴ اینچ و بیشتر	فاصله ۳ الی ۵ فوت	50<RQD<75
نگهداری متوسط یا سنگین	به ضخامت ۶ اینچ و یا بیشتر	بر طبق نقشه به	ضعیف
به فاصله ۲ الی ۴ فوت از یکدیگر	روی تاج و اطراف	فاصله ۲ الی ۴ فوت	25<RQD<50
نگهداری قوسی سنگین به فاصله ۲ فوت از یکدیگر	به ضخامت ۶ اینچ و یا بیشتر در تمام مقطع، ترکیبی با قاب فولادی سنگین	بر طبق نقشه به فاصله ۳ فوت	خیلی ضعیف RQD<25

رده بندی براساس ساختار سنگ (RSR)

این رده بندی در سال ۱۹۷۲ میلادی توسط ویکهام و همکارانش ارائه شد. این رده بندی روشی کمی برای شرح کیفیت توده سنگ و گزینش نگهداری مناسب برای زمین است و اولین سیستم کامل طبقه بندی توده سنگ پیشنهادی بعد از ترزاقی (۱۹۴۶) می باشد. گرچه این روش ابتدا برای طراحی سیستم نگهداری بتن پاشی (شاتکریت) ارائه شد، اما در مراحل بعدی، عمدتاً برای طراحی سیستم نگهداری تونل‌های کوچک که با قاب‌های فولادی نگهداری می شوند، به کار رفت. شاخص RSR به صورت زیر تعریف می شود :

$$RSR = A + B + C$$

(الف-۳)

که در آن :

A = پارامتر مشخص کننده وضعیت زمین شناختی توده سنگ که بر اساس نوع و سختی سنگ و

ساختار زمین شناختی توده سنگ تعیین می شود.

B = پارامتر مشخص کننده وضعیت هندسی سنگ که خود براساس وضعیت ناپیوستگی و با توجه به

فاصله داری درزه‌ها، جهت یافتگی درزه‌ها و امتداد حفر تونل تعیین می شود.

C = پارامتر مشخص کننده وضعیت جریان آب‌های زیرزمینی و درزه‌ها که براساس وضعیت درزه‌ها و

وضعیت کلی توده سنگ براساس پارامترهای A و B تعیین می‌شود.

جزئیات لازم برای تخمین ضرایب A، B و C در جداول ۲ تا ۴ آورده شده است. باید توجه داشت که

در بهترین شرایط، RSR برابر با ۱۰۰ است.

جدول الف-۲ امتیاز ساختاری سنگ، پارامتر A: زمین شناسی کل منطقه

ساخت زمین شناسی				نوع سنگ			
بشدت	نسبتاً	مختصراً	توده‌ای	تجزیه شده	نرم	متوسط	سخت
گسله یا	گسله یا	گسله یا		4	3	2	1
چین خورده	چین خورده	چین خورده		4	3	2	1
				4	4	3	2
9	15	22	30	نوع ۱			
8	13	20	27	نوع ۲			
7	12	18	24	نوع ۳			
6	10	15	19	نوع ۴			

جدول الف-۳ امتیاز ساختاری سنگ، پارامتر B: طرح درزه، جهت پیشروی

امتداد موازی با محور تونل			امتداد تونل عمود بر محور تونل				فاصله متوسط درزه‌ها	
جهت حفر تونل			جهت حفر تونل در جهت شیب					
هر دو حالت			خلاف شیب	هم شیب				
شیب درزه‌های مشخص و غالب			شیب درزه‌های مشخص و غالب					
مسطح	شیب‌دار	قائم	مسطح	شیب‌دار	قائم	قائم		
7	9	9	12	10	13	11	9	توده سنگ با درزه‌های خیلی نزدیک بهم (کمتر از ۲ اینچ)
11	14	14	17	15	19	16	13	توده سنگ با درزه‌های نزدیک بهم (۲ تا ۶ اینچ)

19	23	23	22	19	28	24	23	توده سنگ با درزه‌های با فاصله متوسط (۶ تا ۱۲ اینچ)
24	28	30	28	25	36	32	30	توده سنگ متوسط تا بلوکی (۱ تا ۲ فوت)
28	24	36	35	33	40	38	36	توده سنگ بلوکی متراکم (۳ تا ۴ فوت)
34	38	40	40	37	45	43	40	توده سنگ متراکم (بیش از ۴ فوت)

جدول الف-۴ امتیاز ساختاری سنگ، پارامتر C: آب زیرزمینی، وضعیت درزه‌ها

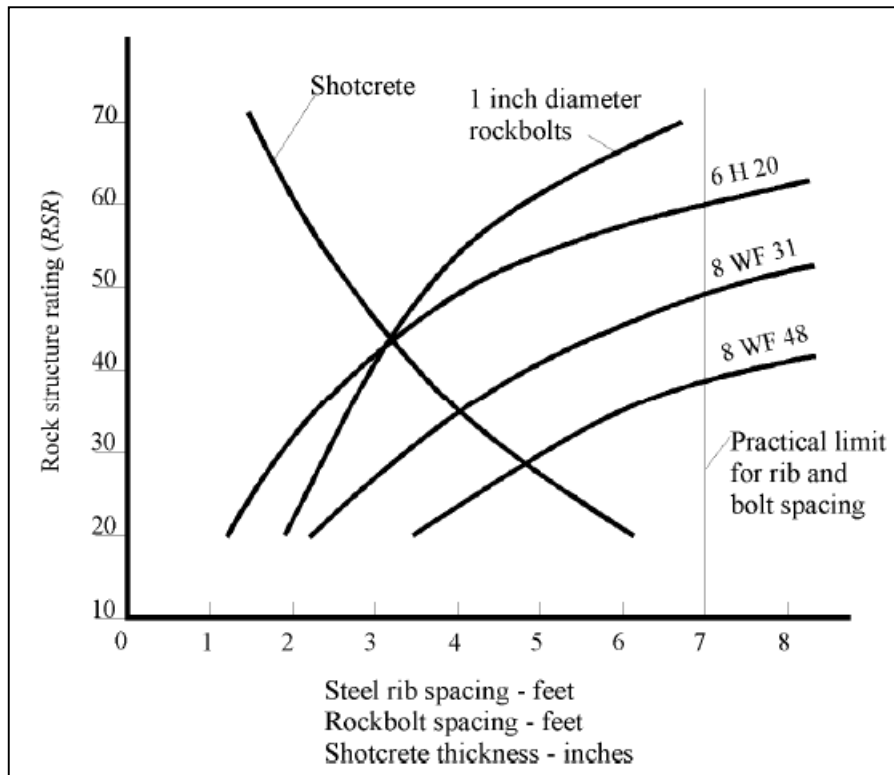
جمع پارامترهای A+B						جریان آب پیش بینی شده برحسب gpm/1000ft (گالن بر دقیقه در ۱۰۰۰ فوت)
45-75			13-42			
وضعیت درزه						
ضعیف	متوسط	خوب	ضعیف	متوسط	خوب	
18	22	25	12	18	22	هیچ
14	19	23	9	15	19	کم و کوچکتر از 200gpm
12	16	21	7	11	15	متوسط gpm (200-1000)
10	14	18	6	8	10	شدید بیش از 1000gpm

امروزه سیستم طبقه‌بندی RSR در حد وسیع و همه‌جانبه‌ای به کار نمی‌رود، ولی کار ویکه‌ام و

همکاران نقش مهمی را در رشد و توسعه طرح‌های مختلف طبقه‌بندی ایفا نموده است.

نمودارهایی که امکان تعیین سیستم‌های نمونه نگهداری زمین بر مبنای RSR را میسر می‌سازند، تهیه

گردیده است. یکی از این نمودارها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل الف-۱ تخمین نگهدارنده برای تونل‌های دایره‌ای به قطر ۷/۳ متر براساس طبقه بندی RSR

۲-۱-۳- رده بندی ژئومکانیکی RMR

در سال ۱۹۷۳ میلادی، بنیاوسکی از مرکز مطالعات علمی و صنعتی آفریقای جنوبی (CSIR) طبقه‌بندی توده سنگ‌ها را بر مبنای ویژگی‌های ژئومکانیکی آن‌ها ارائه داد که به روش RMR یا CSIR معروف است و به عنوان یکی از موفق‌ترین سیستم‌های رده بندی سنگ‌ها در مسائل تونل‌سازی به کار می‌رود. بعدها در سال ۱۹۸۹ میلادی، بنیاوسکی رده بندی اولیه خود را اصلاح کرد و آنچه در زیر خواهد آمد، بر مبنای رده بندی تجدید نظر شده وی است.

در تقسیم بندی RMR، برای رده بندی سنگ‌ها از ۶ پارامتر زیر استفاده می‌شود:

الف: مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ

ب: شاخص RQD

ج: فاصله داری درزه‌ها

د: وضعیت ناپیوستگی‌های سنگ

ه: وضعیت آب‌های زیرزمینی

ز: جهت یافتگی ناپیوستگی سنگ نسبت به امتداد تونل

برای ایجاد طبقه بندی ژئومکانیکی، توده سنگ موجود در طول مسیر تونل به تعدادی واحدهای ساختمانی تقسیم می‌گردند. به عبارت دیگر بخش‌هایی که شرایط زمین شناسی آن‌ها کم و بیش یکسان می‌باشند، در یک واحد قرار می‌گیرند. شش پارامتر طبقه بندی فوق برای هر واحد ساختاری، با اندازه گیری در محل تعیین گردیده و در فرم‌های استاندارد درج می‌گردند.

برای این که ارزش عددی هر سنگ در رده بندی RMR مشخص شود، به ازای هر وضعیت از ۶ پارامتر اصلی یادشده، نمره‌ای تعلق می‌گیرد که جزئیات آن در جداول الف-۵ درج شده است.

جدول الف-۵ سیستم طبقه‌بندی RMR بنیواسکی ۱۹۸۹

الف: پارامترهای طبقه بندی و امتیاز آنها										
برای این محدوده، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری ترجیح داده می‌شود.			1 - 2MPa	2 - 4MPa	4 - 10MPa	>10MPa	شاخص مقاومت بار نقطه‌ای	مقاومت ماده سنگ	1	
1-3	3-10	10-25	25 - 50MPa	50 - 100MPa	100 - 250MPa	>250MPa	مقاومت فشاری تک محوری	بکر		
0	1	2	4	7	12	15	امتیاز			
<25%			25% - 50%	50% - 75%	75% - 90%	90% - 100%	شاخص کیفیت سنگ (RQD)			2

3	8	13	17	20	امتیاز
---	---	----	----	----	--------

<60mm	60 - 200mm	200 - 600mm	0.6 - 2m	>2m	فاصله ناپیوستگی‌ها	3
5	8	10	15	20	امتیاز	

ضخامت مواد پرکننده نرم بیش از ۵ میلیمتر یا بازشدگی بیش از ۵ میلیمتر درزه‌ها بصورت ممتد	سطوح صیقلی با پرشدگی با ضخامت کمتر از ۵ میلیمتر بازشدگی ۱ تا ۵ میلیمتر بصورت ممتد	سطوح کمی زبر باز شدگی کمتر از ۱ میلیمتر دیواره درزه‌ها شدیداً هوازده	سطوح کمی زبر باز شدگی کمتر از ۱ میلیمتر دیواره درزه‌ها کمی هوازده	سطوح خیلی زبر غیر ممتد جدا نشده دیواره درزه‌ها غیر هوازده	شرایط ناپیوستگی	4
0	10	20	25	30	امتیاز	

> 125	25 - 125	10 - 25	< 10	بدون آب	جریان ورودی آب در هر ۱۰ متر طول تونل (لیتر بر متر)	آب زیرزمینی	5
> 0.5	0.2 - 0.5	0.1 - 0.2	< 0.1	0	نسبت فشار آب درزه به تنش اصلی بزرگتر		
جریان آب	چکیدن آب	خیس	مرطوب	کاملاً خشک	شرایط عمومی		
0	4	7	10	15	امتیاز		

ب- تعدیل امتیاز برای جهت یابی درزه‌ها						
خیلی نامساعد	نامساعد	مناسب	مساعد (مطلوب)	خیلی مساعد	راستا و جهت میل درزه‌ها	امتیاز
-12	-10	-5	-2	0	تونل‌ها و معادن	
-25	-15	-7	-2	0	پی‌ها	
	-50	-25	-5	0	شیروانی‌ها	
پ- رده و کلاس توده سنگ بر اساس امتیاز کل						

< 21	40 - 21	60 - 41	80 - 61	100 - 81	امتیاز
V	IV	III	II	I	شماره طبقه (کلاس)
سنگ خیلی ضعیف	سنگ ضعیف	سنگ متوسط	سنگ خوب	سنگ خیلی خوب	توصیف

ت - معنای رده و کلاس سنگ

شماره کلاس	I	II	III	IV	V
متوسط زمان خود پایداری	دهانه ۱۵ متری	برای دهانه ۱۰ متری	برای دهانه ۵ متری	ده ساعت برای دهانه ۵/۲ متری	سی دقیقه برای دهانه ۱ متری
چسبندگی توده سنگ (Kpa)	>400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	<100
زاویه اصطکاک توده سنگ (درجه)	> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15

ت - رهنمودهایی برای طبقه بندی شرایط ناپیوستگی ها

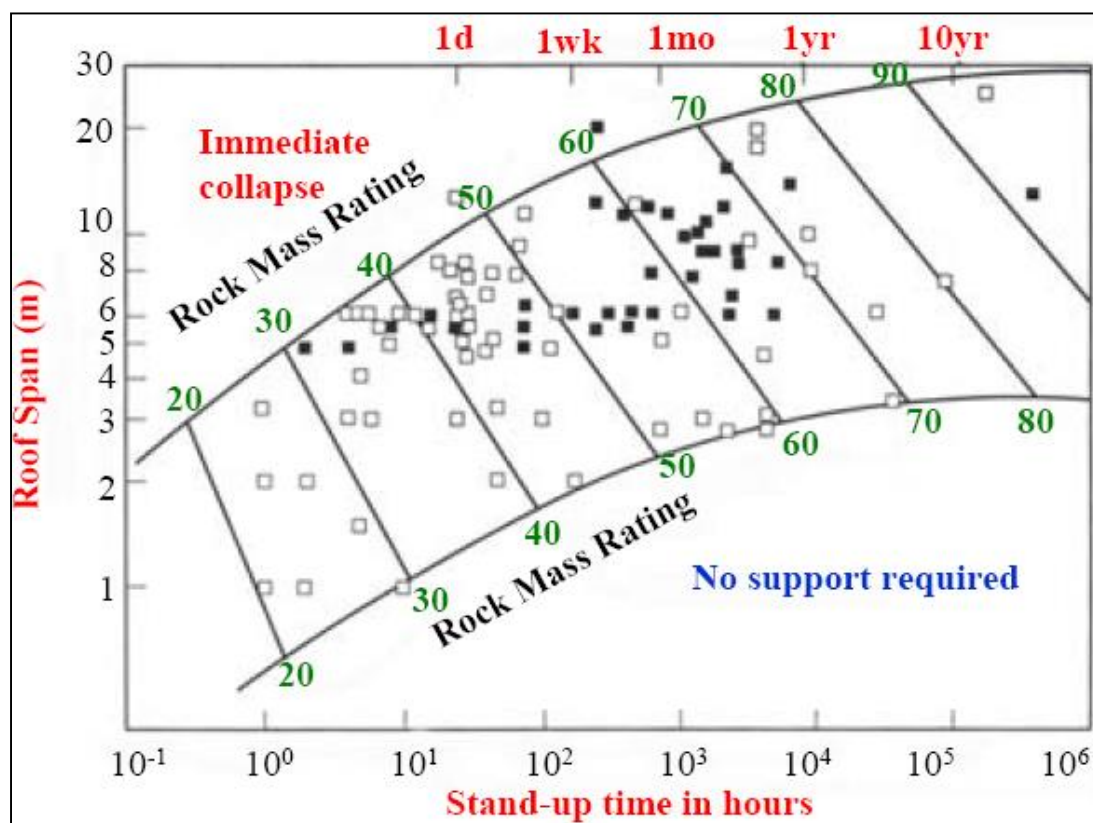
طول ناپیوستگی	< 1m	1 - 3m	3 - 10m	10 - 20m	>20m
امتیاز	6	4	2	1	0
بازشدگی	ندارد	< 0.1mm	0.1 - 1.0mm	1 - 5mm	>5mm
امتیاز	6	5	4	1	0
زبری	خیلی زبر	زبر	کمی زبر	صاف	صیقلی
امتیاز	6	6	3	1	0
پرشدگی	ندارد	پرکننده سخت > ۵ میلیمتر	پرکننده سخت < ۵ میلیمتر	پرکننده نرم > ۵ میلیمتر	بیش از ۵ میلیمتر پرکننده نرم
امتیاز	6	4	2	2	0
هوازدهی	هوازده	کمی هوازده	هوازدهی متوسط	هوازدهی زیاد	متلاشی شده
امتیاز	6	5	3	1	0

ج - اثر راستا و جهت شیب در تونلسازی

امتداد موازی محور تونل		امتداد عمود بر محور تونل	
زاویه شیب ۲۰-۴۵ درجه	زاویه شیب ۴۵-۹۰ درجه	جهت پیشروی هم جهت شیب، شیب ۲۵-۴۵ درجه	جهت پیشروی هم جهت شیب، شیب ۴۵-۹۰ درجه
مناسب	خیلی نامساعد	مساعد	خیلی مساعد
زوویه شیب ۲۰-۰ درجه بدون توجه به راستا		جهت پیشروی خلاف جهت شیب، شیب ۲۵-۴۵ درجه	جهت پیشروی خلاف جهت شیب، شیب ۴۵-۹۰ درجه

به کمک منحنی شکل ۲ می‌توان زمان پابرجایی برای دهانه مورد نظر را تعیین کرد. در این دیاگرام

موارد تاریخی ریزش سقف در معدنکاری با مربع سیاه و ریزش‌های سقف در تونل سازی با مربع سفید نشان داده شده است.



شکل الف-۲ تعیین زمان پابرجایی تونل براساس امتیاز RMR

در سال ۱۹۸۹ بنیادسکی یک مجموعه راهنما برای انتخاب نگهدارنده در تونل‌های سنگی با توجه به

RMR معلوم آن‌ها ارائه کرد. این راهنما در جدول ۶ آمده است. باید توجه داشت که این راهنما برای تونلی با

دهانه ۱۰ متر و مقطع نعل اسبی که تحت تنش عمودی کمتر از ۲۵ مگاپاسکال (معادل عمقی کمتر از

۹۰۰ متر) قرار گرفته و به روش چالزنی-آتشکاری حفاری می‌شود ارائه شده است.

جدول الف-۶ راهنمای حفاری و نگهداری تونل‌های سنگی با دهانه ۱۰ متر با توجه به سیستم RMR

رده و کلاس سنگ	حفاری	پیچ سنگ (قطر ۲۰ میلیمتر تمام تزریقی با)	بتن پاشیده	قاب های فولادی
۱- سنگ خیلی خوب RMR=81-100	حفاری تمام سطح با سه متر پیشروی	معمولاً به استثنای پیچ سنگ‌های موضعی به نگهدارنده احتیاج ندارد.		
۲- سنگ خوب RMR=61-80	حفاری تمام سطح ۱ تا ۱/۵ متر پیشروی، فاصله نگهدارنده کامل از جبهه کار، ۲۰ متر	موضعی، پیچ سنگ‌های سقف بطول ۳ متر با فاصله ۲/۵ متر و گاهی همراه با توری سیمی کامل	۵۰ میلیمتر در سقف اگر نیاز باشد	نیازی نیست
۳- سنگ متوسط RMR=41-60	حفاری بصورت پله ای پیشروی تاج ۱/۵ تا ۳ متر جلوتر از کف نصب نگهدارنده، بعد از هر آتشکاری فاصله نگهدارنده کامل از جبهه کار ۱۰ متر	شبکه منظم پیچ سنگ به طول ۴ متر با فاصله ۱/۵ متر تا ۲ متر در سقف و دیواره و در سقف همراه با توری سیمی	۵۰ تا ۱۰۰ میلیمتر در سقف و ۳۰ میلیمتر در دیواره‌های جانبی	نیازی نیست
۴- سنگ ضعیف RMR=21-40	حفاری بصورت پله ای پیشروی تاج ۱ تا ۱/۵ متر جلوتر از کف نصب نگهدارنده، بعد از هر آتشکاری فاصله نگهدارنده کامل از جبهه کار ۱۰ متر	شبکه منظم پیچ سنگ به طول ۴ تا ۵ متر با فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در سقف و دیواره و همراه با توری سیمی	۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیمتر در سقف و ۱۰۰ میلیمتر در دیواره‌های جانبی	کم تا متوسط با فاصله ۱/۵ متر در صورت نیاز
۵- سنگ خیلی ضعیف RMR<21	حفاری با چند گالری پیشروی در قسمت بالایی ۱/۵ تا ۰/۵ متر جلوتر از کف، نصب نگهدارنده مداوم همراه با حفاری و پاشیدن بتن پاشیده سریعاً بعد از آتشکاری	شبکه منظم پیچ سنگ به طول ۵ تا ۶ متر با فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در سقف و دیواره و همراه با توری سیمی، در کف هم پیچ سنگ نصب شود.	۱۵۰ تا ۲۰۰ میلیمتر در سقف و ۱۵۰ میلیمتر در دیواره‌های جانبی و ۵۰ میلیمتر روی سطح جبهه کار	متوسط تا زیاد با فاصله ۰/۷۵ متر همراه با پوشش‌های فولادی بین قاب‌ها و در صورت نیاز پیش تزریق روی جبهه کار

۲-۱-۴- رده بندی بر اساس شاخص کیفیت تونل سازی Q

بارتون و همکارانش از انسیتیتو ژئوتکنیک نروژ (NGI) بر مبنای ارزیابی و تحلیل ۲۰۰ مورد تاریخی

تونل در اسکاندیناوی، شاخصی موسوم به شاخص کیفیت تونل سازی را ارائه کردند که به نام شاخص Q

معروف است. شاخص Q با رابطه ریاضی زیر تعریف می‌شود. اندازه عددی آن که به صورت مقیاس لگاریتمی

تغییر می‌کند، بین ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰ در تغییر است:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{الف-۴})$$

که در آن :

RQD = درجه کیفی سنگ

J_n = ضریب مربوط به تعداد درزه‌ها

J_r = ضریب مربوط به زبری درزه‌ها

J_a = ضریب مربوط به دگرسانی درزه‌ها

J_w = ضریب مربوط به کاهش درزه‌ها

SRF = ضریب مربوط به کاهش تنش

بارتن و همکاران پارامترهای J_n ، J_r و J_a را به عنوان مبنا مهمتر از جهات درزه در نظر گرفتند و

معتقدند اگر جهات درزه نیز در نظر گرفته می‌شد، عمومیت طبقه بندی کمتر می‌گردید. اما تعیین جهات در

پارامترهای J_r و J_a به طور ضمنی در نظر گرفته شده زیرا این پارامترها برای نامطلوبترین درزه تعیین

می‌شوند.

عبارت $\frac{RQD}{J_n}$ در رابطه الف-۴، بیانگر ساختار توده سنگ و تخمین اولیه‌ای از ابعاد قطعه‌ها و یا

ذرات سنگ است و در محدوده ۰.۵ تا $\frac{10}{20}$ تغییر می‌کند. عبارت $\frac{J_r}{J_a}$ نشانگر ویژگی‌های زبری و

اصطکاک دیواره درزه‌ها و مواد پرکننده آن‌ها است. در شرایطی که سطح درزه زبر و عاری از هرگونه آثار و شواهد هوازدگی و تماس مستقیم سنگ با سنگ نیز برقرار باشد، این عبارت وزن دار می‌گردد. در این مورد انتظار می‌رود که این سطح، به مقاومت اوج خود نزدیک شده و هنگامی که تحت تأثیر نیروهای برشی قرار می‌گیرند، به شدت حالت اتساع را از خود نشان می‌دهند. به طور کلی درزه‌هایی با این مشخصات، برای پایداری تونل، مناسب و مساعد خواهند بود.

عبارت $\frac{J_w}{SRF}$ ضریب تجربی پیچیده ای است که بیانگر تنش فعال است. مشخصه SRF به عوامل زیر

بستگی دارد:

الف: بار سست کننده در مواردی که تونل در زون‌های برشی و سنگ‌های حاوی رس، حفر می‌شود.

ب: تنش موثر بر سنگ در مورد سنگ‌های محکم و مقاوم

ج: بار ناشی از لهیدگی در مورد سنگ‌های خمیری و نامقاوم

برای تعیین شاخص Q در مورد هر سنگ، باید مقادیر عددی هر یک از ضرایب را از جدول مربوطه

استخراج کرد که جزئیات در جدول الف-۷ آمده است.

جدول الف-۷ امتیازات طبقه بندی سیستم Q (بارتن ۱۹۷۶)

تذکرات	مقدار	شرح و توصیف	
۱- وقتی مقدار RQD بین ۱۰-۰ باشد، برای تعیین Q مقدار RQD برابر با ۱۰ فرض می‌شود.	RQD (%)	۱- شاخص کیفیت سنگ	
	0 - 25	الف	خیلی ضعیف
	25 - 50	ب	ضعیف
	50 - 75	پ	متوسط

۲- مقادیر RQD با تغییرات ۵ تا ۱۰۰ به اندازه کافی دقیق هستند.	75 - 90	خوب	ت
	90 - 100	عالی	ث
۱- برای تقاطع دو تونل J_n را در ۳ ضرب کنید. ۲- برای ورودی تونلها J_n را در ۲ ضرب کنید.	J_n	۲- عدد مربوط به دسته درزهها	
	0.5 - 1.0	تراکم، بدون درزه یا با درزه کم	الف
	2	یک دسته درزه	ب
	3	یک دسته درزه و درزههای اتفاقی	پ
	4	دو دسته درزه	ت
	6	دو دسته درزه و درزههای اتفاقی	ث
	9	سه دسته درزه	ج
	12	سه دسته درزه و درزههای اتفاقی	چ
	15	چهار دسته درزه یا بیشتر، درزههای اتفاقی شدیداً درزه دار، دانههای حبه قندی و غیره	ح
	20	سنگ خرد شده شبیه خاک	خ
۱- چنانچه فاصلهبندی متوسط مجموعه درزهها بزرگتر از ۳ متر است، مقدار ۱ را به J_r اضافه کنید. ۲- $J_r=0.5-2$ را می توان برای درزههای مسطح و آینه ای که دارای لایه بندی باشد استفاده کرد، به شرطی که لایهها در جهتی قرار گرفته باشند که مقاومت حداقل باشد.	J_r	۳- عدد مربوط به زبری سطح درزهها	
		(a) دیواره درزهها در تماس با یکدیگر	
		(b) دیواره درزهها در تماس با یکدیگر قبل از ۱ سانتیمتر برش	
	4	درزههای ناپیوسته	الف
	3	زبر و نامنظم، موجدار	ب
	2	صاف و موجدار	پ
	1.5	آینه ای و موجدار	ت
	1.5	زبر و نامنظم و مسطح	ث
	1	صاف و مسطح	ج
	0.5	آینه ای و مسطح	چ
	(c) دیواره درزهها پس از برش در تماس نیستند.		
1	منطقه حاوی مواد رسی با ضخامت کافی که از تماس دیوارهها ممانعت می کند.	ح	
1	منطقه ماسه ای و گراولی یا سنگ خرد شده با ضخامت کافی که از تماس دیوارهها جلوگیری می کند.	خ	
J_n	۴- عدد مربوط به هوازدگی و دگرسانی درزهها		

(a) دیواره درزه‌ها در تماس هستند.		
0.75	الف	شدیدا جوش خورده، سخت، غیر نرم، مواد پرکننده غیر قابل نفوذ
1	ب	دیواره‌های درزه غیر هوازده، سطوح درزه‌ها فقط کمی هوازده
2	پ	دیواره درزه‌ها کمی هوازده شده است، مواد پوششی درزه‌ها کانی‌های غیر نرم هستند، ذرات ماسه ای، سنگ شکسته عاری از مواد رسی و غیره
3	ت	درزه‌ها با مواد سیلتی، رسی ماسه ای و بخش‌های کوچک رسی (غیر نرم) پوشیده شده است.
4	ث	درزه‌ها از مواد رسی نرم با اصطکاک کم، مثل کائولینیت، میکا و همچنین کلریت، تالک، گچ، گرافیت و غیره و مقادیر کم رس‌های تورمی پوشیده شده است (با ضخامت ۲-۱ میلی‌متر و یا کمتر است ناپیوسته، پوشش)
(b) دیواره درزه‌ها تا قبل از ۱۰ سانتیمتر حرکت برشی در تماس باهم هستند.		
4	ج	ذرات ماسه، سنگ شکسته عاری از مواد رسی و غیره
6	چ	شدیدا پیش تحکیم شده، مواد پرکننده رسی غیر نرم ممتد (و با ضخامت کمتر از ۵ میلی‌متر)
8	ح	پیش تحکیم شده متوسط یا کم، مواد پرکننده رسی نرم (ممتد و با ضخامت کمتر از ۵ میلی‌متر)
8.0 - 12.0	خ	مواد پرکننده تورمی رسی، مثل مونت موریلونیت، ضخامت کمتر از ۵ میلی‌متر). مقادیر به و با ممتد درصد اندازه ذرات رس تورمی و مقدار آب موجود بستگی دارد
		۳) دیواره درزه‌ها پس از برش در تماس نیستند.
6	د	مناطق یا نوارهای جدا شده و شکسته
8	ذ	سنگ و رس (به قسمت چ، ح و خ مربوط به شرایط
8.0 - 12.0	ر	رسی مراجعه شود)
5	ز	مناطق یا نوارهای سیلتی یا رس ماسه ای

قطعات کوچک رسی			
10 - 13	(به قسمت چ و ح و ح مربوط به شرایط رسی مراجعه شود)	س	
6 - 24		ش	
J_w	۵- عدد مربوط به وضعیت آب درزه‌ها		
1	حفاری خشک یا جریان آب فرعی، یعنی کمتر از ۵ لیتر بر دقیقه بصورت موضعی	الف	
0.66	جریان آب با فشار متوسط، آب شستگی مواد پرکننده گاهی اتفاق می افتد.	ب	
0.5	جریان آب زیاد یا فشار بالا در سنگ متراکم با درزه‌های پر نشده	پ	
0.33	جریان آب زیاد یا فشار بالا	ت	
0.2 - 0.1	جریان فوق العاده زیاد آب یا فشار در لحظه آتشکاری که با گذشت زمان کاهش می یابد.	ث	
0.1 - 0.05	جریان فوق العاده زیاد آب یا فشار	ج	
SRF	۶- ضریب کاهش تنش		
<p>۱- این مقادیر SRF را چنانچه مناطق برشی تونل را قطع نمی کند بلکه فقط تحت تاثیر قرار می دهد به میزان ۵۰٪-۲۵٪ کاهش دهید.</p> <p>۲- برای میدان تنش بکر شدیداً غیر ایزوتروپ (اگر اندازه گیری شده است): $10 \leq \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \leq 5$ مقدار σ_c را به $0.18\sigma_c$ و σ_t را به $0.18\sigma_t$ کاهش دهید. وقتی $\frac{\sigma_1}{\sigma_3} > 10$ مقدار σ_c و σ_t را به $0.16\sigma_c$ و $0.16\sigma_t$ کاهش دهید.</p> <p>σ_c مقاومت فشاری تک محوری و σ_t مقاومت کششی است.</p>	(a) مناطق ضعیفی تونل را قطع می کند که ممکن است موجب سستی توده سنگ هنگام حفاری تونل شود.		
	10	وقوع متعدد مناطق ضعیف که محتوی رس یا سنگ خرد شده و تجزیه شیمیایی شده است، سنگ خیلی سست در اطراف تونل (در هر عمق)	الف
	5	مناطق ضعیف منفرد محتوی رس، یا سنگ تجزیه شیمیایی شده و هوازده (عمق حفاری کمتر از ۵۰ متر)	ب
	2.5	مناطق ضعیف منفرد محتوی رس، یا سنگ تجزیه شیمیایی شده و هوازده (عمق حفاری بیش از ۵۰ متر)	پ
	7.5	مناطق برشی متعدد در سنگ متراکم (بدون رس)، سنگ سست در اطراف تونل (هر عمقی)	ت
	5	مناطق برشی منفرد در سنگ متراکم (عاری از رس) (از ۵۰ متر عمق حفاری کمتر)	ث

	2.5	مناطق برشی منفرد در سنگ متراکم (عاری از رس) (از ۵۰ متر عمق حفاری بیشتر)		ج	
	5	درزه‌های باز سست، شدیداً درزه دار یا بلوک‌های حبه قندی (هر عمقی)		چ	
۳- موارد معدودی وجود دارد که عمق از تاج تونل تا سطح زمین کمتر از عرض دهانه تونل است. در این مورد SRF را از ۲/۵ به ۵ افزایش دهید (ح را ببینید)	(b) سنگ متراکم، مسائل تنش در سنگ				
	2.5	σ_c/σ_1	تنش کم	ح	
		σ_t/σ_1			
	1	13 - 0.66	200 - 10	تنش متوسط	خ
	0.5 - 2	0.66-0.33	5-10	تنش زیاد (معمولاً از نظر پایداری مساعد است. ممکن است برای پایداری دیواره‌ها نامساعد باشد)	د
	5-10	0.33-0.16	5 - 2.5	انفجار ملایم سنگ	ذ
	10-20	< 0.16	< 2.5	انفجار شدید سنگ	ر
	(c) سنگ لهیده، جریان پلاستیک سنگ غیر متراکم، تحت تاثیر فشار زیاد سنگ				
	5-10	فشار سنگ ناشی از لهیدگی ملایم			ز
	10-20	فشار سنگ ناشی از لهیدگی شدید			ژ
	(d) سنگ تورمی، تداوم تورم بعلت فعل و انفعالات شیمیایی بسته به حضور آب				
	5-10	فشار سنگ ناشی از تورم ملایم			س
10-20	فشار سنگ ناشی از تورم شدید			ش	

با ارزیابی شش پارامتر فوق اندیس کیفی سنگ یعنی Q محاسبه می‌شود. Q بدست آمده با کمیت

دیگری موسوم به اندازه معادل حفاری به نوع نگهداری ارتباط پیدا می‌کند. این کمیت تابعی است از ابعاد فضا

و نوع کاربرد و از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\text{بعد معادل حفاری} = \frac{B}{ESR} \quad (\text{الف-۵})$$

در رابطه فوق ESR یا ضریب پایداری فضا، عددی است که مطابق جدول ۸ بستگی به کاربرد فضای

حفاری شده و ایمنی مورد نیاز دارد.

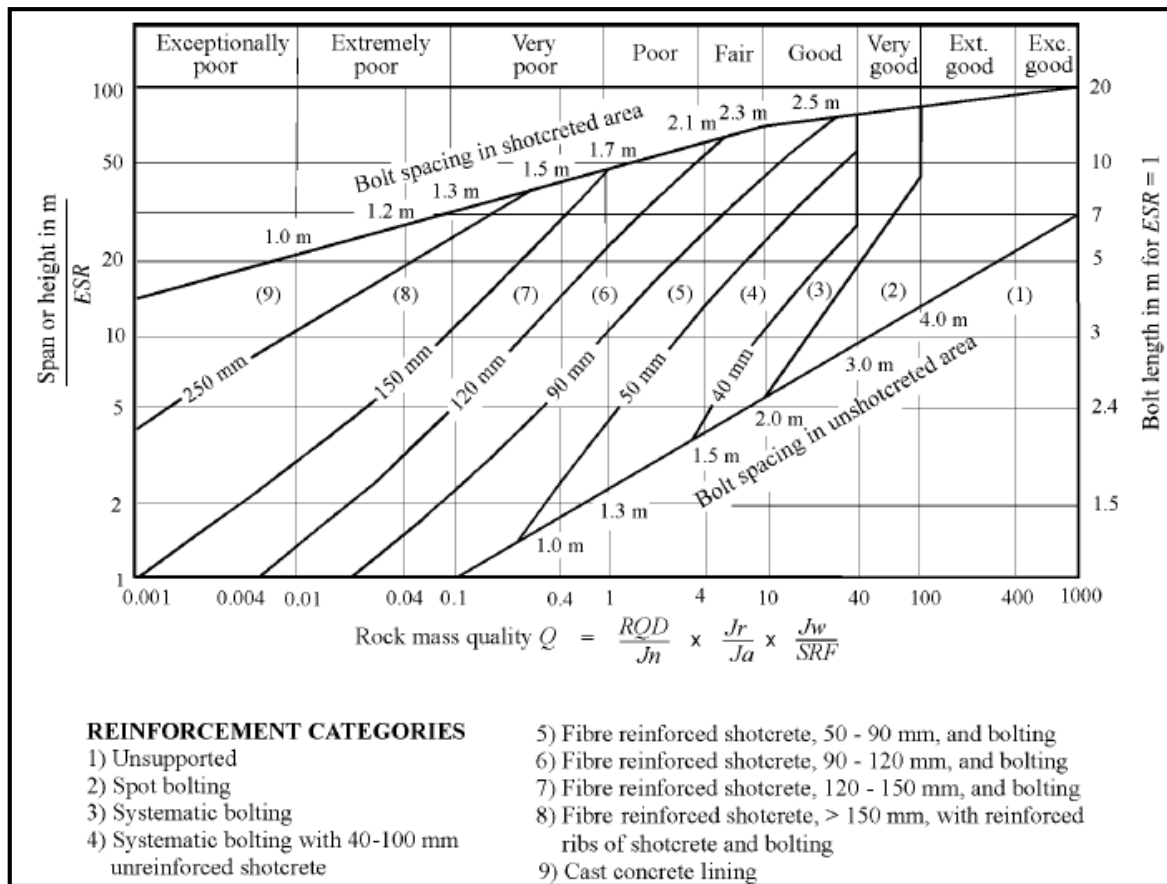
با معین بودن مقدار Q و اندازه دهانه معادل به کمک نمودارها و جداول مربوطه ابتدا کلاس نگهداری

مشخص و سپس سیستم نگهداری مناسب پیشنهاد می‌شود. جهت تعیین کلاس نگهداری از شکل ۳ استفاده

می‌شود.

جدول الف-۸ تعیین ESR با توجه به کاربری تونل

ESR	نوع حفاری
۳-۵	حفاری‌های موقت معدنی
۲-۲/۵	چاه‌ها
۱/۶	کارهای دائمی معدنی، تونل‌های آب برای تولید نیرو
۱/۳	انبار، تاسیسات، تصفیه آب شاهراه‌های کوچک، تونل‌های راه آهن
۱	نیروگاه‌ها، شاهراه‌های بزرگ ورودی‌ها و تقاطع‌ها
۰/۸	نیروگاه‌های هسته‌ای، ایستگاه‌های راه آهن، کارخانجات زیرزمینی



شکل الف-۳ تخمین رده نگهدارنده بر اساس شاخص کیفی تونلرزی Q

منابع

- [۱] اویسی، بهنام. نقشه و گزارش زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ کلستان، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [۲] اویسی، بهنام. عنصلیبی، م. نقشه و گزارش زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شیراز، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [۳] بایرون، آریگلو. "طراحی سیستم‌های نگهداری در معادن"، ترجمه همتیان، جمال. موسسه نشر جهاد، ۱۳۷۶.
- [۴] ترابی، سیدرحمان. "مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ"، انتشارات دانشگاه شاهرود، ۱۳۸۱.
- [۵] خسروی، فریدون. روش اجرا (پروژه تونل ایمان شیراز)، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء، قرب کربلا، مهندسین مشاور طاها، (۱۳۸۴-الف)

- [۶] خسروی، فریدون. پایداری شیب ترانشه‌ها (پروژه تونل ایمان شیراز)، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء، قرب کربلا، مهندسیین مشاور طاها، (۱۳۸۴-ب)
- [۷] خسروی، فریدون. مطالعات ژئوتکنیک (پروژه تونل ایمان شیراز)، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء، قرب کربلا، مهندسیین مشاور طاها، (۱۳۸۴-ج)
- [۸] دهخدا، سودا. "کاربرد مجموعه‌های فازی در سیستم طبقه بندی شاخص مقاومت زمین شناسی"، مجموعه مقالات کنفرانس هفتم تونل ایران، ۱۳۸۵، جلد اول، ۵۳-۴۱.
- [۹] طاهریان، عبدالرضا. "مهندسی سنگ کاربردی"، انتشارات دهخدا، ۱۳۸۱.
- [۱۰] عبداللهی، محمدرضا. پدرامی، منوچهر. شاهبیگ، امیر. نقشه زمین شناسی مهندسی و زیست محیطی شیراز (ویژگی‌های سنگی و خاکی) ۱/۵۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [۱۱] فردوسی، بهنام. تحلیل پایداری تونل‌های انحراف سد تهم، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۶.
- [۱۲] مدنی، حسن. تونلسازی جلد سوم "تحلیل پایداری"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۱.
- [۱۳] مدنی، حسن. تونلسازی جلد چهارم "طراحی و اجرای سیستم نگهداری" مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۱، ۶۰-۳۰.
- [۱۴] مرتضوی، علی. "محاسبه عرض پایه بهینه پروژه تونل دوقلوی شیراز با استفاده از روش عددی"، مجموعه مقالات کنفرانس هفتم تونل ایران، ۱۳۸۵، جلد اول، ۴۰۷-۴۰۳.
- [۱۵] معظمی نژاد، غلامرضا، راهنمای نرم افزار UNWEDGE، پایان نامه کارشناسی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شاهرود، ۱۳۷۸.
- [۱۶] هراتی، محمدرضا. "طبقه‌بندی مهندسی سنگ در ارتباط با طراحی فضاهای زیرزمینی"، ۱۳۷۴.
- [۱۷] هوک و براون. سازه‌های زیرزمینی در سنگ، ترجمه فهیمی‌فر، احمد. آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری، ۱۳۷۶، فصل هشتم، صفحات ۳۰۱-۲۷۹.
- [۱۸] هوک و کیسر. "نگهداری حفاریات زیرزمینی در سنگ‌های سخت"، ترجمه قارونی‌نیک، مرتضی. ۱۳۸۰.

[19] Bieniawski, Z.T. "Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling" A.A. Balkema Publishing co, 1984.

[20] Daemen, J. "Problems in tunnel support mechanics". Underground Space Technology, vol 1, (1977). Pp. 163-172

[21] Goodman R.E. & Shi G.H. "Block theory and its Application to Rock Engineering" , Prentice-Hall Inc, New Jersey, 1985.

[22] Goodman, Richard E. "Introduction to Rock Mechanics " , Second Edition, New York, John Wiley and Sons, 1989.

[23] Hoek, E, Kaiser and Bawden, W.F., "Support of Underground Excavation in Hard Rock", 1st Edition, A.A.Balkema, Rotterdam, 1995.

[24] Hoek E, Brown ET. "Practical estimated of rock mass strength". International journal of rock mechanic and mining Science ;34 (8), 1997. PP. 1165-1186

[25] Hoek, E. Marinos, P. & Benissi, M. "Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses", the case of the Athens Schist Formation, Bulletin of Engineering Geology Environment, 57(2), 1998. pp.151-160.

[26] Hoek, E. "Putting numbers to geology-an engineer's view point". Quarterly Journal of Engineering Geology 32, (1999 a).pp. 1-19.

[27] Hoek, E. "Support for Very Weak Rock Associated with Faults and Shear Zones". Distinguished Lecture for the opening of the International of Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Kalgoorlie, Australia 14-19 March, (1999 b).

[28] Hoek, E., morinos, P. "Predicting Tunnel Squeezing Problem in Weak Heterogeneous Rock mass". Tunnels and Tunneling International, Part 1- November 2000, Part 2- December 2000.pp. 45-51.

[29] Hoek, E. Rock Engineering. Course Notes by Evert Hoek. Balkema, Rotterdam, 2000.
Hoek, E. "Big Tunnels In Bad Rock", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, September 2001.pp. 726-740.

[30] Itasca Consulting Group, Inc. "UDEC Manual", 2004

[31] Ladanyi ,B. "Use of the long-term strength concept in the determination of ground pressure on tunnel linings". Proc. 3ed Congr, international society Rock Mechanic, Denver, vol 28, 1974. pp. 1150-1156.

[32] Rocscience Int., " Unwedge User Manual, Ver. 5.1"

[33] Sonmez, H. Ulusay, R. "Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36, 1999.pp.743–760.