



پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

تحلیل پایداری تونل گردنه رخ شهرکرد- اصفهان

و پیش‌بینی سیستم نگهداری اولیه

دانشجو:

سید بهنام موسویان

اساتید راهنما:

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر رضا خالو کاکائی

زمستان ۸۶

سپاسگزاری:

خداوند بزرگ را سپاس می‌گوییم که به اینجانب توفیق داد تا بتوانم این مجموعه را به پایان برسانم و خدمتی هر چند ناچیز به جامعه علمی کشور تقدیم نمایم.

بی‌شک این پایان نامه بدون زحمات دلسوزانه پدر و مادرم که در تمام دوران تحصیل از من دریغ نکرده‌اند و همکاری صمیمانه همسرم که در این مدت سختی‌های این راه را تحمل کرده‌است، نمی‌توانست به ثمر بنشیند. بر خود می‌دانم تا از کلیه اساتید محترم دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود آقایان دکتر کاکائی، دکتر سرشکی، دکتر عطائی، دکتر ترابی، دکتر میرعابدینی و ... که در طول تحصیل؛ و از آقایان دکتر سرشکی و دکتر کاکائی که در امر انجام این پایان نامه مرا راهنمایی کردند، کمال تشکر را داشته باشم. از همکاری صمیمانه اداره راه و ترابری استان، آقای مهندس پودش، شرکت مهندسیین مشاور برآیند، آقایان مهندس جودی، مکی آبادی، نژادی، جعفریان، فرازنده، پرسنل تونل گردنه رخ و مهندس تورگلی، مهندس صفی، مهندس لاجوردی، مهندس دیابی، مهندس بجاری، مهندس درست‌کار و کلیه کسانی که به اینجانب در انجام پروژه کمک کرده‌اند سپاسگزاری می‌کنم.

تقدیم به:

مادر، پدر، همسر و خواهرانم.

چکیده

با افزایش روزافزون جمعیت و تردد بیش از پیش وسایل نقلیه موتوری، احتمال تصادفات و مرگ و میر روز به روز در حال افزایش است. به این مسئله باید شرایط نامساعد جوی را نیز اضافه کرد. لذا برای کاهش خسارت‌های مالی و جانی باید راهی اندیشید. افزایش جاده‌های زمینی و ابنیه فنی مربوط به آنها از جمله تونل‌ها و پل‌ها، مطابق با استانداردهای جهانی از راه‌کارهای مذکور می‌باشد.

در پروژه حاضر طراحی سیستم نگهداری موقت تونل گردنه رخ مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در این تونل، حفاری از دو سمت ورودی و خروجی انجام شده است. در سمت ورودی تونل جنس سنگ از نوع سنگ آهک خاکستری ماسیو و ضخیم لایه و در سمت خروجی تونل از نوع آهک مارنی سبز تا سیاه نازک لایه می‌باشد. در میانه‌های تونل نیز به سنگ آهک برشی و کنگلومرای آهکی با میان لایه‌های آهکی برخورد شده است. لذا پس از تقسیم‌بندی مسیر تونل به ۱۳ ناحیه (Z_1 تا Z_{13}) و ۲ زیر ناحیه (Z_{1-2} و Z_{13-2})، میزان جابجایی‌های عمده در دیواره‌ها، کف و سقف تونل قبل و بعد از نصب سیستم نگهداری اولیه به روش‌های تجربی، تحلیلی (تحلیل اندرکنش) و عددی (نرم‌افزار UDEC) محاسبه شده است.

نرم‌افزار UDEC یک برنامه تحلیل دو بعدی است که بر مبنای روش المان‌های مجزا برای تحلیل مکانیک سنگی محیط‌های ناپیوسته تهیه شده است. این نرم‌افزار واکنش یک محیط ناپیوسته (به عنوان مثال: سنگ تکتونیزه و به شدت درزه‌دار) را در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی می‌کند. به همین دلیل از UDEC در این پروژه استفاده شده است. اطلاعات لازم در نرم‌افزار UDEC مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت فشاری، GSI، چسبندگی، ارتفاع روباره، مشخصات درزه‌ها، مشخصات سیستم نگهداری می‌باشند. با وارد کردن این اطلاعات برای هر مقطع و اجرای برنامه، مقدار

ریزش‌های سقف، کف و دیواره‌ها قبل و بعد از نصب نگهداری محاسبه شده است. بیشترین جابجایی مربوط به زون‌های Z_5 ، Z_{13} و Z_{13-2} می‌باشد که باعث ریزش در سقف و دیواره‌ها می‌شود. برای سیستم نگهداری اولیه در این زون‌ها علاوه بر استفاده از شاتکریت، شبکه منظم پیچ‌سنگ و همچنین قاب فلزی پیشنهاد شده است.

فصل سوم: مقدمه‌ای بر برآورد سیستم نگهداری موقت

۳۱	..... ۱-۳- مقدمه
۳۱	..... ۲-۳- طبقه‌بندی مهندسی سنگ
۳۲	..... ۱-۲-۳- طبقه‌بندی ژئومکانیکی (روش RMR)
۳۳	..... ۲-۲-۳- تعیین GSI با استفاده از طبقه‌بندی RMR و Q
۳۴	..... ۳-۲-۳- طبقه‌بندی کیفیت توده سنگ (روش Q)
۳۵	..... ۳-۳- تحلیل اندرکنش سنگ- حائل
۳۶	..... ۱-۳-۳- محاسبه جابجایی‌های زمین
۳۶	..... ۱-۱-۳-۳- مدل‌های محیط پیوسته
۳۶	..... ۲-۱-۳-۳- مدل‌های محیط ناپیوسته
۳۸	..... ۲-۳-۳- فرضیات اساسی در رسم منحنی مشخصه زمین
۳۹	..... ۳-۳-۳- مراحل رسم منحنی مشخصه زمین
۴۲	..... ۴-۳-۳- منحنی مشخصه سیستم نگهداری
۴۳	..... ۱-۴-۳-۳- محاسبه تغییر شکل اولیه قبل از نصب سیستم نگهداری
۴۴	..... ۲-۴-۳-۳- حائل موجود برای پوشش بتنی یا شاتکریت
۴۵	..... ۳-۴-۳-۳- حائل موجود برای مجموعه‌های فولادی
۴۶	..... ۴-۴-۳-۳- حائل موجود برای سنگ‌دوزهای غیر تزریقی
۴۷	..... ۵-۴-۳-۳- حائل ایجادشده توسط سنگ‌دوزهای تزریقی یا کابل‌ها

۴۸	.....	۳-۴-۶- عکس العمل سیستم های حائل مرکب
۴۹	.....	۳-۴- روش های عددی
		عنوان فصل چهارم: برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس طبقه بندی شماره صفحه
		فصل اول: کلیات توده سنگ
۵۲	۲	۱-۱- مقدمه مقدمه
۵۲	۳	۲-۱- مشخصات ناحیه شناختاری Z ₄
۵۵	۴	۳-۱- ضرورت انتخاب چاه های اختاری Z ₅
۵۶	۵	۴-۱- هدف ناپایداری ناپایداری Z ₇
۵۷	۵	۵-۱- سازمان دهی پایان ناحیه Z ₁₃
۵۹		۴-۶- برآورد سیستم نگهداری موقت تونل
		فصل دوم: موقعیت و زمین شناسی مسیر تونل گردنه رخ
		فصل پنجم: برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس تحلیل اندرکنش
۶۳	۸	۱-۲- مقدمه
		۵-۱- مقدمه
		۲-۲- موقعیت منطقه و راه های دسترسی
		۲-۳- آب و هوای منطقه
۶۳	۸	۵-۲- طراحی سیستم نگهداری تونل بر اساس تحلیل اندرکنش سنگ- حائل
		۲-۴- موقعیت جغرافیایی و ویژگی های عمومی گستره مورد مطالعه
۶۴	۱۰	۵-۲-۱- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z ₁
		۲-۵- زمین شناسی عمومی
۶۶	۱۲	۵-۲-۲- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z ₁₋₂
		۲-۶- زمین شناسی منطقه ای
۶۷	۱۵	۵-۲-۳- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z ₅
		۲-۷- زمین شناسی ساختمانی محدوده تونل
۷۰	۱۸	۵-۲-۴- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z ₇
		۲-۷-۱- جایگاه ساختمانی
۷۲	۱۸	۵-۲-۵- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z ₁₃
		۲-۷-۲- گسل خوردگی
۷۴	۱۹	۵-۲-۶- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z ₁₃₋₂
		۲-۷-۳- زلزله خیزی منطقه
۷۷	۲۰	۵-۴- نتیجه گیری
		۲-۸- بررسی های لیتولوژیکی
		فصل ششم: برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس روش عددی
۷۹	۲۳	۲-۹- هیدرولوژی و هیدروژئولوژی منطقه
		۶-۱- مقدمه
۷۹	۲۳	۲-۹-۱- قابلیت انحلال و نفوذپذیری سنگ ها
		۶-۲- نرم افزار UDEC
۸۰	۲۳	۲-۹-۲- هیدرولوژیکی مسیر تونل در UDEC
		۶-۳- ویژگی های هیدروژئولوژیکی محدوده تونل
۸۰	۲۴	۲-۹-۳- ویژگی های هیدروژئولوژیکی محدوده تونل
		۶-۴- ویژگی های مکانیکی و نسبت رد تونل خواص
۸۱	۲۴	۲-۱۰-۱- ویژگی های مکانیکی و نسبت رد تونل خواص
		۶-۵-۱-۱- ناحیه ساختاری شماره ۱
۸۲	۲۵	۲-۱۰-۲- ناحیه ساختاری شماره ۱
		۶-۵-۱-۲- ناحیه ساختاری شماره ۵
۸۲	۲۶	۲-۱۰-۳- ناحیه ساختاری شماره ۵
		۶-۵-۱-۳- ناحیه ساختاری شماره ۷
۸۸	۲۷	۲-۱۰-۴- ناحیه ساختاری شماره ۷
		۶-۵-۱-۴- ناحیه ساختاری شماره ۱۳
۹۴	۲۸	۲-۱۰-۵- ناحیه ساختاری شماره ۱۳
		۶-۵-۱-۵- ناحیه ساختاری Z ₅
۱۰۳	۲۹	۱۱-۲- نتیجه گیری
		۶-۴-۴- ناحیه ساختاری Z ₇
۱۱۱		۵-۴-۶- ناحیه ساختاری Z ₁₃

۱۲۰	..... ۶-۴-۶ ناحیه ساختاری Z_{13-2}
۱۳۰	..... ۵-۶ نتیجه‌گیری
فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات	
۱۳۳	..... ۱-۷ نتیجه‌گیری
۱۳۷	..... ۲-۷ پیشنهادات
۱۳۸	فهرست منابع
۱۴۲	پیوست ۱
۱۵۳	پیوست ۲
۱۶۹	پیوست ۳
۱۷۹	پیوست ۴
۱۹۱	پیوست ۵

۸۷	..... شکل ۶-۷- کنتور تنش متوسط برای مقطع تونل در دهانه ورودی، زون Z_1 پس از نصب شاتکریت
۸۸	..... شکل ۶-۸- نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_1 ، دهانه ورودی تونل پس از نصب شاتکریت
۸۹	..... شکل ۶-۹- کانتور جابجایی قائم در زون Z_{1-2}
۹۰	..... شکل ۶-۱۰- کانتور جابجایی افقی در زون Z_{1-2}
۹۰	..... شکل ۶-۱۱- کانتور تنش متوسط اطراف تونل در زون Z_{1-2}
۹۱	..... شکل ۶-۱۲- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_{1-2}
۹۲	..... شکل ۶-۱۳- کانتور جابجایی قائم اطراف تونل در زون Z_{1-2} ، پس از نصب شاتکریت
۹۲	..... شکل ۶-۱۴- کانتور جابجایی افقی اطراف تونل در زون Z_{1-2} ، پس از نصب شاتکریت
۹۳	..... شکل ۶-۱۵- کانتور تنش متوسط اطراف تونل در زون Z_{1-2} ، پس از نصب شاتکریت
۹۳	..... شکل ۶-۱۶- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_{1-2} ، پس از نصب شاتکریت
۹۵	..... شکل ۶-۱۷- کانتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی
۹۵	..... شکل ۶-۱۸- کانتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی
۹۶	..... شکل ۶-۱۹- کانتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی
۹۶	..... شکل ۶-۲۰- نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی
۹۷	..... شکل ۶-۲۱- کانتور جابجایی قائم در مقطع تونل، زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل پس از نصب شاتکریت

شماره صفحه

عنوان

۹	شکل ۱-۲- موقعیت و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه
	شکل ۲-۲- مقطع زمین‌شناسی و ویژگی‌های ژئومکانیکی مسیر تونل گردنه رخ
۱۳	شکل ۳-۲- پهنه‌بندی رسوبی و ساختاری ایران
۱۵	شکل ۴-۲- زیر پهنه‌های زون سندج- سیرجان از نگاه محجل و سهندی
۱۹	شکل ۵-۲- مشخصات چند دسته درز اصلی در محدوده تونل
۲۱	شکل ۶-۲- دید نزدیک از کنگلومرای آهکی خرد شده ائوسن
	شکل ۷-۲- رخنمون مارن‌های سبز در محل گردنه و درجه هوازدگی آنها، سمت
۲۲	شیب لایه‌ها
۲۲	شکل ۸-۲- نمایش آهک برشی کرتاسه، عملکرد ۳ دسته درزه
۲۲	شکل ۹-۲- نمایش سنگ آهک آپتین. (نما به طرف جنوب)
۲۴	شکل ۱۰-۲- نمایش محل چند چشمه در محدوده تونل (دید به سمت غرب)
۴۲	شکل ۱-۳- منحنی مشخصه سیستم نگهداری
۶۶	شکل ۱-۵- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_1
۶۷	شکل ۲-۵- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_{1-2}
۶۸	شکل ۳-۵- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_5
۶۹	شکل ۴-۵- نمودار اندرکنش تونل و سیستم‌های نگهداری مورد نظر برای زون Z_5
۷۲	شکل ۵-۵- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_7
۷	شکل ۶-۵- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_{13}
۷۴	شکل ۷-۵- نمودار اندرکنش تونل و سیستم‌های نگهداری مورد نظر برای زون Z_{13}
۷۶	شکل ۸-۵- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_{13-2}
۷۶	شکل ۹-۵- نمودار اندرکنش تونل و سیستم‌های نگهداری مورد نظر در زون Z_{13-2}
۸۳	شکل ۱-۶- کنتور جابجائی قائم در زون Z_1 ، دهانه ورودی تونل
۸۴	شکل ۲-۶- کنتور جابجائی افقی در زون Z_1 ، دهانه ورودی تونل
۸۴	شکل ۳-۶- کنتور تنش متوسط در زون Z_1 ، دهانه ورودی تونل
۸۵	شکل ۴-۶- نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_1 ، دهانه ورودی تونل
	شکل ۵-۶- کنتور جابجائی قائم برای مقطع تونل در دهانه ورودی، زون Z_1 ، پس از
۸۶	نصب شاتکریت
	شکل ۶-۶- کنتور جابجائی افقی برای مقطع تونل در دهانه ورودی، زون Z_1 ، پس از
۸۶	نصب شاتکریت

- شکل ۶-۲۲- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل، زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل
 ۹۸ پس از نصب شاتکریت
- شکل ۶-۲۳- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل، زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل
 ۹۸ پس از نصب شاتکریت
- شکل ۶-۲۴- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل، زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل
 ۹۹ پس از نصب شاتکریت
- شکل ۶-۲۵- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل، زون Z_5 ، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ ...
 ۱۰۰
- شکل ۶-۲۶- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل، زون Z_5 ، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ ...
 ۱۰۰
- شکل ۶-۲۷- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل، زون Z_5 ، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ
 ۱۰۱
- شکل ۶-۲۸- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل، زون Z_5 ، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ ...
 ۱۰۱
- شکل ۶-۲۹- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل، زون Z_5 ، پس از نصب شاتکریت و پیچ سنگ و قاب
 ۱۰۲
- شکل ۶-۳۰- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل، زون Z_5 ، پس از نصب شاتکریت و پیچ سنگ و قاب
 ۱۰۳
- شکل ۶-۳۱- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z_7 ، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل
 ۱۰۴
- شکل ۶-۳۲- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z_7 ، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل
 ۱۰۵
- شکل ۶-۳۳- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_7 ، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل
 ۱۰۵
- شکل ۶-۳۴- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_7 ، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل
 ۱۰۶
- شکل ۶-۳۵- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل، زون Z_7 ، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل،
 ۱۰۷ پس از نصب شاتکریت
- شکل ۶-۳۶- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z_7 ، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی
 ۱۰۷ تونل، پس از نصب شاتکریت
- شکل ۶-۳۷- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل، زون Z_7 ، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل،
 ۱۰۸ پس از نصب شاتکریت
- شکل ۶-۳۸- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل، زون Z_7 ، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل،
 ۱۰۸ پس از نصب شاتکریت
- شکل ۶-۳۹- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل، زون Z_7 ، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ .
 ۱۰۹
- شکل ۶-۴۰- کنتور جابجائی لقی در مقطع تونل، زون Z_7 ، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ
 ۱۱۰
- شکل ۶-۴۱- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل، زون Z_7 ، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ
 ۱۱۰
- شکل ۶-۴۲- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل، زون Z_7 ، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ .
 ۱۱۱
- شکل ۶-۴۳- کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی ..
 ۱۱۲
- شکل ۶-۴۴- کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی .
 ۱۱۲
- شکل ۶-۴۵- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی ..
 ۱۱۳
- شکل ۶-۴۶- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی ..
 ۱۱۳
- شکل ۶-۴۷- کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی

- ۱۱۴ پس از نصب شاتکریت
 شکل ۶-۴۸- کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی
- ۱۱۵ پس از نصب شاتکریت
 شکل ۶-۴۹- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی
- ۱۱۵ پس از نصب شاتکریت
 شکل ۶-۵۰- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی
- ۱۱۶ پس از نصب شاتکریت
- ۱۱۷ شکل ۶-۵۱- کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل، زون Z_{13} ، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ
- ۱۱۷ شکل ۶-۵۲- کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل، زون Z_{13} ، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ
- ۱۱۸ شکل ۶-۵۳- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل، زون Z_{13} ، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ
- ۱۱۸ شکل ۶-۵۴- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل، زون Z_{13} ، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ
- شکل ۶-۵۵- کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل، زون Z_{13} ، پس از نصب شاتکریت و
 پیچ سنگ و قاب فلزی
- ۱۱۹ شکل ۶-۵۶- کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل، زون Z_{13} ، پس از نصب شاتکریت و
 پیچ سنگ و قاب فلزی
- ۱۲۰ شکل ۶-۵۷- کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل
- ۱۲۱ شکل ۶-۵۸- کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل
- ۱۲۲ شکل ۶-۵۹- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل
- ۱۲۲ شکل ۶-۶۰- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل
- ۱۲۳ شکل ۶-۶۱- کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل، پس از
 نصب شاتکریت
- ۱۲۴ شکل ۶-۶۲- کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل، پس از
 نصب شاتکریت
- ۱۲۴ شکل ۶-۶۳- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل، پس از
 نصب شاتکریت
- ۱۲۵ شکل ۶-۶۴- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل، پس از
 نصب شاتکریت
- ۱۲۵ شکل ۶-۶۵- کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل، پس از
 نصب شاتکریت+پیچ سنگ
- ۱۲۶ شکل ۶-۶۶- کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل، پس از
 نصب شاتکریت+پیچ سنگ
- ۱۲۷ نصب شاتکریت+پیچ سنگ

۱۲۷	شکل ۶-۶۷- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شاتکریت+پیچسنگ
۱۲۸	شکل ۶-۶۸- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شاتکریت+پیچسنگ
۱۲۹	شکل ۶-۶۹- کنتور جابجایی قائم در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شاتکریت، پیچسنگ و قاب
۱۲۹	شکل ۶-۷۰- کنتور جابجایی افقی در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شاتکریت، پیچسنگ و قاب
۶۹	جدول ۵-۵- مشخصات فیزیکی سیستم‌های نگهداری مورد استفاده
۷۱	جدول ۵-۶- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_7
۷۳	جدول ۵-۷- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_{13}
۷۵	جدول ۵-۸- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_{13-2}
۱۳۱	جدول ۶-۱- نتایج و پیشنهادات در مورد جابجایی‌ها و سیستم‌های نگهداری در زون‌های مختلف تونل

شماره صفحه

عنوان

۲۵	جدول ۱-۲- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z_1
۲۵	جدول ۲-۲- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z_1
۲۶	جدول ۳-۲- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z_5
۲۷	جدول ۴-۲- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z_5
۲۷	جدول ۵-۲- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z_7
۲۸	جدول ۶-۲- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z_7
۲۸	جدول ۷-۲- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z_{13}
۲۹	جدول ۸-۲- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z_{13}
۵۳	جدول ۱-۴- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z_1
۵۳	جدول ۲-۴- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z_1
۵۴	جدول ۳-۴- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z_{1-2}
۵۴	جدول ۴-۴- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z_{1-2}
۵۵	جدول ۵-۴- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z_5
۵۵	جدول ۶-۴- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z_5
۵۶	جدول ۷-۴- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z_7
۵۶	جدول ۸-۴- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z_7
۵۷	جدول ۹-۴- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z_{13}
۵۸	جدول ۱۰-۴- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z_{13}
۵۸	جدول ۱۱-۴- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z_{13-2}
۵۹	جدول ۱۲-۴- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z_{13-2}
۶۰	جدول ۱۳-۴- پیش‌بینی سیستم نگهداری اولیه تونل به روش RMR
۶۱	جدول ۱۴-۴- پیش‌بینی سیستم نگهداری اولیه تونل به روش Q
	جدول ۱۵-۴- نتایج کلی سنگ شناسی، امتیازدهی و سیستم نگهداری اولیه به روش‌های RMR و Q
	جدول ۱-۵- اطلاعات مربوط به توده‌سنگ تونل گردنه رخ برای رسم منحنی اندرکنش سنگ - حائل
۶۴	
۶۵	جدول ۲-۵- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_1
۶۶	جدول ۳-۵- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_{1-2}
۶۸	جدول ۴-۵- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_5

۱-۱- مقدمه

تونل‌ها نوعی سازه‌های زیرزمینی هستند که به منظور اهداف زیر حفر می‌شوند:

- کوتاه کردن و یا قابل عبور کردن جاده‌ها

- کوتاه کردن مسیر راه آهن

- هدایت آب

- دستیابی به مواد معدنی

- عبور فاضلاب‌ها

- حمل و نقل مسافر از طریق مترو

- ایجاد پناهگاه‌ها، انبارها

تونل‌ها به طور کلی با توجه به اهداف حفر آنها به سه دسته اصلی تونل‌های عبور و مرور،

تونل‌های انتقال و تونل‌های معدنی تقسیم می‌شوند. راهکار مناسب به منظور کاهش مصرف سوخت، کاهش

آمار تصادفات رانندگی، کاهش میزان آلودگی هوا، افزایش ایمنی، جلوگیری از اتلاف وقت و ... استفاده از تونل‌ها می‌باشد.

مهمترین کار پس از حفر تونل پایداری و اجرای سیستم نگهداری آن است. برای اجرای سیستم نگهداری در تونل‌های راه از شاتکریت، پیچ‌سنگ، قاب‌های فلزی و یا ترکیبی از سیستم‌های فوق استفاده می‌شود تا از حرکت و سقوط قطعات سست جلوگیری شود [۲۴].

سیستم‌های نگهداری در گذشته به دو دسته موقت و دائمی تقسیم می‌شد. سیستم نگهداری موقت برای ایمنی در حین حفاری اجرا می‌شد. پس از نصب سیستم نگهداری موقت سیستم نگهداری دائم را نصب می‌کردند. در بعضی موارد، برای نصب سیستم نگهداری دائم، تمام یا بخشی از سیستم نگهداری موقت برداشته می‌شد: در تونل‌هایی که زمان پابرجائی^۱ کم باشد از پیچ‌سنگ^۲، شاتکریت^۳ و قاب‌های فولادی استفاده می‌شود [۲۴].

امروزه سیستم‌های نگهداری را به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم می‌کنند. سیستم نگهداری اولیه جهت تأمین ایمنی و پایداری توده سنگ نصب می‌شود. پس از ایجاد ایمنی به کمک سیستم نگهداری اولیه برای پایدارسازی نهایی تونل از سیستم نگهداری ثانویه استفاده می‌شود. سیستم نگهداری موقتی و دائمی (اولیه و ثانویه)، در مورد تونل‌های راه به کار می‌رود [۲۴].

تونل گردنه رخ، از جمله تونل‌های راه می‌باشد که به منظور کاهش تصادفات و افزایش ایمنی در محور ارتباطی شهرکرد- اصفهان احداث می‌شود. در این پروژه، سیستم نگهداری اولیه تونل با توجه به مشخصات مسیر تونل پیش‌بینی می‌شود.

۱-۲- مشخصات هندسی طرح

¹ Stand up time

² Rockbolt

³ Shotcrete

راه اصفهان- شهرکرد در محدوده گردنه نم وای وارد ارتفاعاتی می‌گردد که وجود شیب زیاد و قوس‌های با شعاع کم، ظرفیت را به شدت کاهش داده و عبور و مرور ایمن به خصوص در فصل زمستان امکان پذیر نیست، به طوری که برای عبور مسیر راه از این محدوده راهی جز احداث تونل نمی‌باشد.

با توجه به امتداد و پلان مسیر، قوس‌های افقی و شیب‌های طولی مسیر طوری انتخاب شده‌اند که الزامات هندسی حداقل مربوط به راه و تونل راه‌های اصلی را برآورد می‌سازند.

مقطع تونل گردنه رخ نعل اسبی بوده و ارتفاع آن $8/3$ متر می‌باشد. تونل دو خطه دو طرفه با مشخصات فنی و مقطع عرضی تونل راه‌های اصلی در نظر گرفته شده است.

در قسمت قبل از ورودی تونل قوس افقی با شعاع 440 متر واقع شده‌اند. طول کل تونل برابر با 1240 متر، قطر آن 13 متر و حداکثر شیب طولی تونل برابر $3/1$ درصد می‌باشد.

مقطع عرضی تمام شده تونل به عرض 11 متر، دارای دو خط عبور با عرض $2 \times 3/65$ متر و عرض شانه 1 متر در طرفین و همچنین پیاده‌رو به عرض $0/85$ متر در کناره‌های تونل در نظر گرفته شده است [۲۹].

۱-۳- ضرورت اجرای طرح

محور اصفهان- شهرکرد در کیلومتر 20 ، از منطقه پرعارضه گردنه رخ عبور می‌کند. وضعیت توپوگرافی منطقه موجب شده که راه موجود از نظر پلان و پروفیل طولی، از مشخصات فنی و هندسی مناسبی برخوردار نباشد. از طرفی، شرایط اقلیمی سردسیر منطقه نیز مزید بر علت شده، و سبب شده که راه موجود فاقد شرایط مطلوب و مناسب یک راه اصلی ارتباطی بین مراکز استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری شود. بر این اساس، برای کاهش مشکلات ذکر شده، گزینه احداث تونل به عنوان یک راهکار اساسی پیشنهاد شد.

اولین مطالعات در زمینه زمین‌شناسی منطقه در سال 1361 انجام شد ولی به دلایلی برای احداث جاده و تونل اقدامی صورت نگرفت. در سال 1384 و با افزایش روزافزون جمعیت و به دنبال آن افزایش تردد

در مسیر شهرکرد- اصفهان، مطالعات در این زمینه از سر گرفته شد. در پروژه احداث جاده جدید شهرکرد- اصفهان اداره کل راه و ترابری استان، کارفرما و شرکت مهندسی مشاور برآیند، مشاور طرح می‌باشند [۲۹].

۴-۱- هدف پایان نامه

با توجه به این که تونل گردنه رخ از سنگ‌های درزه‌دار و تکتونیزه عبور می‌کند، لذا ضروری است که پایداری تونل مذکور مورد بررسی قرار گرفته و در صورت لزوم سیستم نگهداری موقت آن مشخص گردد. لازم به توضیح است که کارهای زیادی در مورد پایداری این تونل انجام نشده است. لذا هدف این پایان نامه بررسی تحلیل پایداری تونل مذکور به روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی (به کمک نرم‌افزار UDEC) است. هدف بعدی از انجام این پایان نامه پیش‌بینی سیستم نگهداری موقت تونل در صورت نیاز و با استفاده از روش‌های مذکور می‌باشد.

۵-۱- سازمان دهی پایان نامه

مابقی فصل‌های این پایان نامه به شرح ذیل سازماندهی شده است:

فصل دوم:

در فصل دوم به بررسی موقعیت و ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی ساختگاه تونل پرداخته شده است. در این فصل همچنین مشخصات مکانیک سنگی مسیر تونل ذکر شده است.

فصل سوم:

در فصل سوم سه روش تحلیل پایداری که عبارتند از روش تجربی، تحلیلی و عددی به اختصار توضیح داده شده است. سپس با استفاده از روابط این فصل در فصل‌های بعدی تحلیل پایداری انجام شده است.

فصل چهارم:

با استفاده از مشخصات به دست آمده برای دسته درزه‌ها و اطلاعات موجود در مورد سنگ‌های مسیر تونل، رده‌بندی مهندسی سنگ و پیش‌بینی سیستم نگهداری اولیه به این روش برای هر مقطع در فصل چهارم صورت گرفته است.

فصل پنجم:

فصل پنجم به آنالیز تحلیلی اختصاص دارد. با کمک فرمول‌های موجود و منحنی مشخصه زمین، بر اساس تحلیل اندرکنش - سیستم نگهداری، سیستم نگهداری اولیه تونل در هر مقطع برآورد شده است.

فصل ششم:

قابلیت نرم‌افزار UDEC برای تحلیل عددی و برآورد سیستم نگهداری اولیه تونل در فصل ششم نشان داده شده است. همانطور که بعداً در این فصل خواهیم دید، با ورود اطلاعات موجود در مورد سنگ مسیر تونل و اجرای برنامه، نقاط حساس و دارای پتانسیل ریزش مشخص خواهد شد که با انجام نگهداری می‌توان مانع از جابجایی‌های عمده در تونل شد.

فصل هفتم:

در این فصل نتیجه‌گیری و پیشنهادات لازم برای انجام کارهای بعدی آورده شده است.

۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا درباره موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی مسیر تونل توضیحاتی داده شده، سپس ویژگی‌های دسته درزه‌های موجود در تونل، برای هر زون به طور جداگانه آورده شده است.

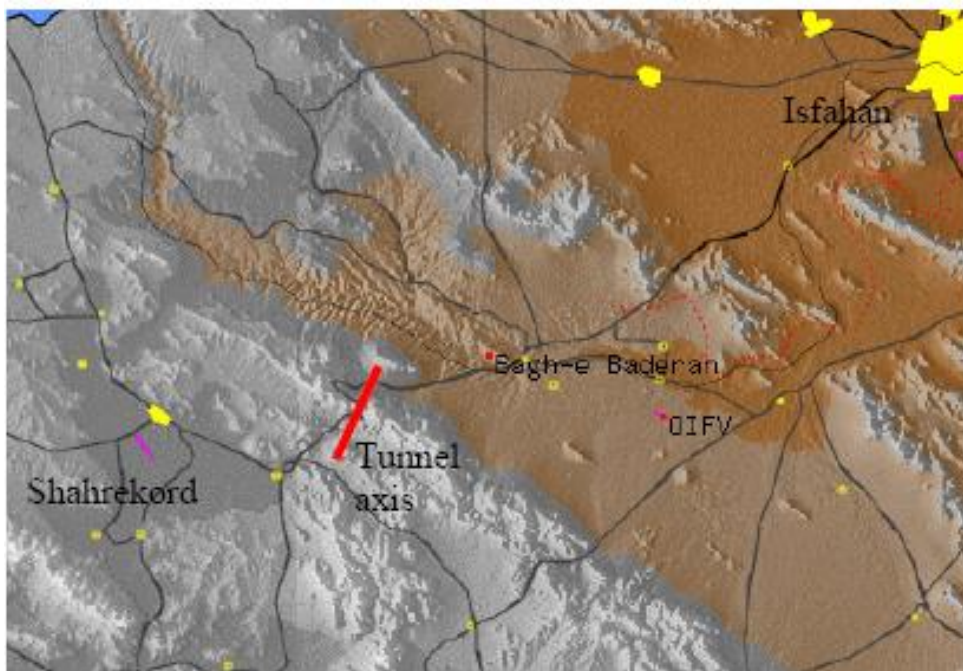
۲-۲- موقعیت منطقه و راه‌های دسترسی

محل احداث تونل گردنه رخ در مرز استان اصفهان و استان چهارمحال و بختیاری و در مسیر جاده اصفهان به طرف شهرکرد واقع شده است. محل پروژه تقریباً در حدود ۱۰ کیلومتری شهرستان باغ بهادران و در ارتفاعات کوه رخ، بعد از روستای رخ آباد قرار دارد. مختصات جغرافیایی محور تونل برابر "۴۸° ۱۹' ۳۲" تا "۵۰° ۱۹' ۳۲" عرض جغرافیایی و "۴۷° ۰۳' ۵۱" تا "۵۷° ۰۴' ۵۱" طول جغرافیایی می‌باشد. شکل ۲-۱ موقعیت و راه‌های دسترسی به منطقه را نشان می‌دهد [۲۹].

۲-۳- آب و هوای منطقه

از لحاظ آب و هوایی و شرایط اقلیمی، منطقه دارای آب و هوایی مدیترانه‌ای با زمستان‌های مرطوب و سرد و تابستان‌های معتدل می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۳۱۹/۲۱ میلی‌متر می‌باشد. حداکثر دمای روزانه ۳۸/۶ و حداقل آن ۲۵ درجه سانتی‌گراد زیر صفر است. رطوبت نسبی نیز به طور میانگین ۳۱ درصد می‌باشد [۲۹].





شکل ۲-۱- موقعیت و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه [۲۹]

۲-۴- موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های عمومی گستره مورد مطالعه

محور تونل پیشنهادی در امتداد ۲۸ درجه شمالی قرار دارد، و لذا روند آن شمال‌شرقی - جنوب‌غربی می‌باشد. براساس مقاطع طولی توپوگرافی و زمین‌شناسی (شکل ۲-۲)، زاویه شیب دامنه ورودی تقریباً در حدود ۳۰ تا ۳۵ درجه می‌باشد [۲۹].

در دامنه خروجی با توجه به پوشیدگی رخنمون‌های سنگی توسط رسوبات عهد حاضر، و عدم دسترسی به اطلاعات گمانه‌های اکتشافی، تخمین زده می‌شود که شیب طبقات (لایه‌های سنگی آهک مارنی با تناوب مارن) بین ۳۰ درجه تا ۴۰ درجه می‌باشد؛ که این شیب با شیب توپوگرافی سطح زمین همخوانی ندارد.

در بخش‌های میانی تونل، ۲ واحد سنگی با نام‌های K_3 (سنگ آهک خاکستری) و K_4 (سنگ آهک برشی) دیده می‌شود (شکل ۲-۲) که شیب لایه‌بندی آنها در سطح زمین بین ۱۳ تا ۱۹ درجه، و در اعماق با توجه به سبک چین‌خوردگی منطقه، احتمالاً کمی بیشتر (حداکثر تا ۳۰ درجه) می‌باشد.

در ارتباط با دهانه ورودی: سنگ‌های دهانه ورودی از نظر رده‌بندی بر اساس طبقه‌بندی ژئومکانیکی بیناوسکی (۱۹۸۹) در گروه سنگ‌های ضعیف (کلاس IV) تا متوسط (کلاس III) طبقه‌بندی می‌شوند [۲۹].

به همین ترتیب، در ارتباط با بخش میانی تونل، در کل، موارد زیر قابل ذکر می‌باشد [۲۹]:

۱- سنگ‌های قسمت‌های میانی از نظر رده‌بندی بر اساس طبقه‌بندی ژئومکانیکی بیناوسکی (۱۹۸۹) در گروه سنگ‌های خوب تا متوسط (کلاس II و III)، و در قسمت‌هایی که عملکرد گسلش وجود دارد در گروه سنگ‌های ضعیف (کلاس IV) طبقه‌بندی می‌شود.

۲- میزان بارندگی بالا و درجه خردشدگی سنگ‌های کربناته در این بخش موجب شده تا میزان کارستی شدن سنگ‌ها، احتمالاً از درجه متوسطی برخوردار گردد. لذا در هنگام حفاری و یا بهره‌برداری، امکان برخورد به سفره‌های معلق کارستیک در ترازهای بالای تونل وجود دارد، بنابراین هنگام اجرا می‌بایست کلیه موارد جریان آب و میزان آنها گزارش گردد تا در طراحی مجدد، تمهیدات فنی لازم جهت ایمن‌سازی و کاهش آب ورودی و یا زهکشی آنها اندیشیده شود.

۳- در بخش میانی، بر اساس مقطع توپوگرافی (شکل ۲-۲)، حداکثر عمق تونل از سطح زمین در حدود ۱۵۰ متر می‌باشد. به هر حال اگرچه بر اساس شواهد موجود به نظر می‌رسد که با افزایش عمق، میزان فرسودگی، درجه تراکم درزه و شکاف‌ها کاهش می‌یابد ولی با این وجود در این بخش از تونل امکان وقوع ریزش‌های گوه‌ای در سقف کماکان محتمل می‌باشد. لذا در هنگام عملیات اجرایی می‌بایست تمهیدات فنی مناسب جهت کنترل ریزش‌های گوه‌ای در سقف اندیشیده شود.

۴- در محل راهدارخانه که تقریباً در بالای مسیر تونل واقع شده، رخنمون‌های K_3 در طولی حدود ۲۰۰ متر توسط رسوبات آبرفتی پوشیده شده‌اند. به هر حال، اگرچه شواهد سطحی اطلاعات دقیقی در مورد عمق و وضعیت این رسوبات نشان نمی‌دهد، ولی محتمل است که در این محل یک دره مدفون وجود داشته باشد. لذا در هنگام حفاری تونل در این محدوده ضروری است جهت جلوگیری از قیفی شدن زمین، با انفجارهای کنترل شده و اجرای سریع پوشش موقتی و نهایی، موارد فوق مدیریت و کنترل گردند.

در ارتباط با دهانه خروجی تونل، در کل، موارد زیر قابل ذکر می‌باشد [۲۹]:

۱- با توجه به اینکه شیب طبقات (لایه‌های آهک‌های مارنی در تناوب با مارن) در خلاف جهت شیب مسیر تونل می‌باشد، لذا ضروری است با اجرای تمهیدات فنی مناسب، آب ورودی از طریق این لایه‌ها به مسیر تونل را با اجرای شیب معکوس کنترل کرد.

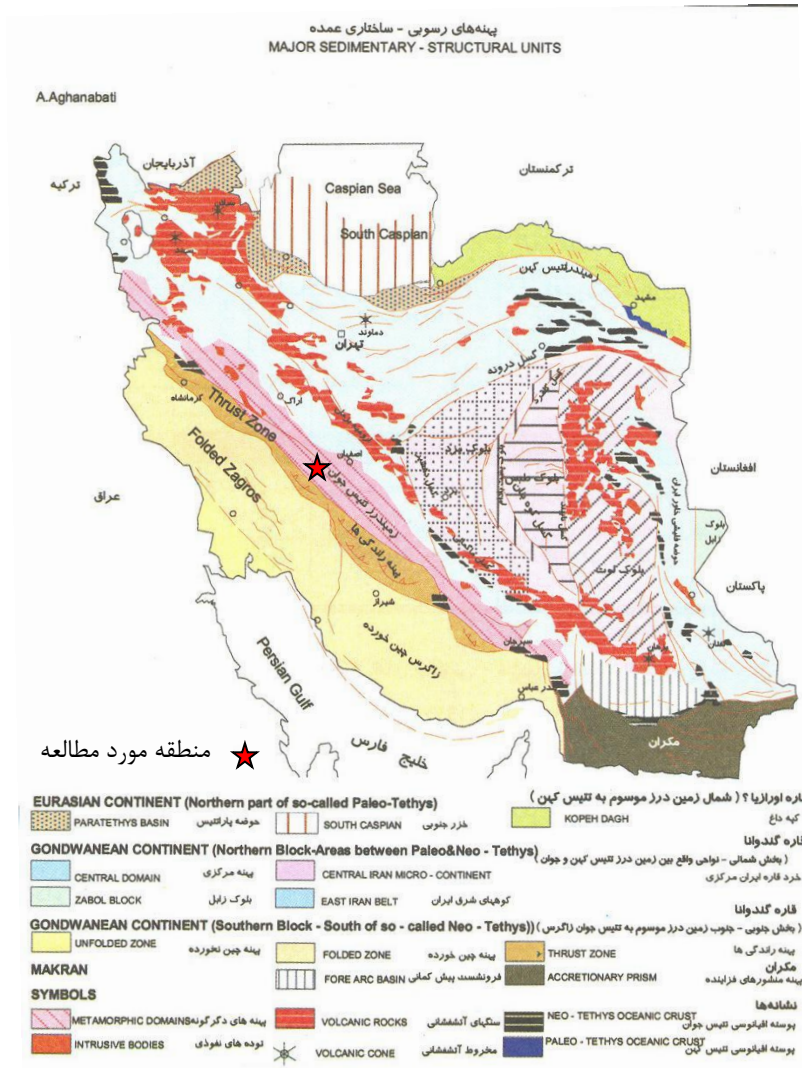
۲- اگرچه سنگ‌های دهانه خروجی از نظر مقاومت مستقیماً قابل ارزیابی نیستند ولی با این حال، بر اساس تجربیات، قضاوت و بازدید صحرایی از رخنمون‌های آن در حوالی محدوده طرح، این سنگ‌ها را می‌توان در گروه سنگ‌های ضعیف (کلاس IV) طبقه‌بندی نمود. بنابراین در هنگام حفاری امکان فروکش کردن زمین وجود دارد، بر این اساس ضروری است در هنگام حفاری تونل تقاطع یا جاده موجود، مسیر موجود موقتاً و حداقل ۲۰۰ متر از محل حفاری منحرف گردد و پس از ایمن‌سازی و احداث تونل مجدداً مسیر به محل قبلی منتقل شود.

۲-۵- زمین‌شناسی عمومی

استان اصفهان بر اساس تقسیم‌بندی زمین‌شناسی- ساختاری ایران گستره‌ای است که از خاور به باختر مشتمل بر پهنه‌های ایران مرکزی، ارومیه- دختر، سنندج- سیرجان و بخش‌هایی از بلندی‌های زاگرس است (شکل ۲-۳). زون ایران مرکزی یکی از واحدهای اصلی و عمده‌ای است که به شکل مثلث در مرکز ایران قرار دارد و جزء بزرگ‌ترین و پیچیده‌ترین واحدهای زمین‌شناسی به شمار می‌رود. ضخامت بیرون زدگی‌های سنگ‌های پرکامبرین پیشین در ایران مرکزی متجاوز از ده هزار متر و خود از فرسایش سنگ‌های آذرین قدیم‌تر به وجود آمده است. این مجموعه، بر اثر حرکات کوهزایی کاتانگایی، شدیداً دگرگون شده و پلاتفرم ایران مرکزی را تشکیل داده است که از پرکامبرین پسین تا تریاس رسوبات قاره‌ای، یا دریایی کم عمق روی آن را می‌پوشاند و به پوشش پلاتفرم موسوم است، حرکاتی که اغلب موجب جابجایی قائم زمین‌ها

در طول گسل‌ها شده باعث دگرشیبی‌های فرسایشی و تغییرات رخساره‌ای شده‌اند. بخش غربی ایران مرکزی، عموماً از سنگ‌های آتشفشانی و پیروکلاستیک وابسته به آن تشکیل یافته است که در امتداد نوار طویلی از سهند تا بزمان به موازات زون دگرگون شده سنندج- سیرجان قرار دارد. گسترده‌ترین رسوبات در استان اصفهان نهشته‌های با سن کرتاسه می‌باشد اگر چه در کرتاسه آغازی (نئوکومین) دریا پیشروی تدریجی با لایه‌های کنگلومرای و ماسه‌سنگی داشته است، ولی در نواحی اقلید و جنوب اصفهان، نئوکومین با رخساره‌های کم عمق دریایی قابل ذکر است.

پس از نئوکومین دریای کرتاسه زیرین با پیشروی وسیع خود، اکثر نواحی ایران مرکزی را فرا می‌گیرد و لایه‌های ماسه‌سنگ، آهک اربیتولین‌دار و شیل را در جنوب اصفهان و نایین بر جای گذاشته است. در اواخر کرتاسه بالایی حرکات شدید کوهزایی، فرسایش زیادی را در این رسوبات ایجاد کرده است. رسوبات دوران سنوزوئیک با توجه به فاز کوهزایی لارامید در پالئوسن با یک دگرشیبی زاویه‌دار و سپس با کنگلومرا، ماسه‌سنگ و رسوبات مردابی شروع می‌شود که نظایر آن در نخلک نیز مشاهده می‌شود. طی ائوسن و الیگوسن، رخساره آهک و مارن‌های نومولیت‌دار در نواحی مختلف ایران مرکزی وجود داشته ولی فعالیت شدید آتشفشانی در این دوره‌ها پدیده‌های رسوبی را تحت‌الشعاع قرار داده است. سنگ‌های نئوژن بیشتر از نوع رخساره‌های خشکی بوده که عبارتند از ماسه‌سنگ، مارن و کنگلومرا. با قاطعیت می‌توان اظهار داشت که، بعد از فاز کوهزایی سیمین پیشین که آثار چین‌خوردگی و دگرگونی آن در ایران مرکزی قابل مشاهده است کوهزایی لارامید با گرانیتهایی شیرکوه و کلاه قاضی مانع پیشروی دریای ژوراسیک می‌شود. زون سنندج- سیرجان در اصل جزئی از ایران مرکزی بوده که با اختصاصات ویژه‌ای مشخص می‌شود و به صورت نوار طویل دگرگون شده‌ای در امتداد و به موازات رورانگی زاگرس قرار دارد. این زون جزء ناآرام‌ترین و به عبارتی، فعال‌ترین زون ساختمانی ایران به شمار می‌رود و تا سنوزوئیک، فازهای دگرگونی و ماگماتیسم مهمی را پشت سر گذاشته است [۱۰ و ۱۱].



شکل ۲-۳- پهنه‌بندی رسوبی و ساختاری ایران [۱]

از لحاظ زمین‌ساختی اگرچه مُجَل و سه‌پندی (۱۳۷۸)، الگوی ساختاری سنندج- سیرجان را از نوع چین‌های بسته و هم‌راستا درمقیاس کیلومتری می‌داند، ولی علوی (۱۹۹۴)، زمین‌ساخت سنندج- سیرجان را به طور عمده از ساختارهای دوپلکس^۴ مرکب بزرگ مقیاس و همچنین سیستم‌های فلسی^۵ کوچک و بزرگ زاویه، با شیب شمال خاوری می‌داند که در اثر آن، ورقه‌هایی از سنگ‌های فانروزویک دگرگونه و نادگرگونه، به اندازه‌های ناهمسان، جابه‌جا شده‌اند. شواهد چینه نگاشتی و کنگلومراهای همزمان با کوهزایی، نشانگر آن است که این راندگی‌ها از کرتاسه پسین آغاز شده‌اند. شواهد ساختاری^۶ جهت

⁴ Duplex

⁵ Imbricated

⁶ Shear Sense

راندگی‌ها را از شمال خاور به جنوب باختر نشان می‌دهد. جابه‌جایی و انباشتگی ورقه‌های راندگی، سبب افزایش ضخامت پوسته قاره‌ای به اندازه تقریبی ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر شده است [۱].

مُحَجَل و سهندی (۱۳۷۸)، از جنوب باختر به شمال خاور، در پهنه سنندج- سیرجان، زیر پهنه‌های زیر را شناسایی کرده‌اند (شکل ۲-۴) [۱]:

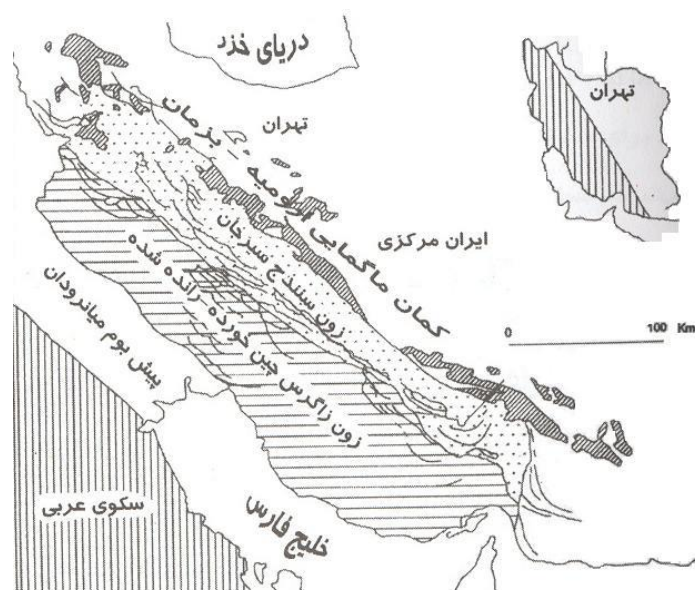
- زیر زون رادیولیتی (تریاس پسین- کرتاسه پسین) که از باختر تا قبرس و از خاور تا عمان ادامه دارد. در ایران، این زون در نواحی کرمانشاه، جنوب ازنا، شهرکرد، اقلید و نیریز برون زد دارد.

- زیر زون بیستون که در ناحیه کرمانشاه، شامل آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای به سن تریاس تا کرتاسه است. ردیف‌های تریاس بالایی- کرتاسه پایینی کم عمق و ردیف‌های کرتاسه بالایی آهک‌های میکریتی، پلاژیک ژرف است.

- زیر زون افیولیتی در دو ناحیه کرمانشاه و نیریز برون زد دارد. سن افیولیت‌های کرمانشاه ۸۱ تا ۸۶ میلیون سال و سن سنگ‌های آذرین افیولیت‌های نیریز، پوشیده شده با سازند تاربور، $۷/۲ \pm ۸۷/۵$ میلیون سال است.

- زیر زون حاشیه‌ای شامل سنگ‌های آتشفشانی با سن ژوراسیک پسین- کرتاسه زیرین است که در طول زون سنندج- سیرجان قابل رؤیت است.

- زیر زون دگرشکلی پیچیده شامل سنگ‌های به شدت دگرگون شده و توده‌های نفوذی فراوان است.



شکل ۲-۴- زیر پهنه‌های زون سنندج- سیرجان از نگاه محجل و سهندی (۱۳۷۸) [۱]

۲-۶- زمین‌شناسی منطقه‌ای

منطقه مورد مطالعه از ساختاری چین‌خورده برخوردار است [۳۱]. روند عمومی چین‌ها در این ناحیه در راستای شمال غرب- جنوب شرق می‌باشد. از نظر سنگ‌شناسی، این منطقه به طور کلی شامل زیر زون‌های بیستون و حاشیه‌ای می‌باشد و از توالی‌های رسوبی- آهکی زمان کرتاسه و ائوسن تشکیل شده که در برخی از قسمت‌ها با سنگ‌های تخریبی همراه شده‌اند. در محدوده تونل، از قدیم به جدید واحدهای لیتولوژیک با سن کرتاسه (K_1, K_2, K_3, K_4, K_5)، ائوسن (E_1 و E_2) و واحدها و رسوبات کواترنر رخنمون یافته‌اند؛ که در این میان، واحد K_3 از وسعت و تراکم بیشتری برخوردار است.

ویژگی‌های سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی این واحدها به ترتیب زیر است:

- واحد K_1 : این واحد شامل ماسه‌سنگ قرمز و کنگلومرای پیشرونده قاعده با میان لایه‌هایی از شیل ماسه‌ای قرمز با سن کرتاسه زیرین است که به دلیل عملکرد گسل شمالی رخ، گسترش خیلی کمی داشته و به شدت خرد شده و فرسوده‌اند و دارای ریخت‌شناسی ملایم و کم بلندی می‌باشند. مجموعه سنگ‌های شیلی، سیلتی و ماسه‌سنگی مزبور در پاره‌ای از نقاط تا حد میکاشیست دگرگون شده‌اند. این مجموعه در یک محیط دینامیکی دگر ریخت و دگرگون شده‌اند و دگرگونی آنها نا همگن و غیر یکنواخت است. مرز بین این واحد دگر ریخت شده و واحد K_3 ، به نظر تدریجی و بدون ناپیوستگی می‌باشد، زیرا در این مرز واحدهای جداکننده با رخساره‌های تخریبی وجود ندارد [۲۹].

- واحد K_2 : با توجه به محیط رسوبی ناپایدار و فعال تکتونیکی پهنه سنندج- سیرجان، تشخیص همبری‌ها و رخساره‌ها به دلیل نداشتن شواهد کافی کمی دشوار است. چنانچه بخواهیم از دیدگاه زمین‌ساختی به تشکیل نهشته‌های این منطقه توجه کنیم، می‌توان این‌گونه بیان کرد که نهشته‌های این واحد، نهشته‌های زمانی حد فاصل یک دوره فعالیت شدید تکتونیکی و یک دوره آرامش در حوضه رسوبی بوده است. نهشته‌های زیرین در یک محیط بسیار فعال و نهشته‌های رویین، در محیط آرام و کم ژرفا رسوب کرده‌اند. گذر این دوره‌های تکتونیکی و رسوب‌گذاری، تدریجی بوده و وقفه‌ای در آن وجود ندارد. این واحد از یک رخساره مارنی و شیل آهکی به تدریج به یک رخساره آهکی- مارنی به رنگ خاکستری- سبز روشن تا خاکستری تیره تبدیل می‌شود. درصد رس در سنگ‌های این واحد زیاد است.

سنگ‌های آن به شدت فرسایش یافته و ریخت‌شناسی ملایم و کم‌بلندایی دارد. سن این واحد والانژین- آپتین می‌باشد [۱۵].

- واحد K₃: این واحد از آهک خاکستری تیره ماسیو با سن کرتاسه زیرین (آپتین میانی- بالایی) تشکیل شده و در منطقه مورد مطالعه از گسترش بالایی برخوردار است. این واحد قابل مقایسه با سازند تیز کوه در البرز است. به دلیل رخساره ویژه و ستبر و لایه‌بندی، بلندترین نقاط و خشن‌ترین ریخت‌شناسی را در منطقه دارد. چهره‌ای صخره‌ساز با پرتگاه‌های بلند و در پاره‌ای نقاط، دیواره‌هایی به اندازه بیش از ۳۰۰ متر دارد. رخساره یکنواخت و ستبرای همسان آن در سرتاسر منطقه نشان از محیطی آرام و کم‌ژرفا در هنگام نهشته شدن دارد. کوه تخت شاهلرا، کوه گودران و کوه تنگ‌سالون از این سنگ‌آهک‌ها شکل گرفته‌اند. سنگ‌آهک‌ها از سفید تا خاکستری تغییر رنگ دارد. دارای فسیل اربیتولین و رودیست فراوان است. لایه‌بندی از ستبر تا توده‌ای تغییر می‌کند. چین‌خوردگی در این سنگ‌آهک‌ها کمتر دیده می‌شود و بیشتر به صورت بلوک‌های بزرگ شکسته شده و روی هم رانده شده آشکار شده‌اند. به دلیل تأثیر نیروهای زمین‌ساختی و نیز جای گرفتن این واحد بر روی سنگ‌آهک‌های نرم‌تر، بخش‌هایی از آنها به صورت زمین‌لغزش‌های کوچک و بزرگ به سوی دامنه‌ها و بخش‌های پست لغزیده‌اند. همه این سنگ‌ها دارای حفره‌های انحلالی و غارهای کوچک در سطح زمین هستند که خود نشانه‌ای از کارستی بودن این آهک‌ها است. داخل این واحد، واحد K₄ به صورت بین‌انگشتی قرار گرفته است [۲۹].

- واحد K₄: جنس این واحد آهک برشی بوده که بر اثر فعالیت گسل‌ها در بین واحد K₃ ایجاد شده است. سن این واحد کرتاسه زیرین می‌باشد. لازم به ذکر است که عملکرد برشی شدن پس از عملکرد گسل‌های اصلی که به موازات تراست زاگرس می‌باشند ایجاد شده است [۱۵].

- واحد K₅: این واحد از آهک‌های مارنی سبز رنگ نازک لایه با سن آلبین تشکیل شده است. که در غرب کوه تخت شاهلرا، پهنه وسیعی از فروافتادگی بین این کوه و کوه پیله‌دره را پر کرده است. بیشترین گسترش را در دامنه کوه شاهلرا دارد و به طرف جنوب شرق در امتداد این کوه ستبرای بیشتری پیدا می‌کند. این واحد از مارن، سنگ آهک ماسه‌ای و سنگ آهک رسی تشکیل شده و سهم مارن در این مجموعه از سایر رخساره‌ها بیشتر است به این دلیل فرسایش‌پذیر بوده و بخش بزرگی از آن فرسایش یافته و به وسیله واریزه‌های دامنه‌ای و نیز نهشته‌های آبرفتی پوشیده شده است. دارای ریخت‌شناسی ملایم همراه با دره‌های نسبتاً ژرف و تنگ است. در جنوب کوه‌های کلاه قاضی به صورت آهک‌های سیلیسی خاکستری

بسیار تیره تا سیاه با هوازگی آجری رنگ می‌باشند و در منطقه زفره این آهک‌ها به آهک مارنی به رنگ خاکستری روشن تغییر جنس می‌دهد که ضخامت آن در حدود ۸۰ متر است. به علت وفور آمونیت لیمریلا^۷ در این آهک‌ها، در اصطلاح محلی چینه‌شناسی به آن آهک لیمریلا گفته شده است که معرف تحتانی‌ترین بخش آلبین است [۱۰].

- واحدهای E₁ و E₂: سنگ‌های ائوسن بیشتر از نوع سنگ‌های تخریبی قاره‌ای تا تخریبی دریایی است. رخساره و رنگ نهشته‌های مربوط به ائوسن نشان‌دهنده یک دوره فرسایشی بعد از زمان کرتاسه است. این نهشته‌ها معمولاً در جلو جبهه راندگی‌های بزرگ قرار گرفته‌اند. در غرب کوه تخت‌شاهلرا و مسیر جاده چرمهین- بروجن در جنوب روستای هاردانگ، سنگ‌آهک کنگلومرای هم‌رنگ آهک‌های کرتاسه (خاکستری تا کرم) وجود دارد که در بردارنده نومولیت فراوان به سن ائوسن پیشین است. ستبرای این آهک‌ها به حدود ۹۵ متر می‌رسد. دارای لایه‌بندی منظم و ستبر است. ستبرای لایه‌ها حداکثر به یک متر می‌رسد. سنگ آهک‌های کنگلومرای سخت و مقاومند و کمتر دچار فرسایش شده‌اند. جنس واحد E₁ از کنگلومرا با میان لایه‌هایی از آهک دولومیتی، و جنس واحد E₂ شامل کنگلومرای آهکی و آهک نومولیتی است، و سن این واحدها پائوسن تا ائوسن می‌باشد [۱۰].

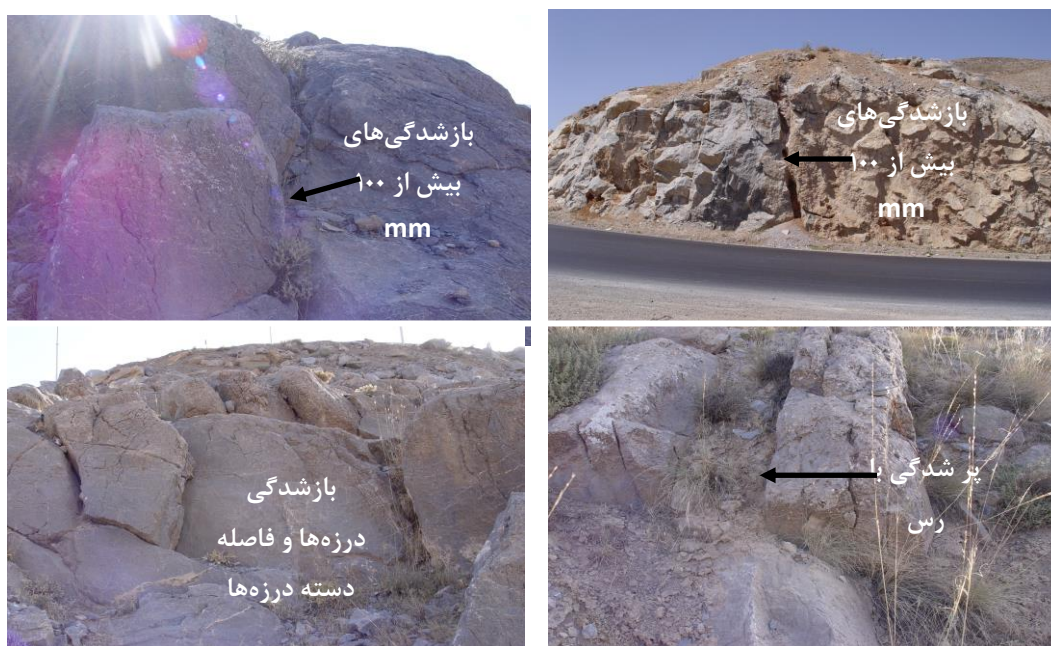
- نهشته‌های پلیوسن - کواترنر: حد فاصل بین کوه‌ها را دشت‌های فرو افتاده و پست فرا گرفته‌اند که دارای ریخت‌شناسی متفاوتی هستند. دشت چرمهین با توجه به ترکیب واحدهای سنگی و نیز ریخت کوه‌های اطراف، دشتی به نسبت پرشیب با سطوح بریده شده به وسیله آبراهه‌هاست. در دامنه غربی و شرقی کوه تخت شاهلرا بلندترین پادگانه آبرفتی (Q_{t1}) پدید آمده، این پادگانه‌ها بالغ بر ۲۰ متر ارتفاع دارند و بدون شک در ارتباط با بالآمدگی کوه‌ها و تغییرات پی در پی سطح اساس رودخانه‌ها در یک فرآیند تکتونیکی پدید آمده‌اند. همچنین بخش وسیعی از دشت چرمهین و فرخ‌شهر را رسوبات جوانی که عمدتاً در دامنه‌ها به صورت بادبزنی‌های آبرفتی و پادگانه آبرفتی با ارتفاع متوسط و کم در حاشیه بستر پهن رودخانه‌های منطقه پدید آمده‌اند. این پادگانه‌ها مواد تخریبی در اندازه‌های گوناگون از ماسه تا قلوه‌سنگ را دربر می‌گیرد. این آبرفت‌ها کم و بیش افقی هستند و در آنها لایه‌های رسی، سیلتی و ماسه‌ای دانه ریز با رنگ هوازده خاکستری و مجموعه کنگلومرا با قطعاتی از سنگ‌های کربناته و انواع سنگ‌های تخریبی و ولکانیکی مزوزوئیک با جورشدگی ضعیف و سخت‌شدگی کم دیده می‌شود [۲۹].

⁷ Leymeriella

۷-۲- زمین شناسی ساختمانی محدوده تونل

۱-۷-۲- جایگاه ساختمانی

به علت نوع سیستم تنش حاکم بر منطقه در طول تاریخ زمین شناسی به خصوص در دوره‌های جوان کوهزایی‌های آلپی، اغلب پدیده‌های ساختاری محدوده از نوع فشارشی هستند. اکثر تنش‌های شکننده و خمیری به طور عمده به ترتیب موجب ایجاد گسل‌های تراستی و چین خوردگی‌ها شده‌اند. عملکرد گسل‌های تراستی موجود در منطقه به خصوص گسل شمالی رخ باعث جا به جا شدن و راندگی واحدهای مختلف چینه شناسی به طرف شمال غرب شده و در نتیجه باعث ایجاد ساختارهای مسطح^۸ و شیب‌دار^۹ شده است. دسته درزه‌ها در منطقه به خوبی توسعه یافته‌اند که مشخصات آنها در همین فصل برای هر مقطع ساختاری تونل آورده شده است. تعدادی از این دسته درزه‌ها در منطقه در مسیر تونل احتمالاً خطر ساز خواهد بود. شکل ۲-۵ برخی از مشخصات این درزه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵- مشخصات چند دسته درز اصلی در محدوده تونل [۳۰]

۲-۷-۲- گسل خوردگی

^۸ Flat
^۹ Ramp

گسل‌های منطقه مورد بررسی از نظر هندسه آنها شامل سه دسته گسل و از نظر بزرگی و اهمیت شامل دو دسته تشخیص داده شده است. از نظر هندسی، گسل‌های منطقه شامل گسل‌های معکوس، راست‌لغز و نرمال است و از نظر بزرگی و اهمیت، گسل‌ها شامل گسل‌های اصلی و فرعی می‌باشند. در بین انواع گسل‌ها، گسل‌های معکوس و راندگی اکثریت داشته و گسل‌های راست‌لغز و عادی در مرتبه‌های بعدی هستند [۲۹].

۲-۷-۳- زلزله‌خیزی منطقه

یکی از مهمترین پارامترها در بررسی‌های زمین لغزش و پایداری شیب، قرارگیری مناطق در نواحی با خطر لرزه‌ای بالا است که باید در نظر گرفته شود. نتایج بررسی زمین‌لرزه‌های دستگاهی ثبت شده در محدوده طرح از سال ۱۹۴۴ تا ۲۰۰۴، نشان دهنده زمین‌لرزه‌هایی با میانگین بزرگی $4/7$ ریشتر است. پائین بودن نسبی سطح فعالیت‌های لرزه‌ای تعیین شده توسط دستگاه‌های لرزه‌ای در گستره طرح را نباید دلیل بر آرامش و بی‌لرزه بودن ناحیه انگاشت، چرا که داده‌های دوره لرزه‌ای یاد شده فاصله زمانی کوتاهی را می‌پوشانند، و اگر چه سطح کلی لرزه‌خیزی گستره ممکن است در حال حاضر پائین باشد، ولی پتانسیل وقوع زمین لرزه با قدرت بالا در منطقه وجود دارد. محل مورد نظر با استناد به نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زلزله در ایران و آیین نامه ۲۸۰۰، در منطقه با خطر نسبی زیاد قرار دارد. ضریب شتاب مبنای طرح ابنیه فنی برابر $0/3$ شتاب ثقل می‌باشد و میزان خطر زمین لرزه زیاد است بر این اساس، دو گسل رخ شمالی و جنوبی با فرض 50% احتمال وقوع حرکت در طول گسل، به ترتیب توان ایجاد زمین‌لرزه‌هایی به بزرگی $7/10$ و $6/99$ درجه در مقیاس ریشتر را دارند؛ که در صورت وقوع، امکان مسدود شدن تونل وجود دارد [۳۰].

۲-۸- بررسی‌های لیتولوژیکی

در این ناحیه به دلیل چین‌خوردگی، ناهمواری سطوح لایه‌بندی و احتمالاً تشکیل برخی از گسل‌های فرعی، شیب و امتداد لایه‌ها ثابت و یکنواخت نیست. امتداد لایه‌ها در دهانه ورودی نسبت به شمال N315 و در قسمت میانی تونل بین N3 و N285 و در سمت خروجی به علت عدم رخنمون لایه‌ها، نامشخص است. زاویه شیب لایه‌ها به دلیل چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی در محدوده دهانه ورودی در حدود

35NE، در بخش‌های میانی بین 17NE تا 30SW و در دهانه خروجی تونل نامشخص است. در مقطع طولی زمین‌شناسی، تغییرپذیری زاویه شیب لایه‌ها در بخش ورودی با شیب تندتر و در بخش خروجی تونل، شیب کندتر، به خوبی مشخص است. در قسمت‌های میانی با توجه به عمق نسبتاً زیاد تونل و عدم دسترسی به اطلاعات تحت‌الارضی، خمش لایه‌ها و محل برخورد طبقات سنگی با محور تونل با تقریب همراه است. در برخی از قسمت‌ها نیز که اطلاعات کافی در دسترس نبوده، مرز لایه‌ها با علامت سؤال درج گردیده است (شکل ۲-۲). به طور کلی مسیر تونل شامل چهار منطقه لیتولوژیکی می‌باشد. این مناطق عبارتند از [۳۰]:

- E₁: کنگلومرای آهکی با میان لایه‌های آهکی (شکل ۲-۶) با سن ائوسن.
- K₅: آهک مارنی سبز تا سیاه نازک‌لایه (شکل ۲-۷) با سن کرتاسه زیرین.
- K₄: شامل سنگ‌آهک برشی (شکل ۲-۸) با سن کرتاسه زیرین.
- K₃: شامل سنگ‌آهک خاکستری ماسیو و ضخیم لایه (شکل ۲-۹) با سن کرتاسه زیرین.



شکل ۲-۶- دید نزدیک از کنگلومرای آهکی خرد شده ائوسن [۳۰]



شکل ۲-۷- رخنمون مارن‌های سبز در محل گردنه و درجه هوازدگی آنها، سمت شیب لایه‌ها [۳۰]



شکل ۲-۸- نمایش آهک برشی کرتاسه، عملکرد ۳ دسته درزه [۳۰]



شکل ۲-۹- نمایش سنگ آهک آیتین. (نما به طرف جنوب) [۳۰]

۲-۹- هیدرولوژی و هیدروژئولوژی منطقه

در محدوده تونل گسترش رخساره‌های آهکی، عملکرد تکتونیکی شدید و میزان نزولات جوی موجب شده تا واحدهای خردشده و انحلال پذیر از قابلیت هوازدگی شیمیائی و فیزیکی بالایی برخوردار شوند. در سرتاسر این ناحیه، انواع سیماهای کارستی سطحی، از مقیاس شیارهای سطحی (کارن‌ها) تا حفرات کوچک و بزرگ انحلالی قابل مشاهده می‌باشند. پیش‌بینی می‌شود که در سنگ‌های عمق تونل نیز، به ویژه در مجاورت زون‌های گسلی و یا زون‌های خرد شده، سیماهای کارستی در ابعاد مختلف تشکیل شده باشند. تأثیر این رخساره‌های کارستی در هدایت، نفوذ و جریان آب‌ها در محدوده تونل با اجرای آب‌بندها و زهکش‌های طولی با ظرفیت و شیب مناسب، و نیز ایجاد شیب عرضی مناسب قابل کنترل می‌باشد. قابل ذکر است که با توجه به میزان بارندگی بالای منطقه و جنس نامناسب سنگ در مسیر لیتولوژیک K_5 ، امکان شکستگی سنگ‌ها در این محدوده وجود دارد [۲۹].

۲-۹-۱- قابلیت انحلال و نفوذپذیری سنگ‌ها

سنگ‌های محدوده طرح شامل سنگ آهک اربیتولین‌دار، آهک برشی و کنگلومرای آهکی- دولومیتی می‌باشند. سنگ‌های فوق عمدتاً در مقابل آب انحلال‌پذیر می‌باشند. در این ناحیه، برودت هوا و ریزش‌های جوی موجب می‌شود تا درجه انحلال این سنگ‌ها افزایش یابد. علاوه بر این نفوذ و انجماد آب در درزه و شکاف سنگ‌های تکتونیزه شده منطقه موجب شده تا نفوذپذیری این سنگ‌ها افزایش یابد [۲۹].

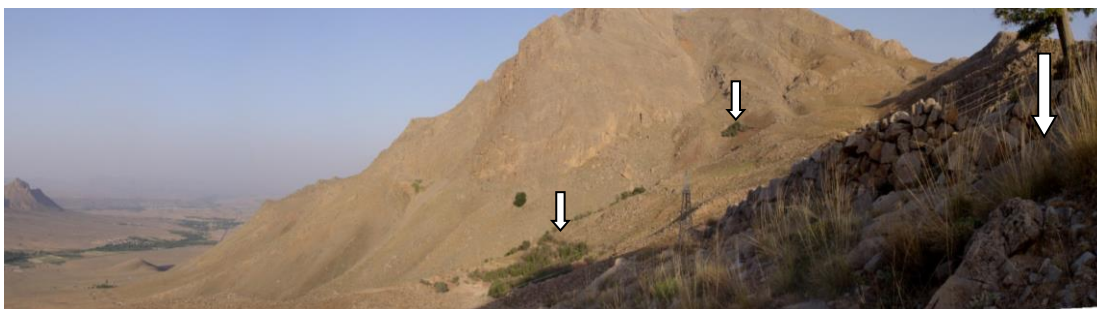
۲-۹-۲- هیدرولوژی مسیر تونل

با توجه به برف‌گیر بودن منطقه و میزان بالای ریزش‌های جوی، اصلاح شیب بستر آبراهه در این محدوده نقش بسیار مهمی در افزایش ضریب ایمنی دهانه ورودی در مقابل سیلاب احتمالی دارد.

۲-۹-۳- ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی محدوده تونل

شکل ۲-۱۰ نشان دهنده چشمه‌ای واقع در ۴۸۰ متری در سمت شمال شرقی تونل می‌باشد. فاصله این چشمه تا تونل حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ متر است که در تمام سال آبدهی دارد، همچنین چشمه دیگری در ۲۰۰ متری در فاصله حدود ۳۲۰ متری از تونل واقع است که در فصول بهار و تابستان آبدهی دارد. بررسی مقطع زمین‌شناسی نشان‌گر آن است که در سمت خروجی تونل، رسوبات آبرفتی به صورت سطحی بر روی آهک‌های مارنی و مارن قرار گرفته‌اند. اگرچه مارن‌ها اصولاً نفوذناپذیر هستند ولی در این منطقه، عملکرد گسل‌های جنوبی رخ باعث شده تا آنها نسبتاً خرد شوند و مسیری برای نفوذ آب و تجمع آن در سطح گسل خوردگی شود [۱۵].

انجام عملیات حفاری به روش انفجاری نیز می‌تواند موجب گسترش درزه و شکاف شود. با توجه به اینکه عمق و نحوه قرارگیری لایه‌های آبرفتی نسبت به آهک‌های مارنی با بررسی‌های سطحی امکان‌پذیر نیست، لذا بررسی‌های مقدماتی امکان ورود آب به صورت قطره قطره را در موقع حفاری محتمل می‌داند.



شکل ۲-۱۰- نمایش محل چند چشمه در محدوده تونل (دید به سمت غرب) [۱۵]

۲-۱۰- ویژگی‌های ژئومکانیکی مسیر تونل

مسیر تونل گردنه رخ براساس زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر به ۱۳ ناحیه ساختاری و دو زیر ناحیه تقسیم شده است که مشخصات ژئومکانیکی زون‌های Z_1 ، Z_{1-2} ، Z_5 ، Z_{13} و Z_{13-2} به شرح ذیل می‌باشد [۲۹]. برای سایر زون‌ها نتایج در پیوست ۱ آمده است.

۲-۱۰-۱- ناحیه ساختاری شماره ۱

که خود شامل دو زیر ناحیه می‌باشد:

الف- زیر ناحیه ساختاری ۱ (زون Z_1): در حد فاصل دهانه ورودی تونل، ناحیه ۱ ساختاری، ۶ دسته درزه شناسایی شده که سه دسته درزه آنها اصلی هستند. مشخصات این درزه‌ها و میانگین پارامترهای ژئومکانیکی این زون به ترتیب در جداول ۲-۱ و ۲-۲ نشان داده شده است [۲۹]:

جدول ۲-۱- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z_1 [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S_1	دسته درزه S_2	دسته درزه S_3
میانگین جهات درزه	N320/80NE	N80/75Nw	N15/80SE
وضعیت سطح درزه‌ها	صاف و نرم	صاف و نرم	صاف - نرم
ماده پرکننده	رس ممتد	رس و سیلیت غیرممتد	رس ممتد
وضعیت آب	نم	مرطوب	خشک
فاصله درزه‌ها	بیشتر از ۲ متر	بیشتر از ۲ متر	بیشتر از ۲ متر
جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	۵ تا ۱۰ میلی‌متر

طول درزه‌ها	بیشتر از ۱۵ متر	بیشتر از ۳۰ متر	بیشتر از ۲۵ متر
-------------	-----------------	-----------------	-----------------

جدول ۲-۲- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z_1 [۲۹]

اندیس کیفی توده سنگ	۹۰٪-۱۰۰٪
مجموعه دسته درزه‌ها	۳ دسته درزه اصلی
وضعیت سطح درزه‌ها	موجدار - نرم
ماده پرکننده درزه‌ها	رس ماسه‌ای غیرممتد
مقدار آب درزه‌ها	خشک - نم
فاصله بین درزه‌ها	بیشتر از ۲ متر
میانگین جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	۲۰ تا ۳۰ متر
جهت درزه‌ها	نامطلوب

ب- زیر ناحیه ساختاری ۲ (زون Z_{1-2}): مشخصات درزه‌ها و میانگین پارامترهای ژئومکانیکی مانند زون Z_1 می‌باشد [۲۹].

۲-۱۰-۲- ناحیه ساختاری شماره ۵

ناحیه ساختاری ۵ با ۹ دسته درزه شناسایی شده که ۳ دسته درزه آنها اصلی هستند. مشخصات آنها در جدول ۲-۳ نشان داده شده است [۲۹].

جدول ۲-۳- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z_5 [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S_{12}	دسته درزه S_{13}	دسته درزه S_{14}
میانگین جهات درزه	N345/80SW	N50/47SW	N45/90NW
وضعیت سطح درزه‌ها	مواج و نرم	مواج و نرم	مواج - زبر
ماده پرکننده	رس غیرممتد	رس غیرممتد	رس - غیرممتد
وضعیت آب	خشک	مرطوب	خشک - مرطوب
فاصله درزه‌ها	۲ متر	۲ متر	۲ متر
جدایش	۲/۵ تا ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	۱۰ متر	۱۰ متر	۱۰ متر

میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در جدول ۴-۲ ذکر شده است [۲۹].

جدول ۴-۲- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z₅ [۲۹]

اندیس کیفی توده سنگ	۷۵-۹۰٪
مجموعه دسته درزه‌ها	۳ دسته درزه اصلی
وضعیت سطح درزه‌ها	مواج - زبر
ماده پر کننده درزه‌ها	کلسیت - رس غیرممتد
مقدار آب درزه‌ها	قطره قطره تا جریان
فاصله بین درزه‌ها	۲ متر
میانگین جدایش	۰/۰۱ تا ۱۰ میلی متر
طول درزه‌ها	۱۰ متر
جهت درزه‌ها	نامطلوب

۲-۱۰-۳- ناحیه ساختاری شماره ۷

در داخل طبقات سنگ آهک خاکستری این ناحیه ۶ دسته درزه شناسایی شده که ۲ دسته درزه آنها اصلی هستند. مشخصات دسته درزه‌ها و میانگین پارامترهای ژئومکانیکی آنها به ترتیب در جداول ۲-۵ و ۲-۶ آمده است [۲۹].

جدول ۲-۵- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z₇ [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S ₁₈	دسته درزه S ₁₉
میانگین جهات درزه	N80/85SW	N65/50NE

پلهای - زبر	مواج - نرم	وضعیت سطح درزه‌ها
رس ماسه‌ای غیرممتد	کلسیت غیرممتد	ماده پرکننده
مرطوب	خشک	وضعیت آب
۲ متر	۲ متر	فاصله درزه‌ها
تا کمتر از ۰/۱ میلی‌متر	کمتر از ۰/۱ میلی‌متر	جدایش
بیشتر از ۱۰ متر	بیشتر از ۱۰ متر	طول درزه‌ها

جدول ۲-۶- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z₇ [۲۹]

۱۰۰%-۹۰%	اندیس کیفی توده‌سنگ
۲ دسته درزه اصلی	مجموعه دسته درزه‌ها
نرم و موجدار	وضعیت سطح درزه‌ها
کلسیت - رس غیرممتد	ماده پرکننده درزه‌ها
مرطوب تا قطره قطره	مقدار آب درزه‌ها
۲ متر	فاصله بین درزه‌ها
۰/۱ تا ۱۰ میلی‌متر	میانگین جدایش
بیشتر از ۱۰ متر	طول درزه‌ها
نسبتاً خوب	جهت درزه‌ها

۲-۱۰-۴- ناحیه ساختاری شماره ۱۳

ناحیه ۱۳ ساختاری خود شامل ۲ زیر ناحیه می‌باشد. مشخصات عمومی درزه‌های این ناحیه تا حدودی مشابه ناحیه ساختاری ۱۲ می‌باشد [۲۹]، لذا مشخصات ذکر شده برای زون Z₁₂ در مورد این دو زون هم صادق است (مشخصات ناحیه ساختاری شماره ۱۲ در پیوست ۱ آمده است). این مشخصات در جداول ۲-۷ و ۲-۸ نشان داده شده است.

جدول ۲-۷- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z₁₃ [۲۹]

دسته درزه S ₃₃	دسته درزه S ₃₂	دسته درزه S ₃₁	مشخصات درزه‌ها
N25/25SE	N45/80NW	N325/60SW	میانگین جهات درزه
مواج - نرم	مواج - نرم	مسطح - نرم	وضعیت سطح درزه‌ها

ماده پرکننده	کلسیت رس غیرممتد	رس ماسه‌ای غیرممتد	کلسیت ممتد
وضعیت آب	نم تا مرطوب	نم تا مرطوب	خشک
فاصله درزه‌ها	۰/۶ تا ۲ متر	۰/۶ تا ۲ متر	بیشتر از ۲ متر
جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	۱۰ متر	۱۰ متر	بیشتر از ۱۵ متر

جدول ۲-۸- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z₁₃ [۲۹]

اندیس کیفی توده‌سنگ	۹۰%-۷۵%
مجموعه دسته درزه‌ها	۳ دسته درزه اصلی
وضعیت سطح درزه‌ها	زبر موجدار
ماده پرکننده درزه‌ها	رس ماسه‌ای - کلسیت
مقدار آب درزه‌ها	نم تا مرطوب
فاصله بین درزه‌ها	۰/۶ تا ۲ متر
میانگین جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۱۰ متر
جهت درزه‌ها	نسبتاً خوب

۲-۱۱- نتیجه‌گیری

با توجه به توضیحات آمده در این فصل نتیجه‌گیری می‌شود که در مسیر تونل به چهار نوع سنگ مختلف با خصوصیات متفاوت از جمله سنگ آهک خاکستری ماسیو و ضخیم لایه، آهک مارنی سبز تا سیاه نازک لایه، سنگ آهک برشی و کنگلومرای آهکی با میان لایه‌های آهکی برخورد خواهیم کرد. همچنین در زون‌های طبقه‌بندی شده در مسیر تونل دسته درزه‌های مختلف با ویژگی‌های متفاوت شناسایی شده‌اند. در فصل‌های آینده، با نسبت دادن این ویژگی‌ها به سنگ‌های مسیر تونل، مقادیر جابجایی برای زون‌های مختلف قبل و بعد از حفاری به دست خواهد آمد.

۳-۱- مقدمه

تحلیل پایداری به سه روش تجربی، تحلیلی و عددی انجام می‌شود. به کمک روش‌های تجربی و جداول مربوط به آنها می‌توان یک دید اولیه نسبت به جابجایی‌ها و سیستم‌های نگهداری مفید به دست آورد. به روش تحلیلی و نمودارهای مربوط به آن درباره نقاط پلاستیک ایجاد شده در سازه مورد نظر می‌توان فهمید که بیشترین جابجایی‌ها در کجا اتفاق می‌افتد، سپس با کمک نمودارهای مشخصه زمین و نگهداری، سیستم مناسب‌تر را پیش‌بینی کرد. در جاهایی که روش‌های تحلیلی قادر به حل واقعی مسأله توزیع تنش‌ها و تغییر شکل‌ها نیستند، قابلیت روش‌های عددی آشکار می‌شود. در این روش‌ها معادلات مربوطه از طریق شرایط تعادل و قانون رفتاری اتخاذ شده به طور گام به گام حل می‌شوند.

۳-۲- طبقه‌بندی مهندسی سنگ

محققین بسیاری در زمینه طبقه‌بندی توده‌سنگ‌ها کار کرده‌اند و اساس کار همه آنها نیز امتیازدهی و عددی کردن ویژگی‌های ژئوتکنیکی مؤثر بر رفتار توده‌سنگ و سپس ترکیب این امتیازات و تعیین یک امتیاز کلی می‌باشد که با استفاده از آن نوع نگهداری تونل در آن توده مشخص می‌شود.

روش‌های تجربی، روش‌های ساده و کم هزینه‌ای را برای پیش‌بینی خصوصیات رفتاری توده‌سنگ و تخمین شاخص‌های مکانیکی آنها ارائه می‌دهند. رده‌بندی توده‌سنگ، یکی از رهیافت‌های محققان و مهندسان مکانیک سنگ برای دستیابی به موارد فوق است. منظور از رده‌بندی، قرار دادن سنگ‌ها در گروه‌های مختلف با توجه به خصوصیات ذاتی؛ رفتاری و شاخص‌های مکانیکی آنها در ارتباط با نوع سازه مورد نظر است.

مهمترین روش‌های رده‌بندی توده‌سنگ‌ها، روش ژئومکانیکی (RMR) و رده‌بندی بر اساس شاخص کیفیت تونل‌سازی Q می‌باشند. از نتایج این مرحله از تحقیق برای ارزیابی و پیشنهاد نگهداری اولیه مورد نیاز به روش تجربی، جهت پیش بینی یا لزوم نگهداری توده سنگ‌های مسیر تونل و آگاهی از خصوصیات ژئوتکنیکی این توده سنگ‌ها استفاده شده است. که طبقه‌بندی تونل گردنه رخ بر اساس این دو روش انجام گرفته است. (درامتیازدهی پارامترها و تعیین کلاس توده‌سنگ از جداول ۱-۲ و ۲-۲ و شکل ۱-۲ پیوست ۲ استفاده شده است).

۳-۲-۱- طبقه‌بندی ژئومکانیکی (روش RMR)

در سال ۱۹۷۶ میلادی، بیناوسکی از مرکز مطالعات علمی و صنعتی آفریقای جنوبی (CSIR)^{۱۰} طبقه‌بندی جدیدی از سنگ‌ها را بر مبنای ویژگی‌های ژئومکانیکی آنها ارائه داد که به روش RMR یا CSIR معروف است و به عنوان یکی از موفق‌ترین سیستم‌های رده‌بندی سنگ‌ها در مسائل تونل‌سازی به کار می‌رود. این روش در سال ۱۹۸۹ اصلاح شد. کیفیت توده‌های سنگی^{۱۱} با بررسی تعدادی از عوامل فیزیکی مؤثر در مشخصات مکانیکی و مقاومتی آن تعیین می‌گردد. بنیادوسکی در طبقه‌بندی ژئومکانیکی، پارامترهای ذیل را با یکدیگر مرتبط ساخته و اثرات آنها را در نظر می‌گیرد به صورتی که تمامی این موارد را می‌توان از داده‌های گمانه‌ها و نیز در محل به دست آورد [۳۳]. آنچه در امتیازدهی تونل گردنه رخ به کار رفته است بر مبنای روش اصلاحی است. این نظریه بر مبنای شش پارامتر به شرح زیر پایه‌ریزی شده است:

۱. مقاومت فشاری تک محوری سنگ سالم،
۲. اندیس کیفی سنگ RQD،
۳. فاصله داری درزه‌ها^{۱۲}،
۴. وضعیت درزه‌ها شامل جدایش، امتداد یافتگی، زبری سطوح و طبیعت پرکننده درزه‌ها،
۵. شرایط آب‌های زیرزمینی بر اساس میزان نفوذ آب به حفاری‌ها و نسبت فشار آب موجود در درزه‌ها به تنش اصلی،

¹⁰ South African for Scientific and Industrial Research

¹¹ Rock Mass Rating

¹² Spacing of joints

۶. جهت‌یابی ناپیوستگی‌ها.

پس از تعیین وضعیت سنگ از جهت پارامترهای فوق و با توجه به جداول مربوطه، به هر یک از پارامترها امتیازی داده می‌شود و در نهایت با در نظر گرفتن مجموع امتیازهای ناشی از عوامل فوق، که به عنوان امتیاز RMR شناخته می‌شود، سنگ در یکی از پنج گروه خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی می‌شود. بر اساس این طبقه‌بندی، می‌توان زمان پایداری فضای حفاری شده، مشخصات مکانیکی توده‌های سنگی، نوع و مقدار حائل مورد نیاز را به طور تقریبی ارزیابی کرد [۲۳].

۳-۲-۲- تعیین GSI با استفاده از طبقه‌بندی‌های RMR و Q

شاخص مقاومت زمین‌شناسی را می‌توان با استفاده از مقدار RMR تعیین کرد (مقادیر RMR و Q را می‌توان از جداول ۱-۲ و ۲-۲ پیوست ۲ به دست آورد). در رده‌بندی ژئومکانیکی سال ۸۹ اگر $RMR_{89} > 23$ باشد میزان GSI با توجه به رابطه زیر تعیین می‌شود [۴۰] ولی باید در نظر داشته باشیم که برای آب زیرزمینی امتیاز ۱۵، یعنی توده‌سنگ در شرایط کاملاً خشک فرض می‌گردد و همچنین جهت ناپیوستگی باید خیلی مطلوب در نظر گرفته شود به این صورت که برای تعدیل جهت ناپیوستگی‌ها امتیاز آنها را معادل صفر قرار دهیم:

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (۱-۳)$$

اگر میزان $RMR_{89} < 23$ باشد در این صورت نمی‌توان برای به دست آوردن اندیس مقاومت زمین‌شناسی از رابطه بالا استفاده نمود و به جای آن از مقدار Q' (اندیس کیفیت تونل‌سازی اصلاح شده) استفاده می‌شود [۴۰]. در این حالت برای J_w و SRF در رده‌بندی بارتن و همکاران، مقدار ۱ که معادل یک توده‌سنگ خشک تحت تأثیر شرایط تنش متوسط است، استفاده می‌شود. با توجه به توضیحات بالا مقدار Q اصلاح شده برابر خواهد بود با:

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (۲-۳)$$

و در نتیجه با استفاده از رابطه زیر مقدار GSI تخمین زده می‌شود:

$$GSI = 9LnQ' + 44$$

(۳-۳)

۳-۲-۳- طبقه‌بندی کیفیت توده سنگ (روش Q)

این روش در سال ۱۹۷۴ توسط بارتن^{۱۳} و همکارانش از انستیتو ژئوتکنیکی نروژ (NGI)^{۱۴} ارائه شد. اساس این روش بر مبنای محاسبه مقدار Q و سپس ارائه سیستم نگهداری می‌باشد. مقدار Q از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴۰]:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (۴-۳)$$

که در آن:

- RQD: شاخص کیفیت سنگ،

- J_n : تعداد دسته درزه‌ها،

- J_r : عدد زبری درزه‌ها،

- J_a : عدد هوازدگی درزه‌ها،

- J_w : عدد کاهش آب درزه‌ها،

- SRF: ضریب کاهش تنش می‌باشد.

به نظر می‌رسد شاخص کیفیت سنگ (Q) را می‌توان تابعی از سه پارامتر مشخص در نظر گرفت که عبارتند از:

اندازه بلوک‌های سنگی ($\frac{RQD}{J_n}$)، مقاومت برشی بین بلوک‌های سنگی ($\frac{J_r}{J_a}$) و تنش فعال ($\frac{J_w}{SRF}$).

با توجه به عدد Q می‌توان نوع و مقدار پوشش اولیه مورد نیاز مقطع تونل را به طور تقریبی و با

استفاده از گراف مربوطه (شکل ۲-۱ پیوست ۲) تعیین کرد.

¹³ Barton

¹⁴ Norwegian Geotechnical Institute

جهت جمع‌آوری اطلاعات صحرائی و پارامترهای مربوطه باید به نکات زیر توجه کرد:

طول سنگ رخنمون یافته یا مغزه حفاری لازم برای تخمین چهار پارامتر اول (J_a, J_r, J_n, RQD) بستگی به یکنواختی توده سنگ دارد. اگر تنوع کمی وجود داشته باشد، یک مغزه یا دیواره سنگی به طول ۵-۱۰ متر ممکن است کافی باشد. به هر حال در چند متر زون برشی حاوی درزه‌های نزدیک به هم، همراه با سنگ‌های سالم متناوب لازم است که تخمین پارامترهای فوق‌الذکر به صورت مجزا صورت گیرد و اگر منطقه برشی با درزه‌های نزدیک به هم به اندازه کافی گسترش داشته باشد، ترمیم ویژه‌ای علاوه بر شاتکریت را در مقایسه با حالتی که فقط پیچ‌سنگ‌های منظم وجود دارد، نیاز خواهد داشت. به عبارت دیگر، اگر منطقه برشی کمتر از ۰/۵ متر بوده و تکرار زیادی داشته باشد، آنگاه کاهش کلی مقدار Q ، برای تمام طول تونل بهترین روش بوده که باعث افزایش سیستم نگهدارنده می‌گردد و این شبیه این است که در کل طول این مسیر یکنواختی وجود داشته باشد. در چنین مواردی ممکن است مغزه یا طول دیواره‌ای به اندازه ۱۰ تا ۵۰ متر برای تعیین یک تصویر کلی از کیفیت توده‌سنگ لازم باشد [۲].

۳-۳- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل

تحلیل اندرکنش سنگ - حائل به دلیل عوامل زیادی که در ارائه راه حل مناسب باید در نظر گرفت، مسئله بسیار مشکل و پیچیده‌ای است. تعدادی فرضیات ساده کننده باید در نظر گرفت تا مسئله تا حدودی قابل حل شود. این فرضیات در ذیل آمده‌اند.

۳-۳-۱- محاسبه جابجایی‌های زمین

برای پیش‌بینی نگهداری لازم، باید از طریق مدل‌های تحلیلی یا عددی، شناختی از جابجایی‌های زمین که در اثر حفاری به وجود می‌آید کسب شود. البته دوری یا نزدیکی نتایج حاصل از این روش‌ها به واقعیت، بستگی به شناخت ما از زمین و انتخاب مدل مناسب دارد. به نظر می‌رسد که مدل‌های خطی، در طراحی وسائل نگهداری تونل چندان به کار نیایند، اما جهت درک سازوکار تغییر شکل‌ها بسیار مفید می‌باشند [۵].

به طور کلی مدل‌های مورد استفاده به دو دسته تقسیم می‌شوند. مدل‌هایی که زمین را یک محیط پیوسته و مدل‌هایی که آن را به صورت اجتماعی از قطعات ناپیوسته در نظر می‌گیرند [۲۵].

۳-۱-۳-۱- مدل‌های محیط پیوسته

در شرایط زیر می‌توان از مدل‌های محیط پیوسته استفاده کرد:

- زمین، همگن و یکپارچه باشد.
- ناپیوستگی‌های موجود تأثیری بر رفتار سازه زیرزمینی نداشته باشد.
- توده‌سنگ بسیار پر درز و شکاف باشد که در این صورت می‌توان توده مزبور را یک توده پیوسته معادل تعریف و قانون رفتاری برای آن شبیه‌سازی کرد.

۳-۱-۳-۲- مدل‌های محیط ناپیوسته

این مدل‌ها توده‌سنگ را به صورت اجتماعی از بلوک‌ها که به وسیله درزه‌های طبیعی محدود شده‌اند، شبیه‌سازی می‌کنند. در این مدل‌ها بلوک‌های مزبور معمولاً صلب و درزه‌ها تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند. این مدل‌ها بیشتر برای تحلیل رفتار توده‌سنگ‌های نسبتاً مستحکم با درزه‌داری کم کاربرد دارند.

در حال حاضر دو روش اصلی برای حل این مدل‌ها وجود دارد:

الف- روش دینامیکی

این روش توسط کاندال^{۱۵} (۱۹۷۱) پیشنهاد شد و در برنامه‌های UDEC و 3DEC مورد استفاده قرار گرفته است. اصول این روش عبارت است از:

- ۱- محاسبه یک وضعیت تعادل اولیه که در آن، مدل به وسیله نیروی وزن بلوک‌ها و احتمالاً بارهای خارجی نظیر وزن زمین بالای تونل، بارگذاری شده است.

۲- شبیه‌سازی فضای حفر شده با بیرون کشیدن بلوک‌ها. در این شرایط، سازه دچار جابجایی می‌شود، زیرا بلوک‌ها تحت نیرو قرار می‌گیرند. اساس این برنامه، محاسبه جابجایی بلوک‌ها در مراحل زمانی مختلف است، به این صورت که در هر مرحله زمانی، واکنش‌های بین بلوک‌ها محاسبه می‌شود. با اتخاذ برخی احتیاط‌ها (انتخاب صحیح مراحل زمانی، اعمال ضریب ویسکوزیته تقریباً مجازی جهت میرایی ارتعاشات) می‌توان به وضعیت تعادل نهایی دست یافت [۲۵].

ب- روش استاتیکی

اساس این روش، کمینه سازی انرژی پتانسیل سازه برای محاسبه مستقیم تعادل نهایی است (البته با فرض الاستیک برای درزه‌ها). این روش در برنامه BRIG3D مدرسه عالی معدن پاریس مورد استفاده قرار گرفته است [۲۵].

از آنجا که مارن‌ها رفتار همگنی دارند و در اثر آزادسازی تنش ناشی از حفر تونل، به دلیل وجود رس در آنها، خاصیت پلاستیک از خود نشان می‌دهند؛ می‌توان رفتار الاستوپلاستیک کامل را که یکی از حالات رفتاری روش‌های تحلیلی در مدل‌سازی محیط‌های پیوسته می‌باشد، برای آنها در نظر گرفت.

وقتی که فشار همه جانبه ذاتی در محیط، سنگ را به حد شکستنی می‌رساند؛ بخشی از محیط اطراف تونل در اثر این فشارها خرد شده و منطقه خرد شده (زون پلاستیک) اطراف تونل را تشکیل می‌دهد. حال هرچه این فشار نسبت به مقاومت سنگ بیشتر باشد زون پلاستیک اطراف تونل بیشتر شده و تغییر شکل حاصل از پلاستیسیته سنگ بیشتر خواهد شد [۵].

در یک فضای الاستیک همگن ایزوتروپ که در نقطه‌ای از آن فشار همه جانبه P وجود دارد، تونلی با مقطع دایره‌ای به شعاع r_i حفر می‌شود. سیستم نگهداری نصب می‌شود که فشار P_i را به صورت شعاعی به محیط اطراف تونل اعمال می‌کند (در وضعیت تونل بدون سیستم نگهداری $P_i = 0$ است). هدف تعیین ضخامت منطقه پلاستیک دهانه تونل بر حسب مشخصاتی چون P, P_0 (تنش اولیه)، مقاومت فشاری تک محوره سنگ (δ_c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، چسبندگی (C)، پارامترهای مقاومتی سنگ (s, m) و r_i می‌باشد. آنگاه بر اساس ضخامت تغییر شکل شعاعی منطقه پلاستیک حساب می‌شود که خودتابعی از تمام

کیفیت‌های ذکر شده است. بنابراین می‌توان منحنی مشخصه زمین (تغییر شکل شعاعی - فشار سیستم نگهداری) را برای یک تونل معین با خواص معلوم زمین به دست آورد.

۳-۳-۲- فرضیات اساسی در رسم منحنی مشخصه زمین

- هندسه تونل: تونل را با مقطع دایره به شعاع r_i در نظر می‌گیرند. طول تونل به گونه‌ای است که مسئله را می‌توان به صورت دو بعدی در نظر گرفت.
- میدان تنش درجا: تنش‌های افقی و قائم با هم برابر و مساوی P_0 است.
- فشار سیستم نگهداری: فرض می‌شود که سیستم نگهداری نصب شده فشار P_i را به صورت شعاعی و یکنواخت به دیواره‌ها و جدار تونل اعمال می‌کند.
- خصوصیات توده‌سنگ اصلی: توده‌سنگ اصلی الاستیک فرض شده و معیار شکست این توده‌سنگی با رابطه (۳-۵) بیان می‌شود [۴۰]. در این پروژه، براساس تجربه آقای هوک در هر دو جنبه تئوری و عملی رفتار سنگ، با استفاده از فرآیند سعی و خطا، رابطه تجربی زیر بین تنش‌های اصلی مرتبط با شکست و خرابی نهایی سنگ استفاده شده است:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + S\sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (۳-۵)$$

که در آن:

σ_1 = تنش اصلی ماکزیمم در لحظه شکستگی نهایی

σ_3 = تنش اصلی مینیمم

σ_c = مقاومت فشاری تک محوری سنگ

m و s = مقادیر ثابتی که به خواص توده‌سنگ بستگی دارد.

- خصوصیات توده‌سنگ شکسته: فرض می‌شود که توده‌سنگی شکسته که تونل را در بر گرفته است، پلاستیک کامل باشد و از معیار شکست زیر پیروی کند:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_r \sigma_c \sigma_3 + S_r \sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6-3)$$

در این رابطه ضرایب m_r و S_r مربوط به سنگ شکسته است.

- کرنش‌های حجمی: در منطقه الاستیک، کرنش‌های حجمی با ثوابت الاستیک مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (u) مشخص می‌شوند. در لحظه شکست و شکست کامل، سنگ افزایش حجم می‌دهد و کرنش‌های حجمی با استفاده از قانون جریان در تئوری پلاستیسیته، محاسبه می‌شود.
- رفتار وابسته به زمان: فرض می‌شود که منطقه پلاستیک تا شعاع r_e گسترش یابد که این گسترش به فشار P_0 ، فشار سیستم نگهداری P_i و خصوصیات مصالح سنگی الاستیک و پلاستیک بستگی دارد.

- تقارن شعاعی: در تمام این بحث‌ها، مسئله به صورت 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 آنجا که وزن سنگ شکسته در طراحی سیستم نگهداری فوق‌العاده مهم است، بعد از اتمام تحلیل اصلی، اثر وزن را به طور تقریبی منظور می‌کنند [۲۴ و ۲۵].

۳-۳-۳- مراحل رسم منحنی مشخصه زمین

برای رسم منحنی مشخصه زمین اطلاعات زیر مورد نیاز است [۳۹]:

$$\sigma_c = \text{مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر}$$

$$s \text{ و } m = \text{ثابت‌های توده‌سنگ اصلی}$$

$$E = \text{مدول الاستیسیته توده‌سنگ اصلی}$$

$$u = \text{ضریب پواسون توده‌سنگ اصلی}$$

$$s_r \text{ و } m_r = \text{ثابت‌های توده‌سنگ شکسته}$$

$$\gamma_r = \text{وزن مخصوص توده‌سنگ شکسته}$$

$$P_0 = \text{اندازه تنش درجا}$$

$$r_i = \text{شعاع تونل}$$

$$P_i = \text{فشار داخلی سیستم نگهداری}$$

ابتدا باید سه پارامتر M و D و N را محاسبه کرد [۳۹]:

$$M = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m}{4} \right)^2 + \frac{mP_0}{\sigma_c} + s \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{m}{8} \quad (۷-۳)$$

$$D = \frac{-m}{m + 4 \left(\frac{m\sigma_{re}}{\sigma_c} + s \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (۸-۳)$$

$$N = \frac{2}{m_r \sigma_c} \left(m_r \sigma_c P_0 + S_r \sigma_c^2 - m_r \sigma_c^2 M \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۹-۳)$$

فشار بحرانی از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$P_{icr} = P_0 - M\sigma_c \quad (۱۰-۳)$$

حال برای رسم نقاط منحنی به ازای هر P_i ، U_i (تغییر شکل شعاعی) محاسبه می‌شود. به این صورت

که به ازای $P_i > P_{icr}$ ، تغییر شکل در اطراف تونل الاستیک است. در این حالت U_i برابر است با [۳۹]:

$$U_i = r_i \times \frac{(1+\nu)}{E} (P_0 - P_i) \quad (۱۱-۳)$$

و برای $P_i < P_{icr}$ شکستگی پلاستیک در اطراف تونل رخ می‌دهد، در این حالت U_i از روابط زیر

محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$\frac{u_e}{r_e} = \frac{1+\nu}{E} M\sigma_c \quad (۱۲-۳)$$

$$\frac{r_e}{r_i} = \exp \left(N - 2 \left(\frac{P_i}{m_r \sigma_c} + \frac{s_r}{m_r^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (۱۳-۳)$$

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

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

$$R = 2DLn \frac{r_e}{r_i} \quad (14-3)$$

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

$$R = 1.1D \quad (15-3)$$

$$e_{av} = \frac{2 \left(\frac{u_e}{r_e} \right) \left(\frac{r_e}{r_i} \right)^2}{\left[\left(\frac{r_e}{r_i} \right)^2 - 1 \right] \left[1 + \frac{1}{R} \right]} \quad (16-3)$$

$$A = \left(\frac{2u_e}{r_e} - e_{av} \right) \left(\frac{r_e}{r_i} \right)^2 \quad (17-3)$$

$$u_i = r_i \left[1 - \left(\frac{1 - e_{av}}{1 + A} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (18-3)$$

R، e_{av} و A پارامترهایی هستند که در محاسبه u_i به کار می‌روند.

r_e شعاع منطقه الاستیک و u_e جابجایی شعاعی در مرز الاستیک است.

منحنی مشخصه زمین را می‌توان برای نمایش رفتار دیواره تونل‌ها در نظر گرفت. زیرا در این مناطق به علت بار مرده ناشی از سنگ شکسته اطراف تونل، تنش‌ها و تغییر شکل‌ها چندان تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند. برای آن که وزن بار مرده ناشی از سنگ شکسته در طاق و کف تونل در نظر گرفته شود، فشار سیستم نگهداری P_i را می‌توان به میزان $\gamma_r (r_e - r_i)$ کم یا زیاد کرد که در آن، γ_r وزن مخصوص سنگ شکسته است.

این منحنی با فرض این که صلیبیت سیستم نگهداری ثابت است، خطی فرض می‌شود و حال آن که در عمل این طور نیست. در شکل ۱-۳ خط سیستم نگهداری رسم شده است.

در این شکل: U_{io} = تغییر شکل اولیه قبل از نصب سیستم نگهداری

P_{smax} = حداکثر فشار ناشی از سیستم نگهداری، می‌باشند.

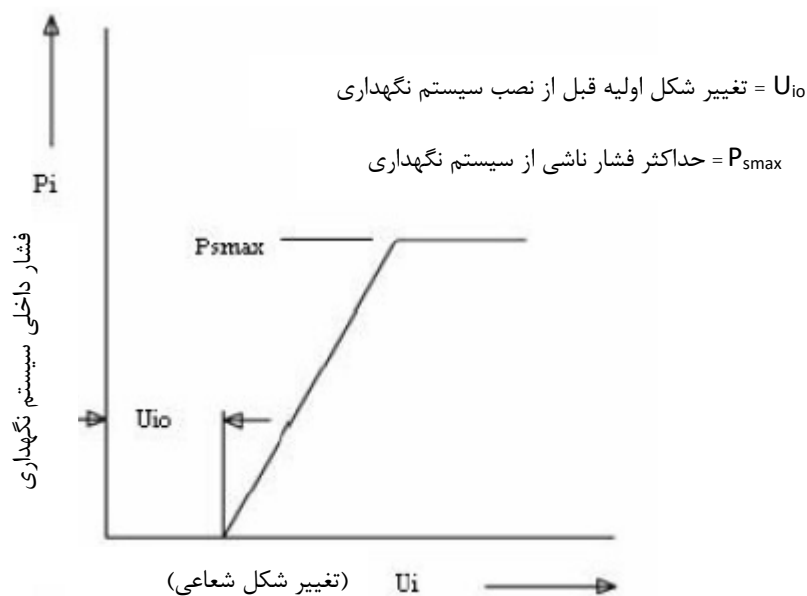
در این حالت تغییر شکل نهایی تونل برابر است با:

$$U_i = U_{io} + U_{ie} \quad (۱۹-۳)$$

که U_{ie} تغییر شکل الاستیک سیستم نگهداری است و برابر است با [۲۳]:

$$U_{ie} = \frac{P_{smax} \times r_i}{k_c} \quad (۲۰-۳)$$

که در این رابطه r_i شعاع تونل و k_c سختی سیستم نگهداری است.



شکل ۱-۳- منحنی مشخصه سیستم نگهداری [۴۰]

۳-۴-۱- محاسبه تغییر شکل اولیه قبل از نصب سیستم نگهداری

تعیین میزان همگرایی قبل از نصب سیستم نگهداری از اهمیت زیادی برخوردار است. همچنین لحاظ کردن این جابجایی‌ها در جدار تونل (که مربوط به وقفه زمانی بین حفر و نصب سیستم نگهداری است) در مدل‌سازی عددی نیز بسیار مهم بوده و سبب طراحی بهینه سیستم نگهداری خواهد شد.

همگرایی بعد از حفاری فوراً متوقف نمی‌شود. در واقع همگرایی قبل از رسیدن جبهه کار به مقطع مورد نظر شروع می‌شود و پس از حفاری مقطع مورد نظر و رد شدن از آن نیز ادامه می‌یابد. همگرایی تابع سرعت پیشروی جبهه کار و توقف‌های احتمالی در کار بوده و سرعت همگرایی نیز تابع خواص زمین است. برای تعیین خواص زمین باید در آزمایشگاه بر روی نمونه‌ها، آزمون وارفتگی یا خزش انجام داد که مستلزم صرف زمان زیادی است [۲۵].

طبق نظر چانگ^{۱۶} [۳۶]، همگرایی ($U(x)$) در مقطعی که به فاصله x از سینه کار قرار دارد برابر است با:

$$U(x) = U_t \left[1 - \left(1 - \frac{U_{io}}{U_t} \right) \left(1 + 1.19 \frac{X}{R_p} \right)^2 \right] \quad (۲۱-۳)$$

که در آن U_{io} میزان همگرایی در سینه کار پیشروی است که بلافاصله بعد از عملیات حفاری رخ می‌دهد و U_t همگرایی برای مقطعی است که فاصله‌ای دور از سینه کار دارد.

بر اساس گفته پانت و گونت^{۱۷} (۱۹۸۳)، $\frac{U_{io}}{U_t}$ مقداری ثابت و برابر ۰/۲۸ می‌باشد (یعنی ۲۸ درصد

کل جابجایی بعد از حفر انجام خواهد شد). آقای چانگ رابطه مستقلی جهت محاسبه $\frac{U_{io}}{U_t}$ ارائه کرده است:

$$\frac{U_{io}}{U_t} = 0.279 \left(\frac{R_p}{r_i} \right)^{0.209} \quad (۲۲-۳)$$

که در آن:

R_p شعاع منطقه پلاستیک اطراف تونل و r_i شعاع تونل می‌باشد.

در مورد انتخاب U_{io} باید به دو نکته زیر دقت کرد:

¹⁶ Chang

¹⁷ Guenot, A.Panet, M.

۱- از آن جا که سرعت اجرای سیستم نگهداری شاتکریت (به همراه توری سیمی) با سرعت پیشروی بیشتری نسبت به اجرای شاتکریت و پیچ‌سنگ همراه است، مقدار همگرایی اولیه کمتری برای سیستم نگهداری شاتکریت نسبت به اجرای سیستم نگهداری شاتکریت و پیچ‌سنگ باید در نظر گرفته شود.

۲- همگرایی بحرانی U_{crit} ، مقدار همگرایی است که فشار کلی وسیله نگهداری حداقل خواهد بود. در هنگام نصب سیستم نگهداری باید دقت شود که رابطه زیر برقرار باشد:

$$U_{io} + U_{sm} < U_{crit} \quad (23-3)$$

که در آن:

$$U_{sm} = \text{حداکثر تغییر شکل الاستیک سیستم نگهداری}$$

زیرا اگر این رابطه برقرار نباشد، تونل بالقوه نا امن خواهد بود و احتمال ریزش و عدم پایداری وجود خواهد داشت.

۳-۳-۴-۲- حائل موجود برای پوشش بتنی یا شاتکریت

پوشش بتنی به صورت بتن درجا با قالب‌بندی اجرا می‌شود و یا به صورت شاتکریت به ضخامت t_c در تونل به شعاع r_i پاشیده می‌شود. سختی حائل نصب شده در داخل تونل توسط ثابت K مشخص می‌شود [۴۰].

$$K_c = \frac{E_c [r_i^2 - (r_i - t_c)^2]}{(1 + \nu_c) [(1 - 2\nu_c)r_i^2 + (r_i - t_c)^2]} \quad (24-3)$$

که در آن:

$$E_c = \text{مدول الاستیسیته بتن}$$

$$\nu_c = \text{ضریب پواسون بتن}$$

$$r_i = \text{شعاع تونل}$$

$$t_c = \text{ضخامت بتن یا شاتکریت}$$

توجه داشته باشید که تأثیر 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 تأثیر ندارد. چنانچه از مسلح کننده‌های سنگین در پوشش استفاده شود، مثلاً وقتی که بتن روی شبکه آرماتوربندی شده اجرا می‌شود، اثر هر دو سیستم باید در نظر گرفته شود.

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

$$P_{s \max} = \frac{1}{2} \sigma_{c.com} \left[1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] \quad (25-3)$$

که $\sigma_{c.conc}$ مقاومت فشاری تک محوره بتن یا شاتکریت است. باید متذکر شد که معادله ۲۵-۳ فقط زمانی به کار می‌رود که پوشش دایره‌ای بوده و مقدار شکستگی محدود باشد.

۳-۳-۳-۳- حائل موجود برای مجموعه‌های فولادی

سختی یک مجموعه فولادی توسط رابطه زیر تعریف می‌شود [۴۳]:

$$\frac{1}{K_s} = \frac{S.r_i^3}{E_s A_s} + \frac{S.r_i^3}{E_s I_s} \left[\frac{\theta(\theta + \sin\theta \cdot \cos\theta)}{2\sin^2\theta} - 1 \right] + \frac{2S.\theta.t_B}{E_B W^2} \quad (26-3)$$

که در آن:

r_i = شعاع تونل

S = فاصله‌بندی 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

فرض می‌شود که بلوکها در پلان، مربعی 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 به دست می‌آید:

$$P_{s \max} = \frac{3A_s I_s \sigma_{ys}}{2S \cdot r_i \cdot \theta \left[3I_s + XA_s \left[r_i - \left(t_p + \frac{1}{2}X \right) \right] \right] (1 - \cos \theta)} \quad (27-3)$$

که در آن:

$\sigma_{ys} =$ مقاومت تسلیم فولاد

$X =$ عمق مقطع فولادی

۳-۳-۴- حائل موجود برای پیچ‌سنگ‌های غیر تزریقی

حائل موجود برای سنگ‌دوز غیر تزریقی که به صورت مکانیکی یا شیمیایی مهار شده است، بستگی به خصوصیات تغییر شکل پذیری مهار، واشر و مهره، رأس پیچ‌سنگ و میله پیچ‌سنگ دارد [۴۰].

k_b ، سختی پیچ‌سنگ غیر تزریقی با مهار مکانیکی یا شیمیایی توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{1}{k_b} = \frac{S_c S_l}{r_i} \left[\frac{4l}{\pi \cdot d_b^2 \cdot E_b} + Q \right] \quad (28-3)$$

که در آن:

$l =$ طول آزاد پیچ‌سنگ بین مهاری و رأس

$d_b = \text{قطر پیچ سنگ}$

$E_b = \text{مدول یانگ مواد پیچ سنگ}$

$T_b = \text{مقدار بار در پیچ سنگ}$

$S_c = \text{فاصله بندی محیطی پیچ سنگ ها}$

$S_l = \text{فاصله بندی طولی پیچ سنگ ها}$

Q مقداری است که به خصوصیات بار- تغییر شکل مهاری، صفحه، واشر و رأس پیچ سنگ مربوط می شود. مقدار Q را می توان از منحنی بار- تغییر شکل که از آزمایش بیرون کشی به دست می آید، تعیین نمود.

حداکثر فشار حائل که در یک سیستم پیچ سنگ در اثر تغییر شکل توده سنگ ایجاد می شود از رابطه زیر به دست می آید:

$$P_{sb \max} = \frac{T_{bf}}{S_c S_l} \quad (29-3)$$

که در آن:

$T_{bf} = \text{مقاومت نهایی سیستم پیچ سنگ براساس آزمایش بیرون کشی در توده سنگی مشابه توده سنگی که سیستم پیچ سنگ برای آن طرح شده است.}$

۳-۳-۴-۵- حائل ایجاد شده توسط پیچ سنگ های تزریقی یا کابل ها

مفاهیم مربوط به اندرکنش حائل- سنگ نمی تواند در مورد پیچ سنگ های تزریق شده یا کابل ها به کار رود. این امر بدان علت است که این سیستم مستقل از توده سنگ عمل نمی کند و لذا تغییر شکل هایی که در توده سنگ و سیستم حائل هر دو اتفاق می افتد را نمی توان از یکدیگر جدا کرد [۴۰].

عمل تقویت کنندگی پیچ سنگ های تزریق شده یا کابل ها در توده های سنگی به علت تقویت درونی توده سنگ است که به میزان زیادی مشابه عمل حضور مسلح کننده ها در بتن مسلح است. به علت به هم بافتن

توده سنگ و جلوگیری از جدایی بلوک‌های منفرد، المان‌های مسلح کننده تزریقی، اتساع در توده سنگ اطراف تونل را محدود می‌کنند. این امر موجب می‌شود که ثابت‌های توده سنگ اصلی (m, s) در تبدیل به m_r و s_r کمتر کاهش یافته و تغییر کنند. مطالعات انجام‌شده در مورد تأثیر مقادیر m_r و s_r بر خط حائل مورد نیاز سنگی که تونل را در بر گرفته، نشان می‌دهد که تغییر شکل u_i با افزایش اندکی در m_r و s_r شدیداً کاهش می‌یابد.

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 به صورت کمی درآورد.

۳-۳-۴-۶- عکس‌العمل سیستم‌های حائل مرکب

وقتی دو سیستم حائل به‌عنوان مثال پیچ‌سنگ و پوشش شاتکریت، با هم ترکیب می‌شوند فرض می‌شود که سختی سیستم حائل مرکب مساوی با جمع سختی‌های هر مولفه به‌صورت انفرادی است یعنی:

$$K' = K_1 + K_2 \quad (30-3)$$

که در آن:

$$K_1 = \text{سختی سیستم اول}$$

$$K_2 = \text{سختی سیستم دوم}$$

لازم به تذکر است که فرض می‌شود دو سیستم حائل هم زمان نصب می‌گردند.

تغییر شکل سیستم حائل مرکب هم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$u_i = u_{io} + \frac{P_i r_i}{K'} \quad (31-3)$$

این معادله تا جایی اعتبار دارد که حداکثر تغییر شکلی که می تواند توسط یکی از سیستم‌ها تحمل شود، به دست آید. در نتیجه گسیختگی سیستم اول به عنوان گسیختگی کل سیستم حائل تلقی می شود [۴۳].

۳-۴- روش‌های عددی

در واقعیت مشاهده می شود که مقطع اکثر تونل‌ها غیر دایره‌ای، زمین اطراف تونل ناهمگون، تنش‌های طبیعی غالباً ناهمسان و رفتار زمین نه الاستیک و نه الاستوپلاستیک کامل است. علاوه بر این موارد، حضور و تأثیر سینه کار نیز موجب می شود که تونل، یک سازه سه بعدی باشد. لذا روش‌های تحلیلی قادر به حل واقعی مسئله توزیع تنش‌ها و تغییر شکل‌ها نیستند. در این شرایط قابلیت روش‌های عددی آشکار می شود. در این روش‌ها معادلات مربوط از طریق شرایط تعادل و قانون رفتاری اتخاذ شده به طور گام به گام حل می شوند. در میان روش‌های عددی، روش اجزا محدود کاربرد بیشتری دارد و به وسیله آن می توان مدل دوبعدی یا سه بعدی به صورت زیر تهیه نمود:

۱- در مدل دو بعدی، مقطعی از تونل با یکی از مفروضات زیر حل می شود:

الف- تنش در جهت عمود بر صفحه مقطع، صفر در نظر گرفته می شود (تنش صفحه‌ای).

ب- تغییر مکان در جهت عمود بر صفحه مقطع، صفر در نظر گرفته می شود (کرنش صفحه‌ای).

ج- یا فرض می شود که سازه حول یک محور تقارن دوران یافته است (تقارن محوری).

۲- در مدل سه بعدی، کل تونل در سه بعد آن در نظر گرفته شده و به اجزا حجمی چهار یا شش وجهی تقسیم می شود. در این روش برای هر یک از اجزا، خواص یا رفتار مکانیکی مشخص در نظر گرفته می شود: الاستیسیته، الاستوپلاستیک، ویسکوالاستیسیته و یا رفتارهای دیگر. همچنین امکان مدل کردن هرگونه ناپیوستگی اعم از لایه بندی و یا درزه و شکاف‌های مختلف با این روش وجود دارد و به

عبارت دیگر می‌توان رفتار سازندهای رسوبی متشکل از مصالح مختلف را مدل نمود. سطح مقطع تونل نیز می‌تواند به هر شکلی در نظر گرفته شود. تعداد اجزا باید در بخش‌های با شدت تنش زیاد، بیشتر و در قسمت‌های دیگر، کمتر باشد. پیشرفت این روش کاملاً وابسته به توسعه کامپیوتر و یا به عبارت دیگر وابسته به پیشرفت سرعت محاسبات است زیرا که در این روش تعداد بسیار زیاد عملیات ریاضی باید انجام شود [۲۵].

به طور کلی روش‌های تحلیل تنش در حفاریات زیرزمینی را به دو گروه محیطی و مرزی تقسیم می‌کنند:

۱- روش‌های محیطی^{۱۸} یا دیفرانسیلی^{۱۹}، توده‌سنگ را به عناصر ساده هندسی تفکیک می‌کنند که هر یک ویژگی‌های خاص خود را دارند و مجموعه این عناصر فرعی، رفتار کلی توده‌سنگ را بیان می‌کنند. این گروه شامل روش‌هایی چون: روش عناصر محدود^{۲۰}، روش تفاوت‌های محدود^{۲۱} و روش عناصر مجزا^{۲۲} می‌باشد [۲۵].

۲- روش‌های مرزی^{۲۳} یا انتگرالی^{۲۴}، فقط مرز خارجی حفاریات زیرزمینی را به عناصر مجزایی تقسیم می‌کنند و بخش درونی توده‌سنگ را به عنوان یک محیط نامحدود در نظر می‌گیرند. از متداول‌ترین این روش‌ها روش عناصر مرزی^{۲۵} می‌باشد [۲۵].

¹⁸ Domain

¹⁹ Differential

²⁰ Finite elements

²¹ Finite difference

²² Distinct elements

²³ Boundary

²⁴ Integral

²⁵ Boundary elements

۴-۱- مقدمه

با توجه به مطالب گفته شده در فصل پیش درباره طبقه بندی مهندسی سنگ‌ها، با استفاده از جداول RMR و Q که در پیوست ۲ آمده‌اند، ابتدا امتیازدهی بر اساس این دو روش انجام شده و سپس سیستم نگهداری اولیه تونل در زون‌های مختلف آن پیش‌بینی شده است. نتایج حاصل برای زون‌های Z_1 ، Z_{1-2} ، Z_5 ، Z_{13} و Z_{13-2} در زیر آمده است. برای سایر زون‌ها نتایج در پیوست ۳ آمده است.

۴-۲- ناحیه ساختاری شماره ۱

این ناحیه خود شامل دو زیر ناحیه می‌باشد:

الف- زیر ناحیه ساختاری ۱ (زون Z_1): با توجه به نتایج بدست آمده در فصل دوم بر اساس سیستم RMR89 در این ناحیه ساختاری امتیازهای مربوط به هر پارامتر مطابق جدول شماره ۴-۱ می‌باشد.

همچنین برای طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ بر اساس Q در این ناحیه ساختاری طبق جدول شماره ۴-۲، امتیازهای زیر به دست آمد.

جدول ۴-۱- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z_1

امتیاز	ارزش	ردیف
۷-۱۲	۸۰ تا ۱۲۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۲۰	۹۰ تا ۱۰۰	مقدار RQD

۲۰	بیشتر از ۲ متر	فاصله بندی درزه‌ها
۰	بیشتر از ۱۰ میلی متر	شرایط ناپیوستگی
۱۰-۱۵	خشک تا نم	وضعیت آب
-۱۰	نامطلوب	جهت درزه‌ها
۴۷-۵۷	کلاس ۳ (سنگ متوسط)	جمع امتیاز توده‌سنگ
C=۲۳۵-۲۸۵ kPa		چسبندگی توده سنگ بر اساس RMR
φ= ۳۴-۲۹		زاویه اصطکاک توده سنگ بر اساس RMR

جدول ۲-۴- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z₁

R.Q.D=۹۰-۱۰۰	سنگ عالی	اندیس کیفی سنگ
J _n =۱۸	۳ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه‌ها
J _r =۲	موجدار - نرم	وضعیت سطوح درزه‌ها
J _a =۳	اندوهای سیلس یا رس ماسه ای	ماده پرکننده درزه‌ها
J _w =۰/۸-۱	خشک	مقدار آب بین درزه‌ها
SRF=۱	تنش متوسط تا کم	ضریب کاهش تنش
Q=۲/۶۶-۳/۷		سنگ ضعیف

ب- زیر ناحیه ساختاری ۲ (زون Z₁₋₂): برای طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ بر اساس سیستم RMR₈₉ در این ناحیه امتیازهای مربوط به هر پارامتر طبق جدول شماره ۳-۴ می‌باشد.

جدول ۳-۴- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z₁₋₂

امتیاز	ارزش	ردیف
۷	۸۰ تا ۱۰۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۲۰	۹۰ تا ۱۰۰	مقدار RQD
۱۵	بیشتر از ۲ متر	فاصله بندی درزه‌ها
۰	بیشتر از ۱۰ میلی متر	شرایط ناپیوستگی

۷	مرطوب	وضعیت آب
-۱۰	نامطلوب	جهت درزه‌ها
۳۹	کلاس ۴ (سنگ ضعیف)	جمع امتیاز توده‌سنگ
$C=۱۹۵ \text{ kPa}$	چسبندگی توده سنگ بر اساس RMR	
$\varphi=۲۵$	زاویه اصطکاک توده سنگ بر اساس RMR	

همچنین برای طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ بر اساس Q در این ناحیه ساختاری امتیازهای به دست آمده در جدول ۴-۴ آمده است.

جدول ۴-۴- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z₁₋₂

R.Q.D= ۹۰-۱۰۰	سنگ عالی	اندیس کیفی سنگ
J _n =۱۸	۳ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه‌ها
J _r =۲	موجدار - نرم	وضعیت سطوح درزه‌ها
J _a =۳	اندوهای سیلس یا رس ماسه ای	ماده پرکننده درزه‌ها
J _w =۰/۸	خشک	مقدار آب بین درزه‌ها
SRF=۱	تنش متوسط تا کم	ضریب کاهش تنش
$Q=۲/۶۶-۲/۹۶$		سنگ ضعیف

۴-۳- ناحیه ساختاری Z₅

با توجه به نتایج به دست آمده، برای طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (در فصل دوم) بر اساس سیستم RMR₈₉ و Q در محدوده ناحیه ساختاری ۵، امتیازهای مربوط به هر پارامتر مطابق جدول شماره ۴-۵ و ۴-۶ می‌باشد.

جدول ۴-۵- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z₅

امتیاز	ارزش	ردیف
۷-۱۲	۶۰ تا ۱۱۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۱۷	۹۰٪-۷۵٪	مقدار RQD

۱۵	۲ متر	فاصله بندی درزه‌ها
۰	بیشتر از ۱۰ میلی متر	شرایط ناپیوستگی
۴-۷	قطره قطره تا مرطوب	وضعیت آب
-۱۰	نامطلوب	جهت درزه‌ها
۳۳-۴۱	کلاس ۳-۴ (سنگ متوسط تا ضعیف)	جمع امتیاز توده‌سنگ

C=۱۶۵-۲۰۵ kPa	چسبندگی توده‌سنگ براساس RMR
$\phi=21-25$	زاویه اصطکاک توده‌سنگ براساس RMR

جدول ۴-۶- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z₅

R.Q.D=۷۵-۹۰	سنگ خوب	اندیس کیفی سنگ
J _n =۱۲	۳ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه‌ها
J _r =۳	زبر موج	وضعیت سطوح درزه‌ها
J _a =۵	زون ها یا نوار رس ماسه ای	ماده پرکننده درزه‌ها
J _w =۰/۷۳	جریان زیاد یا فشار بالای آب	مقدار آب بین درزه‌ها
SRF=۲/۵	نواحی رسی در عمق بیش از ۵۰ متر	ضریب کاهش تنش
Q=۱/۱-۱/۳		سنگ ضعیف

۴-۴- ناحیه ساختاری Z₇

با توجه به نتایج به دست آمده، برای طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ در فصل دوم بر اساس سیستم RMR₈₉ و Q در محدوده ناحیه ساختاری ۷، امتیازهای مربوط به هر پارامتر در جداول شماره ۴-۷ و ۴-۸ آمده است.

جدول ۴-۷- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z₇

امتیاز	ارزش	ردیف
۱۲	۱۰۰ تا ۱۵۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۲۰	%۹۰ - %۱۰۰	مقدار RQD
۲۰	۲ متر	فاصله بندی درزه‌ها
۱۵	۱ تا ۵ میلی متر	شرایط ناپیوستگی
۴-۷	مرطوب تا قطره قطره	وضعیت آب
-۵ - -۲	نسبتاً خوب - مطلوب	جهت درزه‌ها

۷۱-۷۷	کلاس ۲ (سنگ خوب)	جمع امتیاز توده سنگ
-------	--------------------	---------------------

$C=355-385 \text{ kPa}$	چسبندگی توده سنگ بر اساس RMR
$\phi=40-44$	زاویه اصطکاک توده سنگ بر اساس RMR

جدول ۴-۸- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z_7

R.Q.D=۹۰-۱۰۰	سنگ عالی	اندیس کیفی سنگ
$J_n=6$	۲ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه‌ها
$J_r=2$	نرم مواج	وضعیت سطوح درزه‌ها
$J_a=2$	زون‌ها یا نوار رس ماسه‌ای	ماده پرکننده درزه‌ها
$J_w=0/8$	فشار متوسط آب	مقدار آب بین درزه‌ها
SRF=۱	تنش متوسط	ضریب کاهش تنش
$Q=12-13/33$		سنگ خوب

۴-۵- ناحیه ساختاری شماره ۱۳

همانطور که در فصل دوم ذکر شد، ناحیه ساختاری ۱۳، خود شامل ۲ زیر ناحیه بوده و مشخصات عمومی درزه‌های این ناحیه تا حدودی مشابه ناحیه ۱۲ ساختاری می‌باشد [۲۹] ولی از نظر مقاومت تک محوری و RQD تفاوت‌هایی دارند:

الف- زیر ناحیه ساختاری ۱ (Z_{13}): برای طبقه‌بندی ژئومکانیکی سنگ بر اساس سیستم RMR89 در این ناحیه امتیازهای مربوط به هر پارامتر طبق جدول شماره ۴-۹ می‌باشد:

جدول ۴-۹- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z_{13}

امتیاز	ارزش	ردیف
۲	۵ تا ۲۵ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۸	۳۰٪-۵۰٪	مقدار RQD
۱۵	۰/۶ تا ۲ متر	فاصله‌بندی درزه‌ها
۱۰	سطوح جانبی صاف با پرشدگی کمتر از ۵ میلی‌متر	شرایط ناپوستگی
۰-۴	قطره قطره تا جریان ضعیف	وضعیت آب
-۵	نسبتاً خوب	جهت درزه‌ها

۳۰-۳۴	کلاس ۴ (سنگ ضعیف)	جمع امتیاز توده سنگ
-------	-------------------	---------------------

$C=150-170 \text{ kPa}$	چسبندگی توده سنگ بر اساس RMR
$\phi=20-22$	زاویه اصطکاک توده سنگ بر اساس RMR

برای طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ بر اساس سیستم Q در این ناحیه ساختاری طبق جدول شماره ۴-۱۰ امتیازهای زیر به دست آمد

جدول ۴-۱۰- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z_{13}

R.Q.D=۳۰-۵۰	سنگ ضعیف	اندیس کیفی سنگ
$J_n=18$	۳ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه ها
$J_r=3$	زبر موج	وضعیت سطوح درزه ها
$J_a=3$	اندکی از ذرات رس ماسه ای	ماده پرکننده درزه ها
$J_w=0/3$	* جریان زیاد	مقدار آب بین درزه ها
$SRF=7/5$	فشار آماسی ملایم	ضریب کاهش تنش
$Q=0/07-0/11$		سنگ خیلی ضعیف

* که به طور استثنائی بعد از عملیات آتشیاری پدید می آید و با گذشت زمان شدت آن در تونل کاهش می یابد .

ب- زیر ناحیه ساختاری ۲ (زون Z_{13-2}): برای طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ بر اساس سیستم RMR_{89} و Q در این ناحیه امتیازهای مربوط به هر پارامتر در جداول ۴-۱۱ و ۴-۱۲ ذکر شده است.

جدول ۴-۱۱- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z_{13-2}

امتیاز	ارزش	ردیف
۲	۵ تا ۲۵ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۳-۸	%۲۲- %۴۰	مقدار RQD
۱۰	۰/۶ تا ۲ متر	فاصله بندی درزه ها

۱۰	سطوح جانبی صاف با پرشدگی کمتر از ۵ میلی‌متر	شرایط ناپیوستگی
۰-۴	قطره قطره تا جریان ضعیف	وضعیت آب
-۵	نسبتاً خوب	جهت درزه‌ها
۲۰-۲۹	کلاس ۴ (سنگ ضعیف)	جمع امتیاز توده‌سنگ

$C=100-150 \text{ kPa}$	چسبندگی توده‌سنگ براساس RMR
$\phi=15-20$	زاویه اصطکاک توده‌سنگ براساس RMR

جدول ۴-۱۲- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z₁₃₋₂

R.Q.D= ۲۲-۴۰	سنگ خیلی ضعیف تا ضعیف	اندیس کیفی سنگ
J _n =۱۸	۳ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه‌ها
J _r =۳	زبر موج	وضعیت سطوح درزه‌ها
J _a =۳	اندودی از ذرات رس ماسه‌ای	ماده پرکننده درزه‌ها
J _w =۰/۳	جریان زیاد	مقدار آب بین درزه‌ها
SRF=۷/۵	فشار آماسی ملایم	ضریب کاهش تنش
$Q=0/05-0/09$		سنگ فوق العاده ضعیف تا خیلی ضعیف

۴-۶- برآورد سیستم نگهداری اولیه تونل

بر اساس جدول رده‌بندی RMR و Q می‌توان سیستم نگهداری اولیه برای تونل را پیش‌بینی کرد. نتایج به دست آمده برای پیش‌بینی سیستم نگهداری اولیه تونل گردنه رخ به روش RMR و Q به ترتیب در جداول ۴-۱۳ و ۴-۱۴ آمده است. نتایج کلی درباره امتیازدهی RMR و Q، مشخصات لیتولوژیکی مسیر تونل و پیش‌بینی سیستم نگهداری در ۱۵ زون موجود در مسیر تونل به در روش مذکور در جدول ۴-۱۵ آمده است.

جدول ۴-۱۳- پیش‌بینی سیستم نگهداری اولیه تونل به روش RMR

سیستم نگهداری							RMR	زون
قاب فلزی		پیچ‌سنگ			شاتکریت			
قطر (cm)	فاصله (m)	قطر (mm)	فاصله (m)	طول (m)	دیواره (mm)	سقف (mm)		
-	-	۲۰	۱/۵	۴	۳۰	۸۰	۵۲	Z ₁
۲۰	۱/۵	۲۰	۱/۵	۴/۵	۱۰۰	۱۱۰	۳۹	Z ₁₋₂
-	-	۲۰	۱/۵	۴	۳۰	۸۰	۵۲	Z ₂
۲۰	۱/۵	۲۰	۱/۵	۴	۳۰	۱۰۰	۴۲	Z ₃
۲۰	۱/۵	۲۰	۱/۷	۴	۳۰	۸۰	۴۵	Z ₄
۲۰	۱/۵	۲۰	۱/۵	۴/۵	۱۰۰	۱۲۰	۳۷	Z ₅
-	-	۲۰	۱/۵	۴	۳۰	۸۰	۴۱	Z ₆
-	-	۲۰	۲/۵	۳	-	۵۰	۷۴	Z ₇
-	-	۲۰	۲/۵	۲/۵	-	۵۰	۷۱	Z ₈
-	-	۲۰	۲	۳/۵	۳۰	۵۰	۶۳	Z ₉
-	-	۲۰	۲	۳/۵	۳۰	۵۰	۶۳	Z ₁₀
۲۰	۱/۵	۲۰	۱/۵	۴/۵	۱۰۰	۱۲۰	۳۸	Z ₁₁
۲۰	۱/۵	۲۰	۱/۷	۴	۳۰	۸۰	۴۵	Z ₁₂

۲۰	۱/۵-۱	۲۰	۱/۳	۵	۱۰۰	۱۲۰	۳۲	Z ₁₃
۲۰	۱/۵-۰/۶	۲۵	۱	۵	۱۰۰	۱۵۰	۲۵	Z ₁₃₋₂

جدول ۴-۱۴- پیش‌بینی سیستم نگهداری اولیه تونل به روش Q

سیستم نگهداری			Q	زون
پیچ‌سنگ		شاتکریت (mm)		
طول	فاصله			
۴	۱/۸	۷۰	۲/۶۶-۳/۱۷	Z ₁
۳/۵	۲	۶۰	۲/۶۶-۲/۹۶	Z ₁₋₂
۳/۵	۲/۲	۵۰	۶/۷۵-۷/۱۵	Z ₂
۴	۱/۸	۷۰	۲/۷۵-۳/۳	Z ₃
۴	۱/۸	۷۰	۶-۷/۳	Z ₄
۳/۵	۱/۷	۱۰۰	۱/۱-۱/۳	Z ₅
۳/۵	۲/۲	۵۰	۳/۳۳-۴	Z ₆
۳/۵	۲/۳	۴۰	۱۲-۱۳/۳۳	Z ₇
۳/۵	۲	۶۰	۴/۳-۵/۱۴	Z ₈
۳/۵	۲/۲	۴۵	۹/۱۴-۱۰/۱۸۶	Z ₉
۴	۲	۶۰	۳/۱۳-۳/۷۱	Z ₁₀
۴/۵	۱/۴	۱۴۰	۰/۸۳-۰/۸۸	Z ₁₁
۴	۱/۸	۹۰	۱/۱-۱/۳۲	Z ₁₂
۴/۵	۱/۳	۱۶۰	۰/۰۷-۰/۱۱	Z ₁₃
۴/۵	۱/۲	۱۷۰	۰/۰۵-۰/۰۹	Z ₁₃₋₂

۵-۱- مقدمه

در این فصل پس از مشخص شدن شرایط محیط پیوسته برای توده‌سنگ‌های مسیر تونل، بر اساس یک‌سری فرضیات و مطالعات، منحنی مشخصه زمین و منحنی مشخصه سیستم نگهداری در دستگاه فشار سیستم نگهداری - تغییر شکل شعاعی سنگ‌های اطراف تونل (که در فصل سوم توضیح داده شد)، رسم شده‌است. نقطه تلاقی منحنی مشخصه سیستم نگهداری و منحنی مشخصه زمین، نقطه عملکردی است که بیان می‌کند به ازای چه مقدار تحمل بار سیستم نگهداری، تغییر شکل شعاعی سنگ‌های اطراف تونل چقدر می‌باشد. بنابراین با تحلیل چند نوع سیستم نگهداری می‌توان برآوردی از طرح نگهداری اولیه تونل انجام داد.

۵-۲- طراحی سیستم نگهداری تونل با استفاده از تحلیل اندرکنش سنگ - حائل

در جدول ۵-۱ اطلاعات مورد نیاز برای رسم نمودار و مقادیر آن آورده شده است.

با توجه به پارامترهای مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، مقاومت فشاری تک محوره، فشار اولیه، شعاع تونل، m و s که در جدول ۱-۵ آمده است، و با استفاده از روابط ذکر شده در فصل سوم و به کمک نرم افزار EXCEL نمودارهای پیش بینی سیستم نگهداری تونل برای زون های مختلف رسم شده است، که برای زون های $Z_1, Z_{1-2}, Z_5, Z_7, Z_{13}$ و Z_{13-2} در ذیل آمده و برای سایر زون ها در پیوست ۴ آمده است. m و s پارامترهای توده سنگ در حالت غیر آشفته هستند که از قرار دادن $D=0$ در رابطه $m = M_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$ و $S = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$ به دست می آیند. برای محاسبه m_r و s_r در روابط بالا مقدار D برابر با یک خواهد بود (حالت آشفته).

۵-۲-۱- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z_1

در مورد زون Z_1 نمودار تغییر شکل تونل در برابر نسبت فشار نگهداری به فشار اولیه در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. برای رسم نمودارهای سقف، کف و دیواره تونل از معادلات ۳-۵ تا ۳-۳۱ استفاده شده و میزان تغییر شکل های ایجاد شده، برای مقادیر مختلف فشار نگهداری (P_i) محاسبه شد و نتایج آن در جدول ۲-۵ درج شده است.

جدول ۱-۵- اطلاعات مربوط به توده سنگ تونل گردنه رخ برای رسم منحنی اندرکنش سنگ - حائل

r_i (m)	P_0 (MPa)	s_r	m_r	ν	E (GPa)	m	s	σ_c (MPa)	زون
6.5	0.27	1.40E-04	2.27E-01	0.3	6.12	1.5064	2.77E-03	95	Z_1
6.5	0.41	1.67E-05	8.96E-02	0.3	2.91	0.9469	6.50E-04	95	Z_{1-2}
6.5	0.81	1.40E-04	2.27E-01	0.3	6.12	1.5064	2.77E-03	95	Z_2
6.5	1.35	2.75E-05	1.11E-01	0.3	3.23	1.054	9.10E-04	82.5	Z_3
6.5	2.16	4.54E-05	1.38E-01	0.3	3.84	1.173	1.27E-03	82.5	Z_4
6.5	3.11	1.19E-05	6.99E-02	0.3	2.42	0.7935	5.20E-04	82.5	Z_5
6.5	3.67	2.33E-05	9.31E-02	0.3	3.4	0.9153	8.10E-04	95	Z_6
6.5	4.05	5.70E-04	1.09E+00	0.28	21.71	3.305	3.19E-02	95	Z_7
6.5	4.05	3.50E-04	8.82E-01	0.3	17.14	2.969	2.29E-02	82.5	Z_8
6.5	4.05	7.70E-04	4.64E-01	0.29	11.14	2.153	8.41E-03	87.5	Z_9
6.5	3.78	9.10E-04	4.98E-01	0.28	10.93	2.231	9.40E-03	85	Z_{10}
6.5	2.16	1.19E-05	6.99E-02	0.28	2.48	0.7935	5.20E-04	77.5	Z_{11}
6.5	1.35	1.19E-05	6.22E-02	0.27	3.88	0.7053	5.20E-04	85	Z_{12}
6.5	1.22	5.20E-06	4.35E-02	0.27	1.26	0.5899	3.00E-04	40	Z_{13}

6.5	1.03	1.62E-06	2.64E-02	0.27	0.75	0.4595	1.40E-04	31	Z ₁₃₋₂
-----	------	----------	----------	------	------	--------	----------	----	-------------------

جدول ۵-۲- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z₁

P _i (MPa)	M	D	N	R _e	R	e _{av}	A	U _i (mm)
0.27	0.0093	-0.953	0	4.43	0.73	0	0	0
0.17	0.0093	-0.953	0	4.76	0.59	0	0	0.138
0.16	0.0093	-0.953	0	4.80	0.58	0	0	0.152
0.15	0.0093	-0.953	0	4.84	0.56	0	0	0.166
0.14	0.0093	-0.953	0	4.88	0.55	0	0	0.179
0.13	0.0093	-0.953	0	4.93	0.53	0	0	0.193
0.12	0.0093	-0.953	0	4.97	0.51	0	0	0.207
0.11	0.0093	-0.953	0	5.02	0.49	0	0	0.251
0.10	0.0093	-0.953	0	5.07	0.47	0	0	0.235
0.09	0.0093	-0.953	0	5.12	0.45	0	0	0.249
0	0.0093	-0.953	0	5.84	0.20	0	0	0.337

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

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

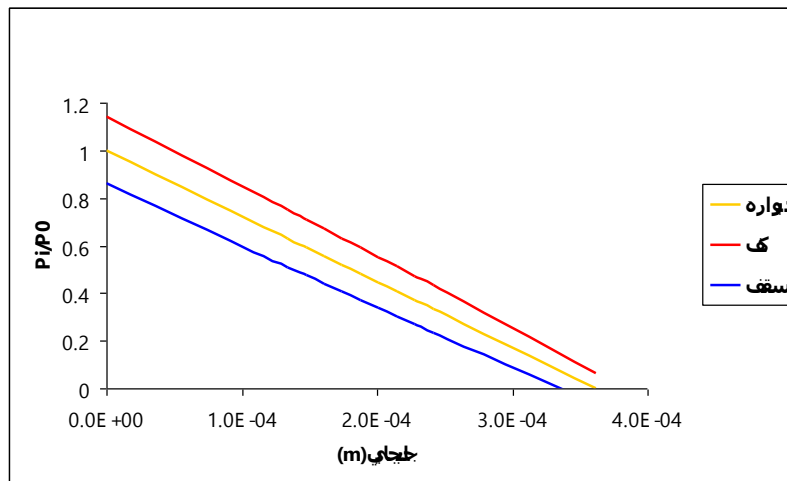
ب- برای دیواره‌های تونل U_i بر حسب $\frac{P_i}{P_0}$ رسم شده است.

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

همانطور که از شکل ۵-۱ و جدول ۵-۲ مشخص است، تغییر شکل‌های تونل در زون Z₁ در محدوده

الاستیک بوده و میزان جابجایی نهایی تونل حدود ۰/۳۶ میلی‌متر خواهد بود؛ بنابراین تونل در این زون پایدار

بوده و نیازی به سیستم نگهداری نخواهد داشت.



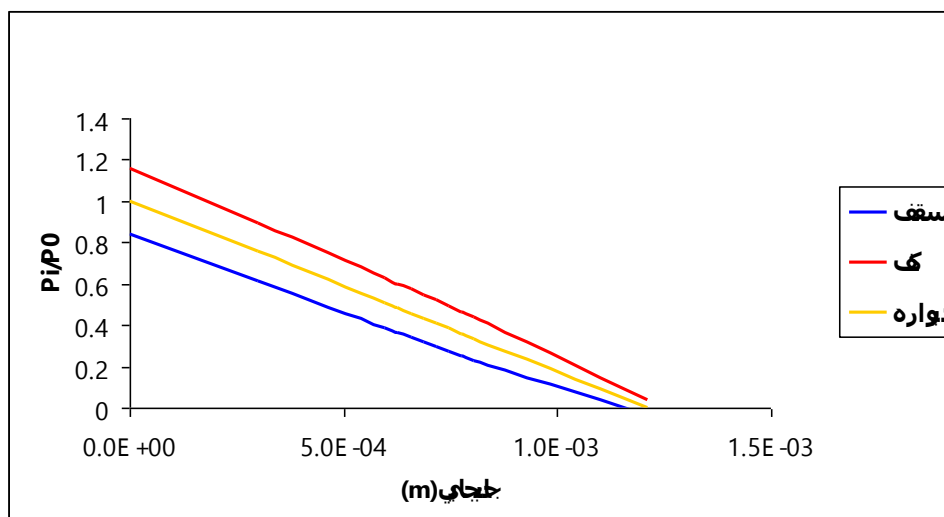
شکل ۵-۱- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_1

۵-۲-۲- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z_{1-2}

در مورد زون Z_{1-2} ، نمودار تغییر شکل تونل در برابر نسبت فشار نگهداری به فشار اولیه در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. برای رسم نمودارهای سقف، کف و دیواره تونل از معادلات ۳-۵ تا ۳-۳۱ (فصل سوم) استفاده شده و میزان تغییر شکل‌های ایجاد شده برای مقادیر مختلف فشار نگهداری (P_i) محاسبه و نتایج آن در جدول ۵-۳ آورده شده است.

جدول ۵-۳- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_{1-2}

P_i (MPa)	M	D	N	R_e	R	e_{av}	A	U_i (mm)
0.405	0.0051	-0.959	0	4.11	0.88	0	0	0
0.305	0.0051	-0.959	0	4.36	0.77	0	0	0.299
0.205	0.0051	-0.959	0	4.67	0.64	0	0	0.597
0.195	0.0051	-0.959	0	4.70	0.62	0	0	0.637
0.185	0.0051	-0.959	0	4.74	0.61	0	0	0.657
0.175	0.0051	-0.959	0	4.78	0.59	0	0	0.687
0.165	0.0051	-0.959	0	4.81	0.58	0	0	0.717
0.155	0.0051	-0.959	0	4.86	0.56	0	0	0.746
0.145	0.0051	-0.959	0	4.90	0.54	0	0	0.776
0.135	0.0051	-0.959	0	4.94	0.53	0	0	0.806
0	0.0051	-0.959	0	5.93	0.17	0	0	1.21



شکل ۵-۲- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z1-2

همانطور که از شکل ۵-۲ و جدول ۵-۳ مشخص است، تغییر شکل‌های تونل در زون Z1-2 در محدوده الاستیک بوده و میزان جابجایی نهایی تونل حدود ۱/۲ میلی‌متر خواهد بود؛ بنابراین تونل در این زون پایدار بوده و نیازی به سیستم نگهداری نخواهد داشت.

۵-۲-۳- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z5

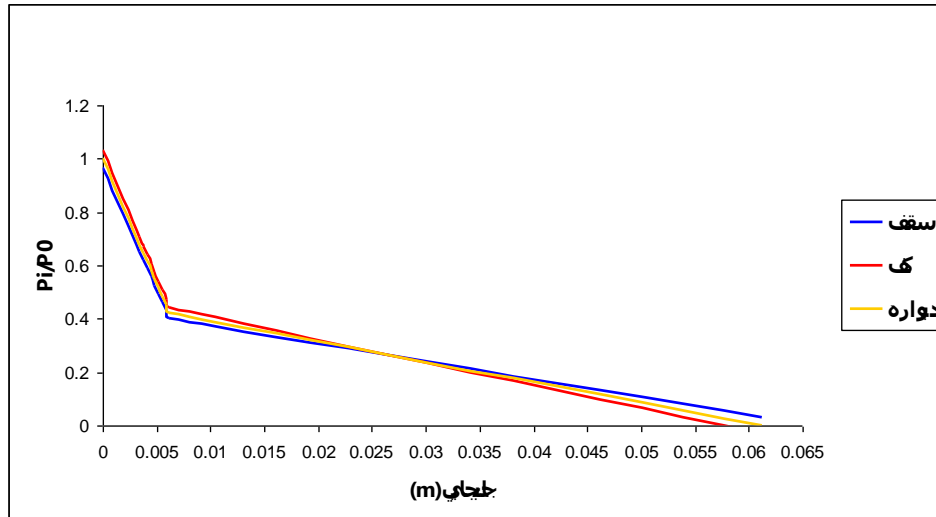
روند ذکر شده در بالا در مورد زون Z5 نیز اجرا شد که محاسبات انجام شده در جدول ۵-۴ آمده است. سپس بر طبق دستورالعمل ذکر شده در بالا نمودار تغییر شکل برای قسمت‌های مختلف تونل رسم شده که در شکل ۵-۳ آورده شده است.

همانطور که در شکل ۵-۳ مشاهده می‌کنید، تونل در این زون در صورت نصب نکردن سیستم نگهداری وارد حالت پلاستیک شده که مطابق شکل ۵-۳ ریزش سقف و جابجایی‌های بزرگی در کف و دیواره‌ها مشاهده خواهد شد. بنابراین استفاده از سیستم نگهداری برای این زون امری بدیهی به نظر می‌رسد.

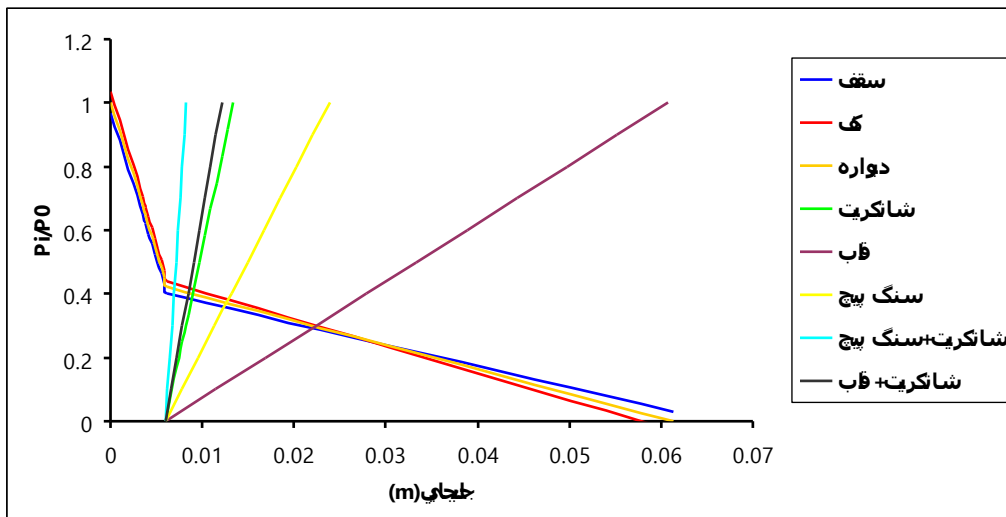
برای رسیدن به یک سیستم نگهداری مناسب، سیستم‌های مختلفی (شاتکریت، پیچ‌سنگ، قاب فلزی، و یا ترکیبی از آنها) امتحان شد که نمودار مربوط به اندرکنش آنها و تونل در شکل ۵-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۵- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_5

P_i (MPa)	M	D	N	R_e	R	e_{av}	A	U_i (mm)
3.11	0.0321	-0.756	0	1.53	2.19	0	0	0
2.11	0.0321	-0.756	0	1.97	1.81	0	0	3.45
2.01	0.0321	-0.756	0	2.02	1.76	0	0	3.79
1.91	0.0321	-0.756	0	2.08	1.72	0	0	4.14
1.81	0.0321	-0.756	0	2.15	1.67	0	0	4.48
1.71	0.0321	-0.756	0	2.21	1.63	0	0	4.83
1.61	0.0321	-0.756	0	2.29	1.58	0	0	5.17
1.51	0.0321	-0.756	0	2.36	1.53	0	0	5.52
1.41	0.0321	-0.756	0	2.44	1.48	0	0	5.86
1.31	0.0321	-0.756	0	2.53	1.43	0	0	6.21
0	0.0321	-0.756	0.518	9.88	-0.634	-8.8E-03	0.0027	58.0



شکل ۳-۵- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_5



شکل ۵-۴- نمودار اندرکنش تونل و سیستم‌های نگهداری مورد نظر برای زون Z5

سیستم‌های نگهداری زیر برای نصب در این شرایط کنترل شدند:

الف- شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر

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

ج- ترکیبی حالت الف و ب

د- قاب‌های فولادی به فاصله ۱ متر از هم.

مشخصات شاتکریت، پیچ سنگ و قاب‌های فولادی مورد استفاده در جدول ۵-۵ آمده است.

جدول ۵-۵- مشخصات فیزیکی سیستم‌های نگهداری مورد استفاده

قاب فولادی	پیچ سنگ	شاتکریت
مدول یانگ فولاد 207000 (MPa)	طول آزاد 4 (m)	مدول الاستیسیته 2e10 (Pa)
مقاومت تسلیم فولاد 245 (MPa)	قطر 25 (mm)	ضریب پواسون 0.30
	مدول یانگ 207000 (MPa)	مقاومت فشاری 266 (Pa)
	مقاومت نهایی 200 KN	
	5e-8 (m/N)	Q

شکل ۴-۵ نمودار اندرکنش تونل و سه سیستم نگهداری پیشنهاد شده در بالا را نشان می‌دهد. 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 فصل سوم 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 ۵-۵ آمده است. همانطور که از شکل ۴-۵ پیداست، 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.

سیستم ترکیبی شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر و پیچ‌سنگ به فاصله‌داری ۱/۵ متر از هم نیز در شکل ۵-۵ نشان داده شده است. به علت پایین بودن سختی بولت‌های غیر تزریقی نسبت به شاتکریت، سختی معادل آنها اختلاف چندانی با سختی شاتکریت به تنهایی ندارد.

به دلایل فنی و به دلیل خردشدگی زیاد زون Z_5 و چون به سیستم نگهداری نیاز خواهیم داشت که خیلی سریع از تغییر شکل‌ها جلوگیری کند، و به دلیل این که در آنالیزها مقاومت فشاری ۲۸ روزه شاتکریت را منظور کردیم، بنابراین به دلیل این که شاتکریت و یا بولت‌های تزریقی برای رسیدن به مقاومت نهایی خود به زمان نیاز دارند، لذا 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 کنند. قاب‌های فولادی که به این منظور پیشنهاد می‌شوند، قاب فولادی 10I35 با فاصله‌داری ۱ متر خواهد بود.

۵-۲-۴- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z_7

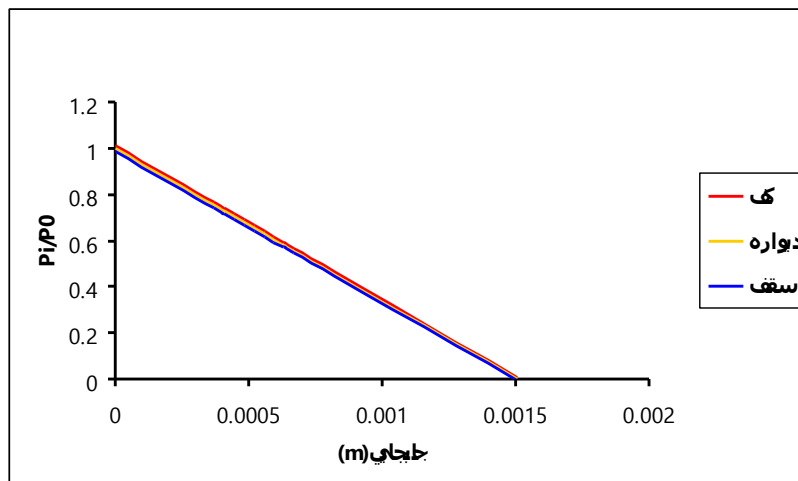
روند ذکر شده در بالا در مورد زون Z_7 نیز اجرا شد که محاسبات انجام شده در جدول ۵-۶ آمده است. سپس بر طبق دستورالعمل ذکر شده در بالا نمودار تغییر شکل برای قسمت‌های مختلف تونل رسم شده که در شکل ۵-۵ آورده شده است.

نمودار تغییر شکل تونل در برابر نسبت فشار نگهداری به فشار اولیه برای زون Z_7 در شکل ۵-۵ نشان داده شده است. برای رسم نمودارهای سقف، کف و دیواره تونل با استفاده از معادلات ۳-۵ تا ۳-۳ و انجام محاسبات مربوط جدول در ۵-۶، میزان تغییر شکل‌های ایجاد شده برای مقادیر مختلف فشار نگهداری (P_i) محاسبه شد.

جدول ۵-۶- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_7

P_i (MPa)	M	D	N	R_e	R	e_{av}	A	U_i (mm)
4.05	0.0401	-0.911	0	6.55	0.68	0	0	0
3.05	0.0401	-0.911	0	6.83	0.60	0	0	0.543
2.95	0.0401	-0.911	0	6.86	0.59	0	0	0.597
2.85	0.0401	-0.911	0	6.90	0.58	0	0	0.652
2.75	0.0401	-0.911	0	6.93	0.58	0	0	0.706
2.65	0.0401	-0.911	0	6.96	0.58	0	0	0.760
2.55	0.0401	-0.911	0	6.99	0.56	0	0	0.815
2.45	0.0401	-0.911	0	7.03	0.55	0	0	0.869
2.35	0.0401	-0.911	0	7.06	0.54	0	0	0.923
2.25	0.0401	-0.911	0	7.10	0.53	0	0	0.978
0	0.0401	-0.911	0	8.27	0.25	0	0	2.20

همانطور که از شکل ۵-۵ و جدول ۵-۶ مشخص است، تغییر شکل‌های تونل در زون Z_7 در محدوده الاستیک بوده و میزان جابجایی نهایی تونل حدود ۱/۵ میلی‌متر خواهد بود؛ بنابراین تونل در این زون پایدار بوده و نیازی به سیستم نگهداری نخواهد داشت.



شکل ۵-۵- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z7

۵-۲-۵- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z13

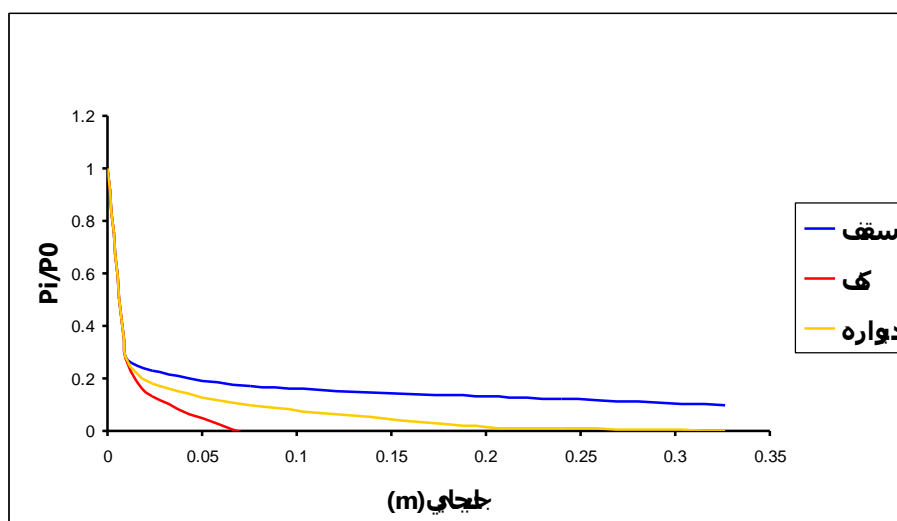
همانطور که در شکل ۵-۶ مشاهده می‌کنید، تونل در این زون در صورت نصب نکردن سیستم نگهداری وارد حالت پلاستیک شده که مطابق شکل مذکور ریزش سقف و جابجایی‌های بزرگی در کف و دیواره‌ها مشاهده خواهد شد. بنابراین استفاده از سیستم نگهداری برای این زون امری بدیهی به نظر می‌رسد.

برای رسیدن به یک سیستم نگهداری مناسب سیستم‌های مختلفی امتحان شد که نمودار مربوط به اندرکنش آنها و تونل در شکل ۵-۷ نشان داده شده است.

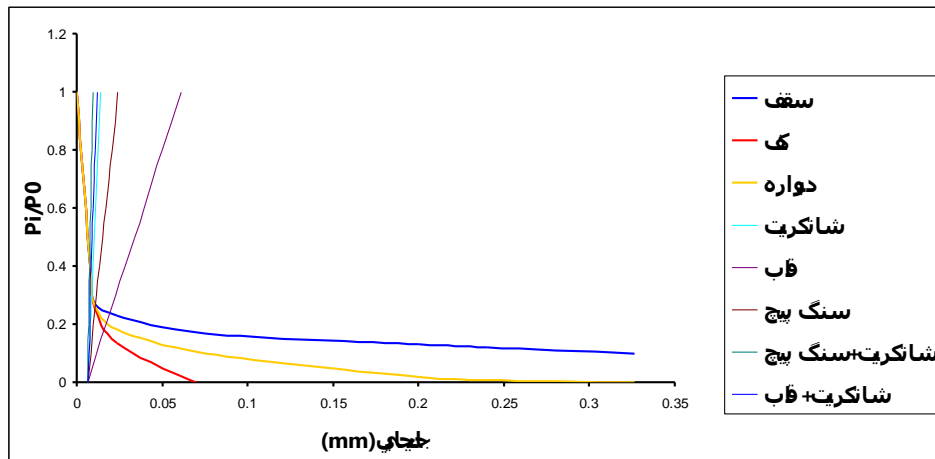
روند ذکر شده در بالا در مورد زون Z13 نیز اجرا شد که محاسبات انجام شده در جدول ۵-۷ آمده است. سپس بر طبق دستورالعمل ذکر شده در بالا، نمودار تغییر شکل برای قسمت‌های مختلف تونل رسم شده که در شکل ۵-۷ آورده شده است.

جدول ۵-۷- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_{13}

P_i (MPa)	M	D	N	R_e	R	e_{av}	A	U_i (mm)
1.22	0.0586	-0.557	0	0.42	3.05	0	0	0
1.12	0.0586	-0.557	0	0.47	2.92	0	0	1.06
1.02	0.0586	-0.557	0	0.53	2.79	0	0	2.12
0.92	0.0586	-0.557	0	0.60	2.65	0	0	3.18
0.82	0.0586	-0.557	0	0.68	2.50	0	0	4.23
0.72	0.0586	-0.557	0	0.79	2.34	0	0	5.29
0.62	0.0586	-0.557	0	0.92	2.18	0	0	6.35
0.52	0.0586	-0.557	0	1.09	1.99	0	0	7.41
0.52	0.0586	-0.557	0	1.30	1.79	0	0	8.47
0.42	0.0586	-0.557	1.45	6.80	-0.05	-1.76E-03	5.06E-03	10.7
0	0.0586	-0.557	1.45	25.0	-0.61	-4.86E-03	1.14E-01	32.6



شکل ۵-۶- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_{13}



شکل ۵-۷- نمودار اندرکنش تونل و سیستم‌های نگهداری مورد نظر برای زون Z13

سیستم‌های نگهداری زیر برای نصب در این شرایط کنترل شدند:

الف- شانکریت به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر

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

ج- ترکیبی حالت الف و ب

د- قاب‌های فولادی به فاصله ۱ متر از هم.

در این زون هم به دلایل ذکر شده در بالا استفاده از قاب فولادی محتمل خواهد بود.

۵-۲-۶- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z13-2

همانطور که در شکل ۵-۸ مشاهده می‌کنید، تونل در این زون در صورت نصب نکردن سیستم نگهداری وارد حالت پلاستیک شده که مطابق شکل ۵-۸ ریزش سقف و جابجایی‌های بزرگی در کف و 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 شکل ۵-۹ نشان داده شده است.

روند ذکر شده در بالا در مورد زون Z_{13-2} نیز اجرا شد که محاسبات انجام شده در جدول ۵-۸ آمده است. سپس بر طبق دستورالعمل ذکر شده در بالا نمودار تغییر شکل برای قسمت‌های مختلف تونل رسم شده که در شکل ۵-۹ آورده شده است.

سیستم‌های نگهداری زیر برای نصب در این شرایط کنترل شدند:

الف- شاکریت به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر

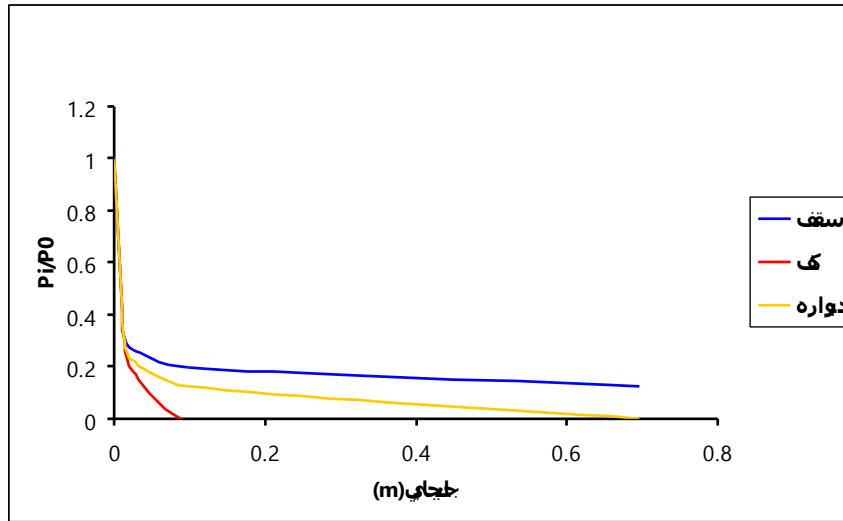
ب- پیچ‌سنگ‌های ۵ متری با آرایش مربعی به طول ۱ متر

ج- ترکیبی حالت الف و ب

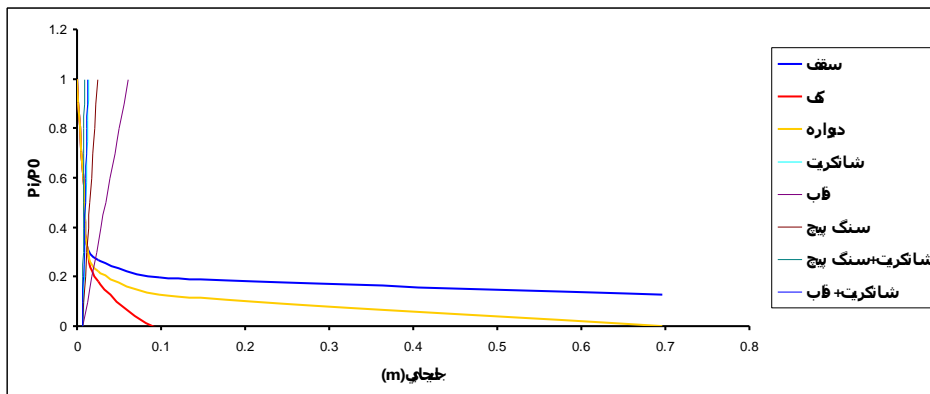
د- قاب‌های فولادی به فاصله ۱ متر از هم.

جدول ۵-۸- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_{13-2}

P_i (MPa)	M	D	N	R_e	R	e_{av}	A	U_i (mm)
1.03	0.048	-0.54	0	0.258	3.50	0	0	0
0.93	0.048	-0.54	0	0.303	3.33	0	0	1.68
0.83	0.048	-0.54	0	0.358	3.14	0	0	3.37
0.73	0.048	-0.54	0	0.429	2.95	0	0	5.05
0.63	0.048	-0.54	0	0.520	2.74	0	0	6.74
0.53	0.048	-0.54	0	0.641	2.51	0	0	8.42
0.43	0.048	-0.54	0	0.807	2.26	0	0	10.1
0.33	0.048	-0.54	0	1.04	1.98	0	0	11.8
0.23	0.048	-0.54	1.75	8.13	-0.24	-3.35E-03	0.0111	25.1
0.13	0.048	-0.54	1.75	11.9	-0.59	-7.97E-03	0.0391	98.0
0	0.048	-0.54	1.75	34.0	-0.59	-5.78E-03	0.262	696



شکل ۵-۸- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z13-2



شکل ۵-۹- نمودار اندرکنش تونل و سیستم‌های نگهداری مورد نظر برای زون Z13-2

با توجه به نمودارها و دلایل ذکر شده در این زون نیز استفاده از قاب فولادی مناسب به نظر

می‌رسد.

۵-۳- نتیجه‌گیری

با استفاده از مطالب گفته شده در این فصل و همچنین روابط ذکر شده در فصل سوم، میزان جابجایی‌های سقف، دیواره و کف تونل در زون‌های مختلف بررسی شد و سپس به کمک روش سعی و خطا سیستم‌های نگهداری مختلفی امتحان شد. در زون‌های Z_5 ، Z_{13} و Z_{13-2} استفاده از قاب‌های فولادی 10I35 توصیه می‌شود. در سایر مقاطع مشکل خاصی در پایداری نخواهیم داشت، ضمن آن که شاتکریت و پیچ‌سنگ در این مقاطع بسته به شرایط انتخاب می‌شود.

در این فصل پس از بررسی کلیاتی در مورد نرم‌افزار UDEC (Universal Distinct Element Code) طراحی سیستم نگهداری موقت برای زون‌های مختلف تونل انجام شده است.

۶-۲- نرم‌افزار UDEC

نرم‌افزار به کار رفته برای تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل گردنه رخ UDEC می‌باشد. نرم‌افزار UDEC [۴۱] یک برنامه تحلیل دو بعدی است که بر مبنای روش المان‌های مجزا برای تحلیل مکانیک سنگی محیط‌های ناپیوسته تهیه شده است. این نرم‌افزار واکنش یک محیط ناپیوسته (به عنوان مثال: سنگ تکتونیزه و به شدت درزه‌دار) را در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی می‌کند. نرم‌افزار مذکور محیط سنگی را به عنوان مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا تعریف می‌کند که ناپیوستگی‌ها (مثل درزه‌ها) به عنوان شرایط مرزی بین بلوکی در آنها عمل می‌کنند و جابجایی برشی در امتداد این ناپیوستگی‌ها و نیز چرخش بلوک‌ها می‌تواند انجام گیرد. در این نرم‌افزار امکان تعریف بلوک‌ها به صورت صلب و تغییر شکل پذیر وجود دارد. بلوک‌های تغییر شکل پذیر به شبکه‌ای از المان‌های با تفاوت محدود تقسیم‌بندی شده و هر المان با رفتار تنش- کرنش خطی یا غیر خطی از پیش تعیین شده‌ای عمل می‌کند [۴۱].

UDEc با سرعت محاسبه بالا برای مدل‌هایی با چند هزار بلوک طراحی شده است و حل مسائل در آن با پیشرفت در پله‌های زمانی صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه UDEc با پیش رفتن به صورت پله‌های زمانی معادلات تعادل نیرو و گشتاور را حل می‌کند در هر مرحله قبل از شروع مرحله بعدی نیروهای نامتعادل وارد بر سازه را محاسبه کرده و حل مسئله را با اعمال این نیروها ادامه می‌دهد. وجود این قابلیت در نرم‌افزار امکان بررسی مسئله را در فازهای زمانی مختلف امکان پذیر می‌سازد و می‌توان مراحل مختلف اجرای یک طرح را شبیه‌سازی کرد [۴۱].

شرایط ساختاری و زمین شناسی منطقه در تطابق آن با اصول کلی اجزا مجزا و مسائل و مشکلات ناپایداری موجود در منطقه دلایل اصلی انتخاب این نرم‌افزار می‌باشد.

نکته قابل ذکر در استفاده از این نرم‌افزار، تأثیر پذیری زیاد آن از پارامترها و اطلاعات ورودی است. به همین دلیل در انتخاب و بعضاً تخمین پارامترهای ورودی دقت و توجه بسیار لازم است.

۶-۳- مراحل کلی مدل سازی در UDEC

در خصوص کار با این نرم افزار، ترتیب مراحل مدل سازی به شرح زیر انجام می شود:

- انتخاب محدوده مناسبی از توده سنگ یا خاک و ایجاد هندسه مدل

- انتخاب مدل رفتاری مناسب و تعیین پارامترهای آن

- اعمال شرایط مرزی و تنش های اولیه

- حل مدل

۶-۳-۱- هندسه مدل

در این قسمت ابعاد مدل به همراه لایه بندی و سیستم ناپیوستگی به منظور ایجاد مدل دارای بلوک های مشخص تعریف می شود.

در این طرح مدل ها دارای ابعاد $95m \times 70m$ ($x \times y$) می باشند (۳ برابر قطر تونل در طرفین و $2/5$ برابر قطر تونل در کف و سقف). برای اعمال دسته درزه ها از جداول فصل سوم و برای شبکه بندی اجزا تفاضل محدود از المان های مثلثی استفاده شده است.

۶-۳-۲- مدل رفتاری و نسبت دادن خواص

انتخاب مدل رفتاری به جنس سنگ و وضعیت تنش در منطقه بستگی دارد.

مدل رفتاری که برای توده سنگ در نظر گرفته شده است، مدل الاستو - پلاستیک با تئوری شکست موهر - کلمب می باشد. این مدل رفتار سنگ در بخش الاستیک را نفی نمی کند بلکه در حالتی که رفتار آنها از حالت الاستیک خارج شود و به منطقه پلاستیک برسد، این بخش را شامل می گردد. در این مدل نیاز به دانستن پارامترهایی نظیر پارامترهای زیر می باشد:

$\rho =$ وزن مخصوص

E = مدول الاستیسیته سنگ

U = نسبت پواسون

c = مقاومت چسبندگی

ϕ = زاویه اصطکاک داخلی

σ_c = مقاومت فشاری تک محوره

t = مقاومت کششی

برای تعیین مدول الاستیک توده سنگ E_m روابط بسیاری از جانب محققین ارائه شده است (این روابط در پیوست ۲ آمده است). مقادیر سایر پارامترها در جدول ۴-۱۵ (فصل چهارم) آمده است.

توجه شود که برای به دست آوردن E از روابط زیر استفاده شده است [۴۴]:

برای مقاطعی که $\sigma_c \leq 100 \text{MPa}$

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI - 10}{40}\right)} \quad (1-6)$$

که در آن D فاکتور آتشیاری و σ_c مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ می باشد.

همچنین برای به دست آوردن c ، t و ϕ از نرم افزار RocLab استفاده شده است.

برای مقاطعی که $\sigma_c > 100 \text{MPa}$

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\left(\frac{GSI - 10}{40}\right)} \quad (2-6)$$

۴-۶- بررسی نتایج آنالیز

بررسی مقاطع مختلف ورودی، میانی و خروجی تونل به وسیله نرم افزار UDEC و با استفاده از روش

المان‌های مجزا به این علت انجام پذیرفت که وضعیت تنش‌های وارده در محیط اطراف تونل در اثر حفاری

تونل و ایجاد یک آشفتگی در محیط پیوسته مورد بررسی قرار گیرد و مقادیر تنش‌های نرمال و مماسی و همچنین تنش‌های اصلی در تاج و دیواره‌های تونل را به دست آوریم. در مدل‌سازی تونل رخ همه مقاطع در نظر گرفته شده است، در حالی که مقطعی که با توجه به Q و RMR به نظر می‌آید که تونل با مسائلی مواجه شود، کافی به نظر می‌رسید. به هر حال بررسی وضعیت جابجایی‌های اطراف تونل و تنش متوسط در تاج، کف و دیواره‌های تونل در زون‌های Z_1 ، Z_{1-2} ، Z_5 ، Z_7 ، Z_{13} و Z_{13-2} در متن پیش رو آمده است و در مورد سایر زون‌های نتایج حاصل از آنالیز عددی در پیوست ۵ آورده شده است.

دهانه ورودی تونل، زون Z_{1-2} ، دهانه خروجی تونل، زون Z_{13} که جنس سنگ خیلی ضعیف است، ناحیه ساختاری Z_5 (۲۱۰ متری از ورودی تونل) و ناحیه ساختاری Z_7 (۳۲۰ متری از ورودی تونل) که دهانه مقطع تونل در این قسمت به دلیل وجود پارکینگ، ۳ متر بیشتر است (۱۶ متر)، نقاط حساس این تونل به حساب می‌آیند.

داده‌های ورودی به نرم‌افزار برای زون‌های ذکر شده به صورت برنامه نوشته شده در Notepad می‌باشد. برای مشخصات ژئومکانیکی مقاطع مختلف از جداول فصل چهارم استفاده شده است.

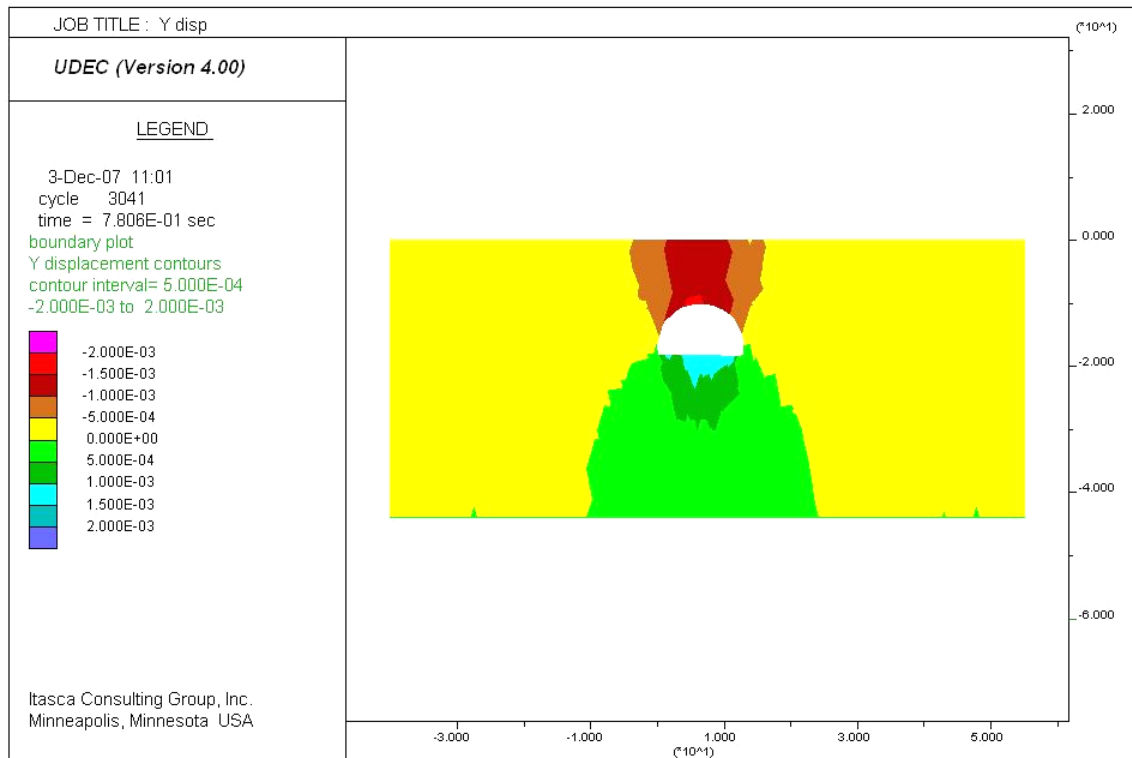
۶-۴-۱- ناحیه ساختاری Z_1 (دهانه ورودی تونل)

در ناحیه ساختاری Z_1 ، دهانه ورودی تونل، ارتفاع روباره تونل ۱۰ متر است. به علت مشخصات متوسط سنگ در زون Z_1 (دهانه تونل) و روباره کم، حفاری در این مقطع جابجائی مهمی به وجود نمی‌آورد. در شکل ۶-۱ کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در دهانه ورودی دیده می‌شود. در کف تونل بالا آمدگی در حدود ۱/۵ میلی‌متر و در تاج تونل نشست در حدود ۱/۵ میلی‌متر رخ داده است. مشاهده می‌شود که جابجائی‌ها مقادیر پایینی دارند که دلیل آن در بالا ذکر شده است.

در شکل ۶-۲ کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در دهانه ورودی دیده می‌شود. همانطور که از شکل پیداست در مقطع حفاری شده جابجائی‌های کوچکی در حد ۰/۶ میلی‌متر دیده می‌شود.

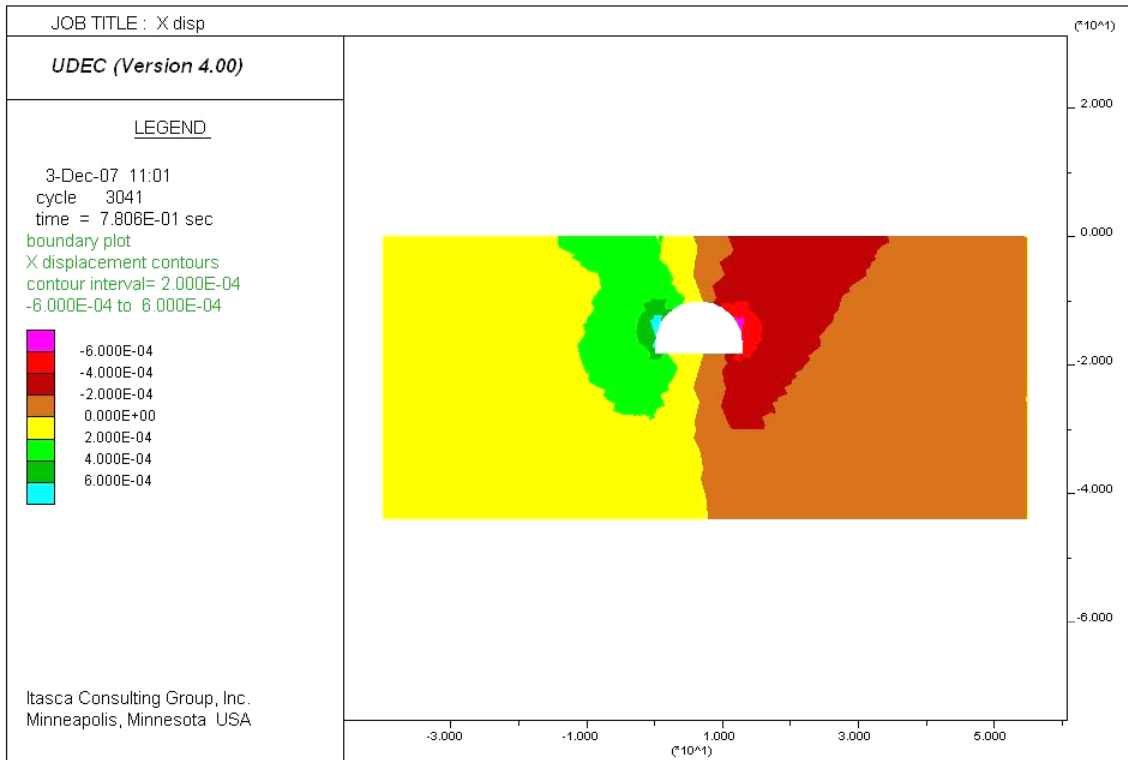
در شکل ۳-۶ کنتور تنش متوسط در مقطع تونل برای این زون دیده می‌شود. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و در حد ۱۰۰-۴۰۰ کیلو پاسکال، در کف حفاری شده نیز سطح تنش‌ها پایین و در حد ۱۰۰-۸۰۰ کیلو پاسکال و در دیواره نیز سطح تنش‌ها پایین و در حد ۴۰۰-۸۰۰ کیلو پاسکال فشاری است.

در شکل ۴-۶ تشکیل نقاط پلاستیک در اطراف تونل نشان داده شده است. همانگونه که از شکل پیداست در این مقطع مدل وارد حالت پلاستیک نمی‌شود.

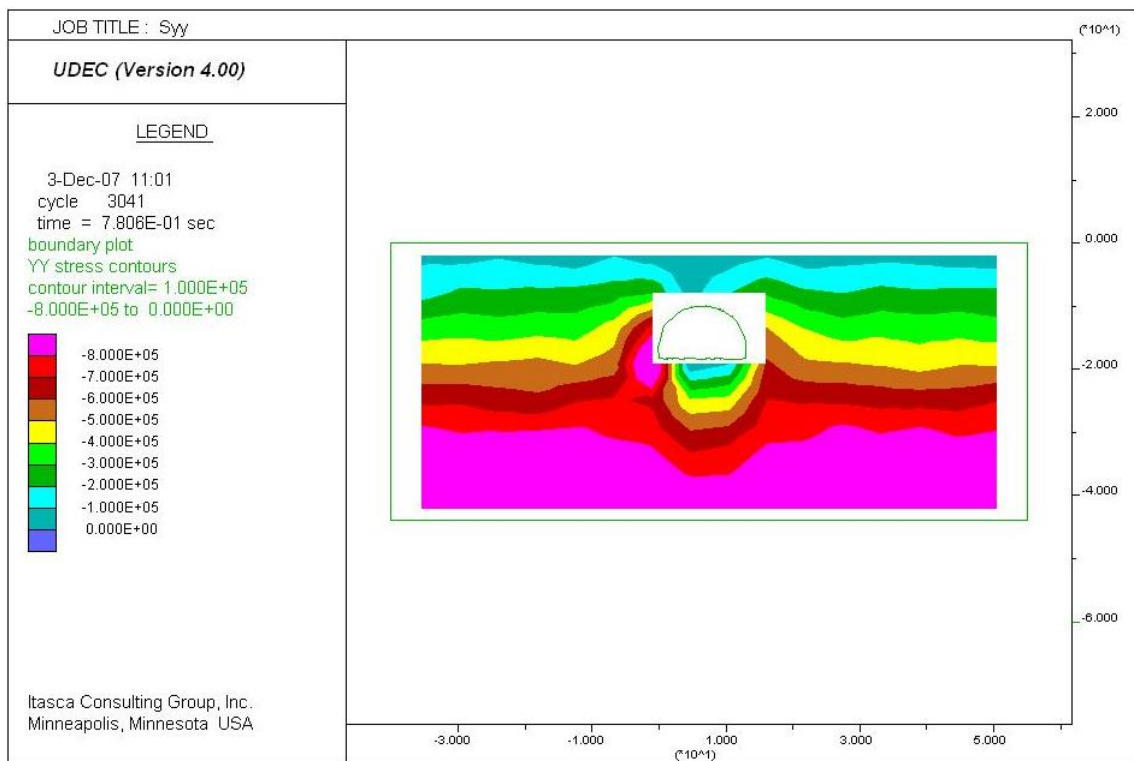


شکل ۶-

۱- کنتور جابجائی قائم در زون Z₁, دهانه ورودی تونل

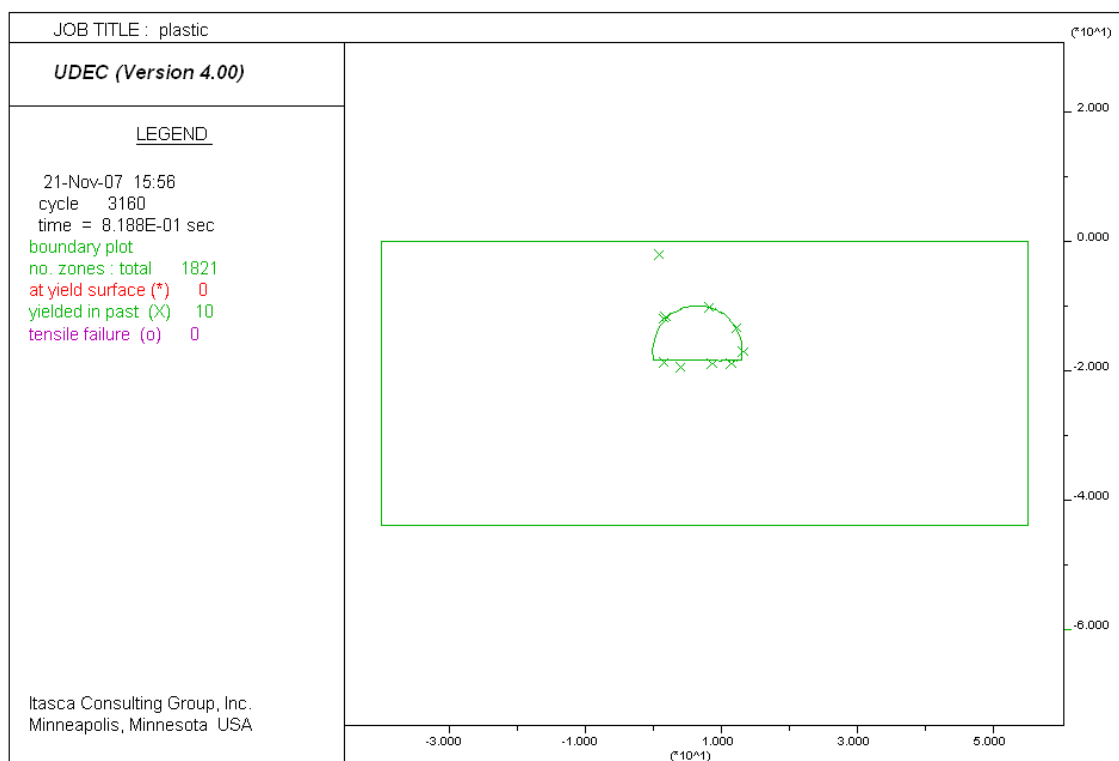


شکل ۶-۲- کنتور جابجائی افقی در زون Z₁، دهانه ورودی تونل



شکل ۶-۳

۳- کنتور تنش متوسط در زون Z₁، دهانه ورودی تونل

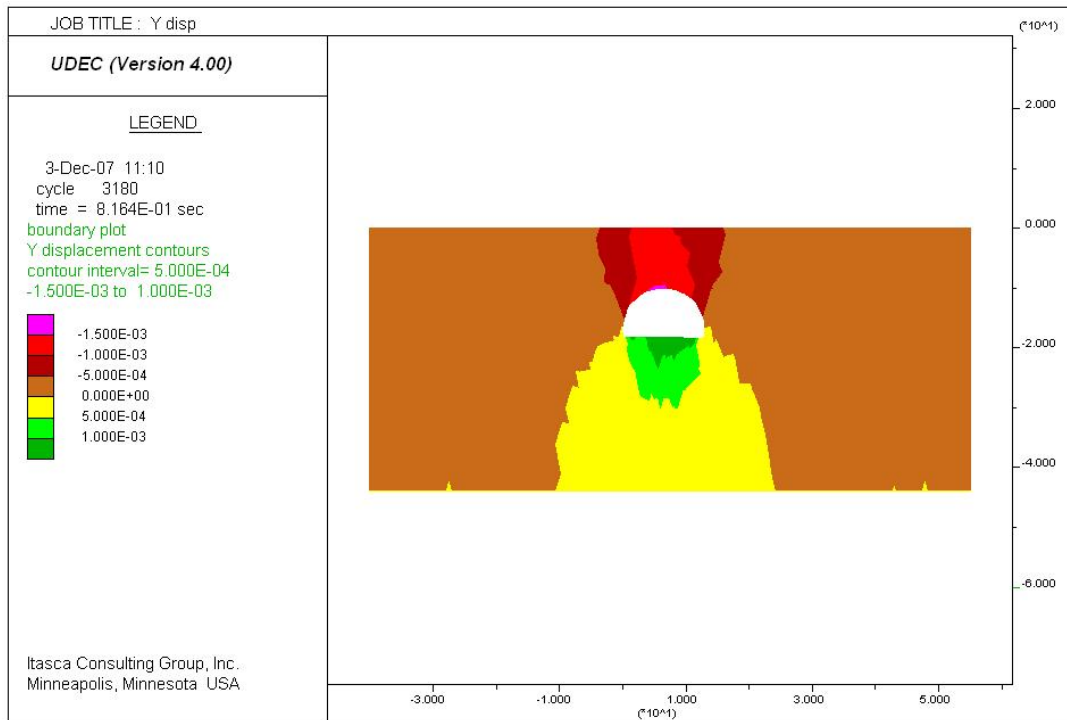


شکل ۶-۴- نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_1 ، دهانه ورودی تونل

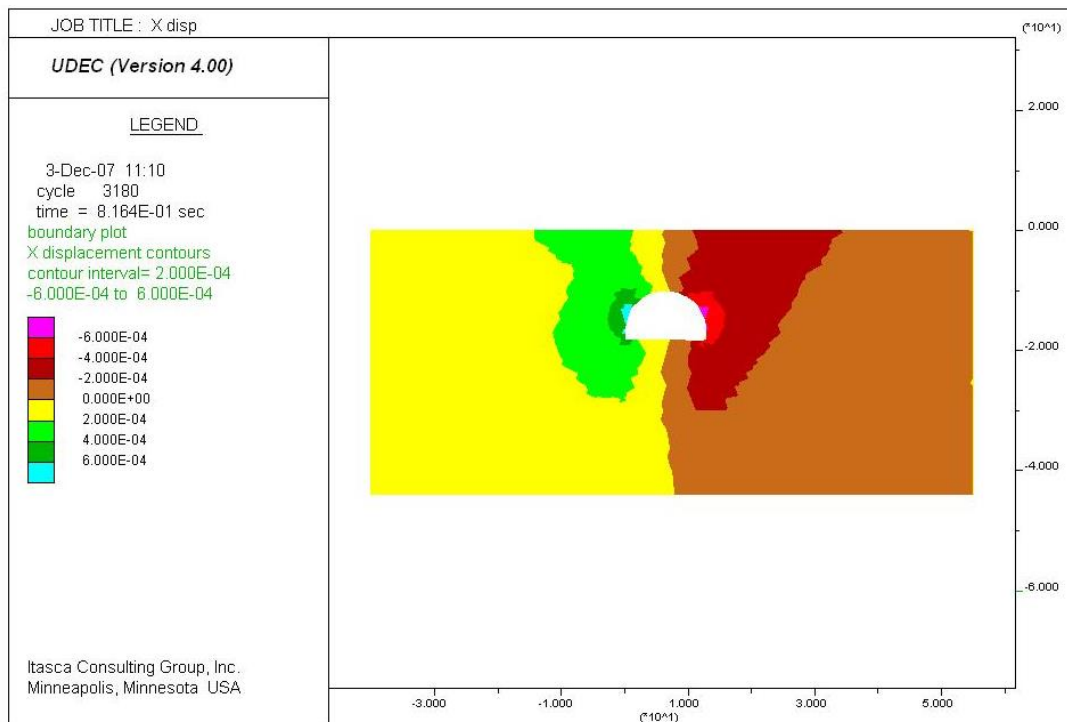
شکل ۶-۵- کنتور جابجایی قائم را در مقطع تونل در دهانه ورودی در زون Z_1 ، در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت به ضخامت ۵ سانتی‌متر) استفاده شده است را، نشان می‌دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حدود ۱ میلی‌متر و در تاج تونل نشست در حدود ۱/۵ میلی‌متر دیده می‌شود. جنس متوسط سنگ و سربار کم موجب شده است که استفاده از نگهدارنده تأثیری نداشته باشد. البته استفاده از نگهدارنده برای ریزش‌های موضعی و یا گوه‌ای مسلماً مفید خواهد بود.

شکل ۶-۶- کنتور جابجایی افقی را در مقطع تونل در دهانه ورودی در زون Z_1 ، در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست جابجایی‌های کوچکی در حد ۰/۶ میلی‌متر رخ داده است.

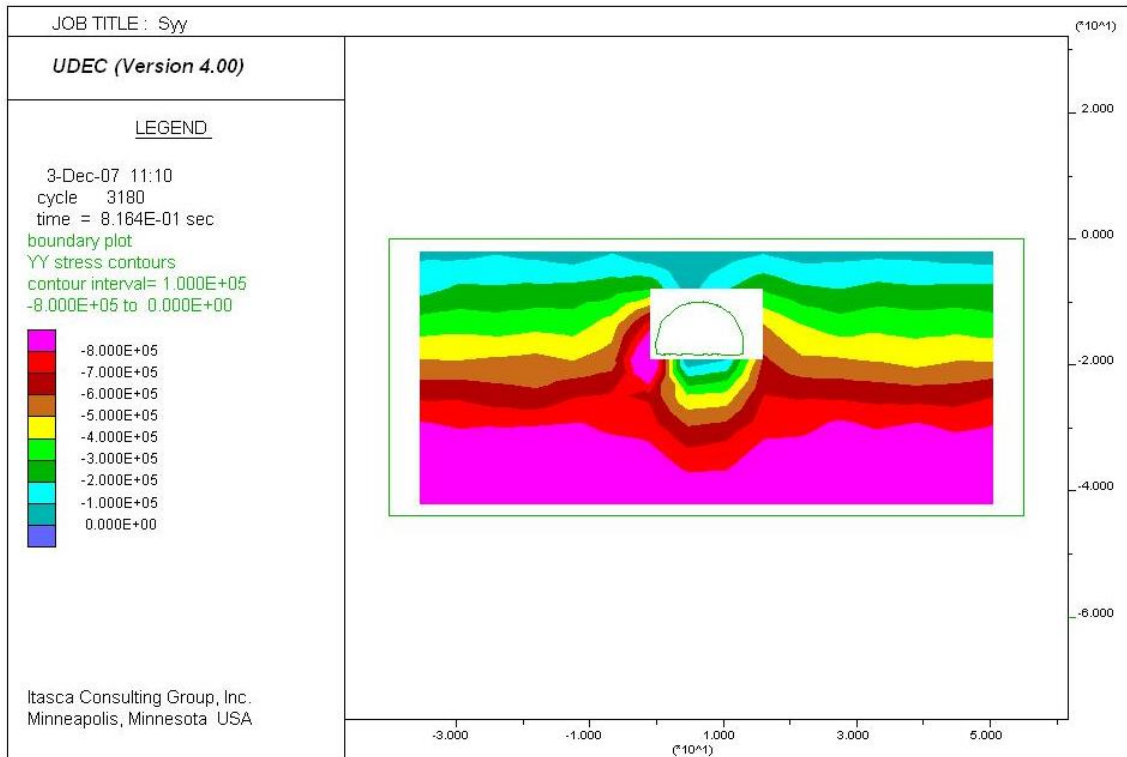
شکل ۶-۷- کنتور تنش متوسط را در مقطع تونل در دهانه ورودی در زون Z_1 ، در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و سطح آنها پایین در حد ۱۰۰-۴۰۰ کیلو پاسکال، در کف حفاری شده نیز سطح تنش‌ها پایین و در حد ۱۰۰-۸۰۰ کیلو پاسکال و در دیواره نیز سطح تنش‌ها پایین و در حد ۴۰۰-۸۰۰ کیلو پاسکال فشاری است.



شکل ۶-۵- کنتور جابجائی قائم برای مقطع تونل در دهانه ورودی، زون Z_1 ، پس از نصب شاتکریت



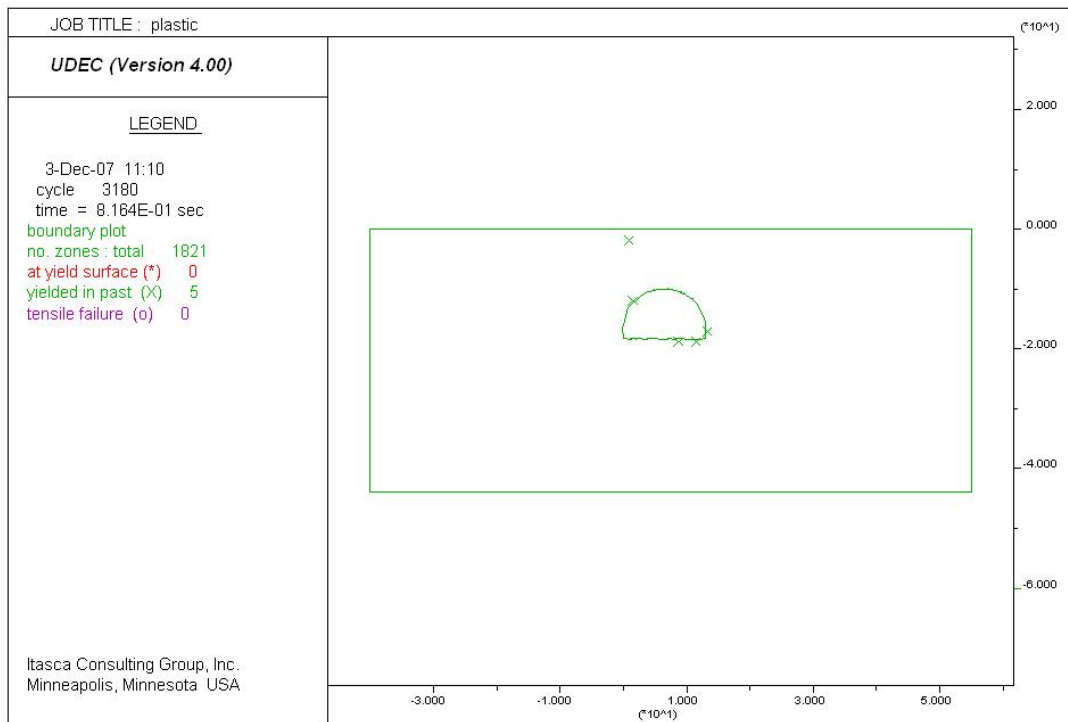
شکل ۶-۶- کنتور جابجائی افقی برای مقطع تونل در دهانه ورودی، زون Z_1 ، پس از نصب شاتکریت



شکل ۶-۷- کنتور تنش متوسط برای مقطع تونل در دهانه ورودی، زون Z_1 ، پس از نصب شاتکریت

شکل ۶-۸ تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_1 ، دهانه ورودی تونل را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل پیداست مدل وارد حالت پلاستیک نخواهد شد.

با توجه به شکل‌ها و نتایج موجود می‌توان استنباط کرد که در این مقطع می‌توان سیستم نگهداری را بلافاصله پس از حفر تونل به کار نبرد.



شکل ۶-۸- نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_1 ، دهانه ورودی تونل پس از نصب شاتکریت

۶-۴-۲- ناحیه ساختاری Z_{1-2}

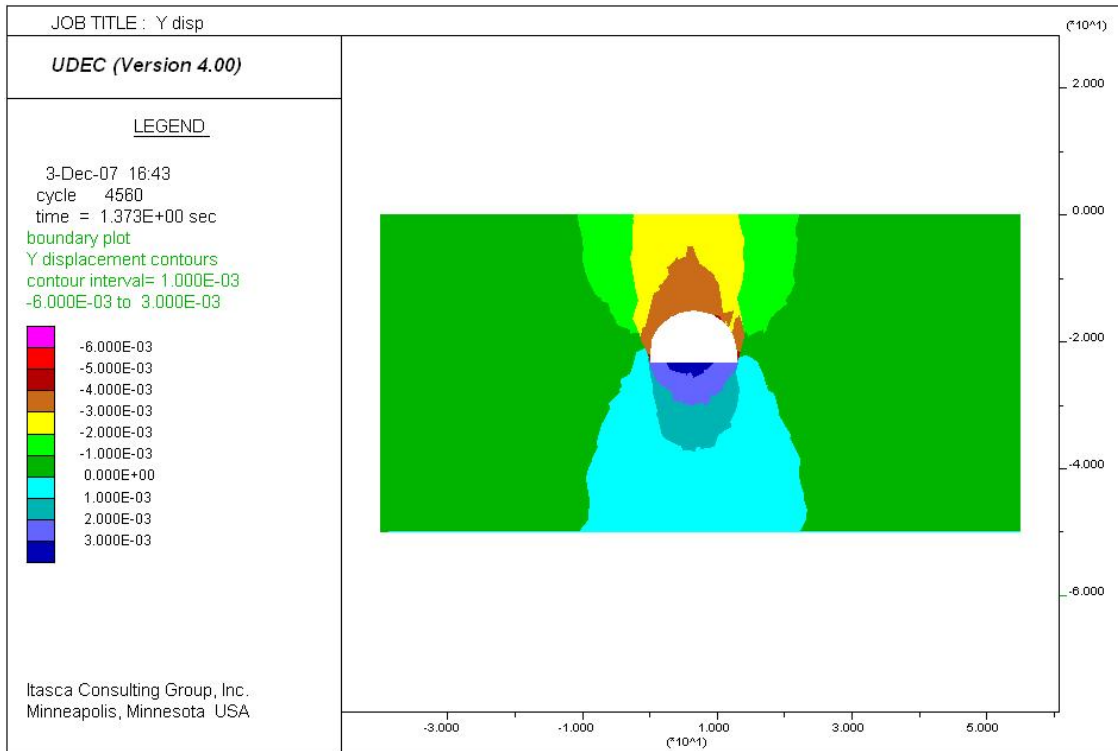
در ناحیه ساختاری Z_{1-2} ، ۳۰ متری دهانه ورودی تونل، ارتفاع روباره تونل ۱۵ متر بوده و مشخصاتی که برای این مقطع معرفی شده است از جدول زمین‌شناسی RMR به دست آمده است. به علت مشخصات متوسط سنگ در زون Z_{1-2} (۳۰ متری دهانه تونل) و روباره کم، حفاری در این مقطع جابجائی مهمی به وجود نمی‌آورد.

در شکل ۶-۹ کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z_{1-2} دیده می‌شود. در کف تونل بالا آمدگی در حد ۳ میلی‌متر و در تاج تونل نشست در حد ۴ میلی‌متر رخ داده است. مشاهده می‌شود که جابجائی‌ها مقادیر پایینی دارند.

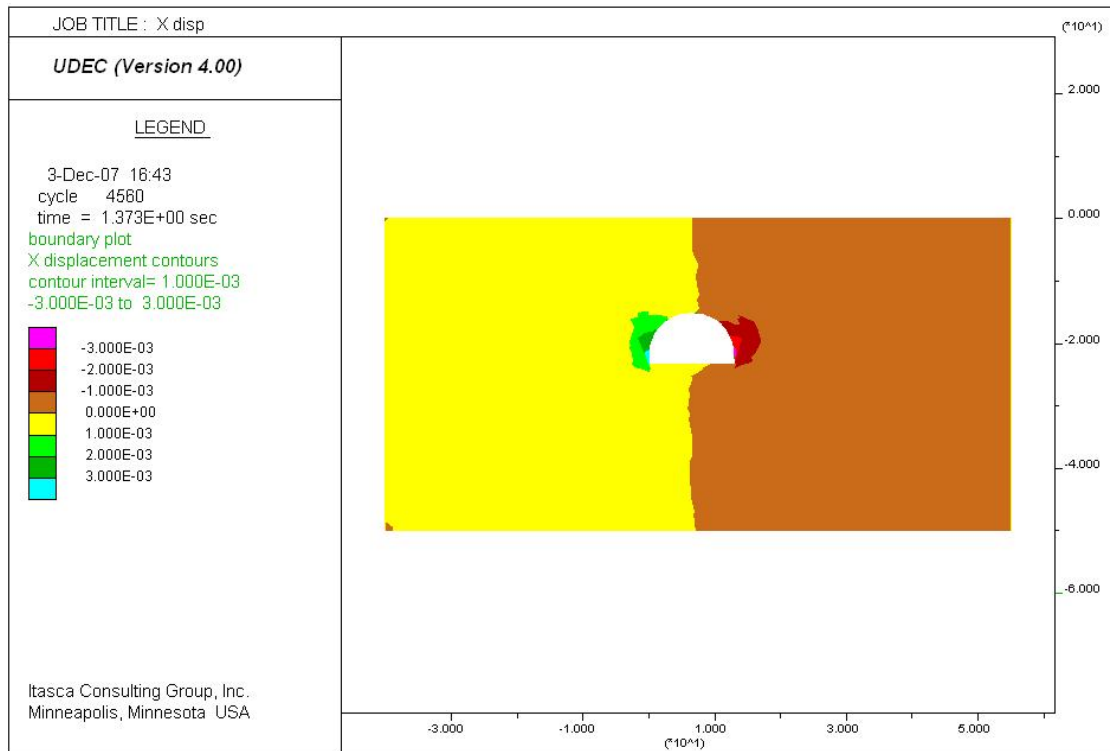
در شکل ۶-۱۰ کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z_{1-2} دیده می‌شود. همانطور که از شکل پیداست در مقطع حفاری شده جابجائی‌های کوچکی در حد ۳ میلی‌متر دیده می‌شود.

در شکل ۶-۱۱ کنتور تنش متوسط در مقطع تونل برای این زون دیده می‌شود. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و در حد ۱۰۰-۳۰۰ کیلو پاسکال، در کف حفاری شده نیز سطح تنش‌ها پایین و در حد ۲۰۰-۷۰۰ کیلو پاسکال و در دیواره نیز سطح تنش‌ها پایین و در حد ۳۰۰-۸۰۰ کیلو پاسکال فشاری است.

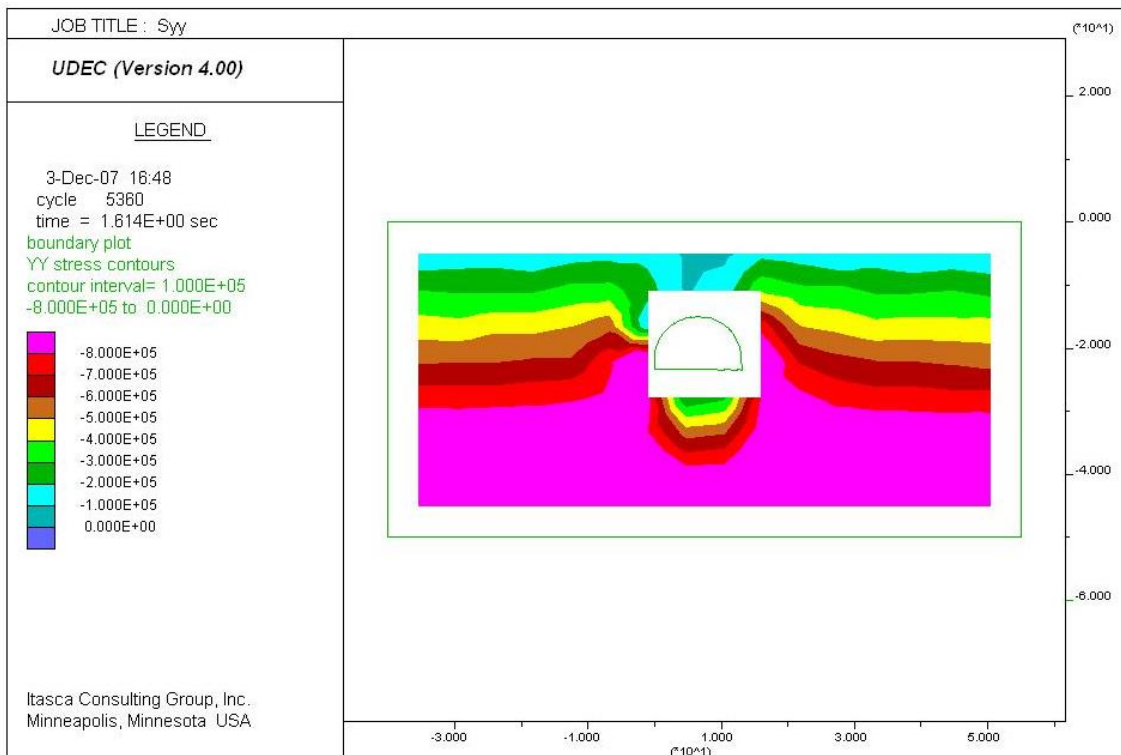
در شکل ۶-۱۲ تشکیل نقاط پلاستیک در اطراف تونل نشان داده شده است. همانگونه که از شکل پیداست در این مقطع مدل به مقدار بسیار ناچیز وارد حالت پلاستیک می‌شود.



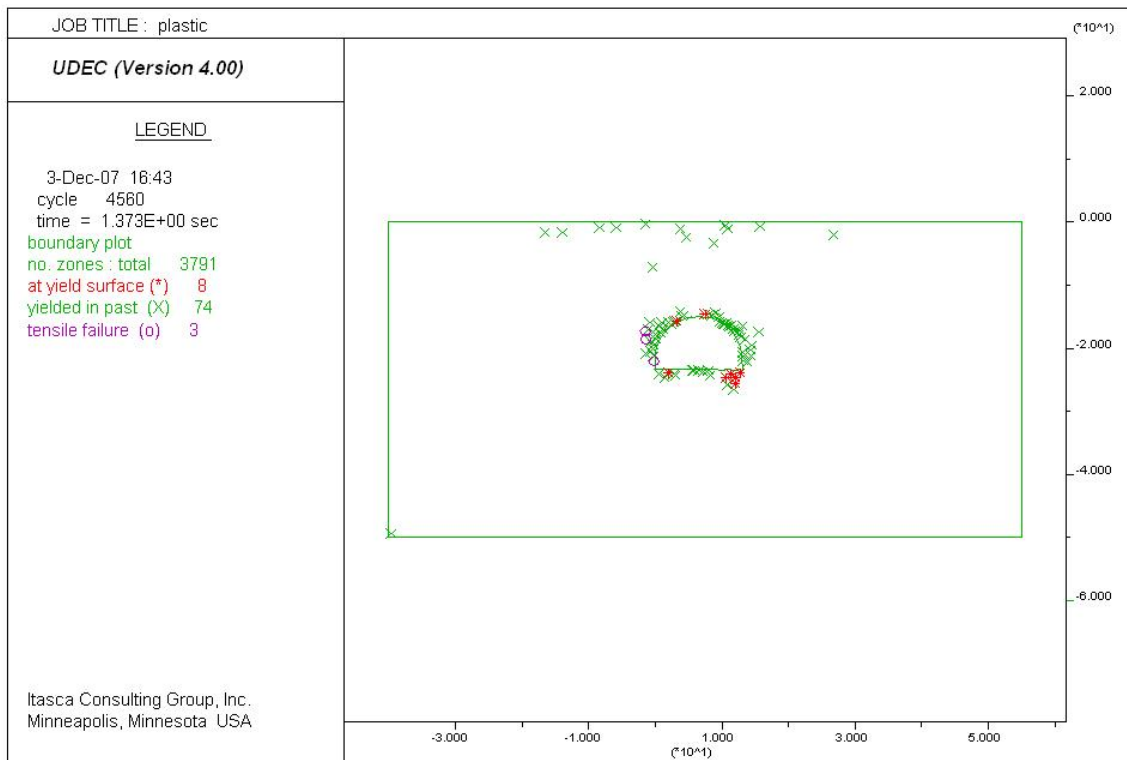
شکل ۹-۶- کنتور جابجائی قائم در زون Z1-2



شکل ۶-۱۰- کنتور جابجائی افقی در زون Z1-2



شکل ۶-۱۱- کنتور تنش متوسط اطراف تونل در زون Z1-2



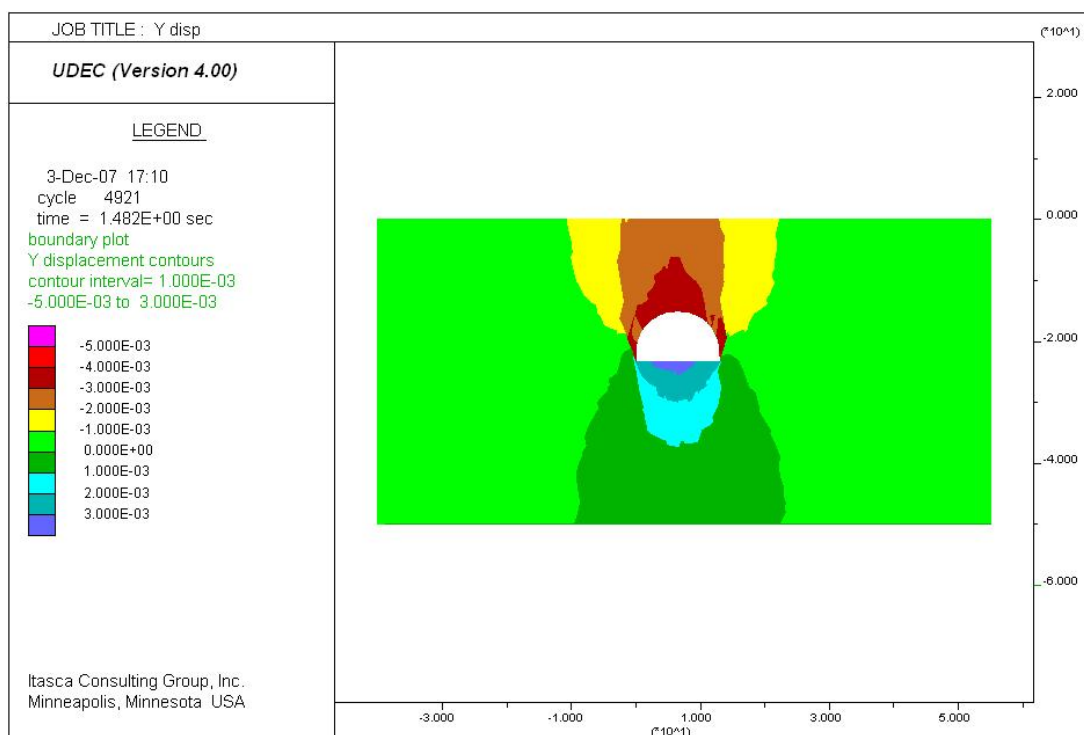
شکل ۶-۱۲- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z₁₋₂

شکل ۶-۱۳ کنتور جابجایی قائم را در مقطع تونل در زون Z₁₋₂، در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت به ضخامت ۵ سانتی متر) استفاده شده است را نشان می دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حد ۳ میلی متر و در تاج تونل نیز نشست در حد ۳ میلی متر دیده می شود. جنس متوسط سنگ و سربار کم موجب شده است که استفاده از نگهدارنده تأثیری نداشته باشد. البته استفاده از نگهدارنده برای ریزش های موضعی و یا گوه ای مسلماً مفید خواهد بود که امکان بررسی آن با استفاده از این نرم افزار موجود نیست.

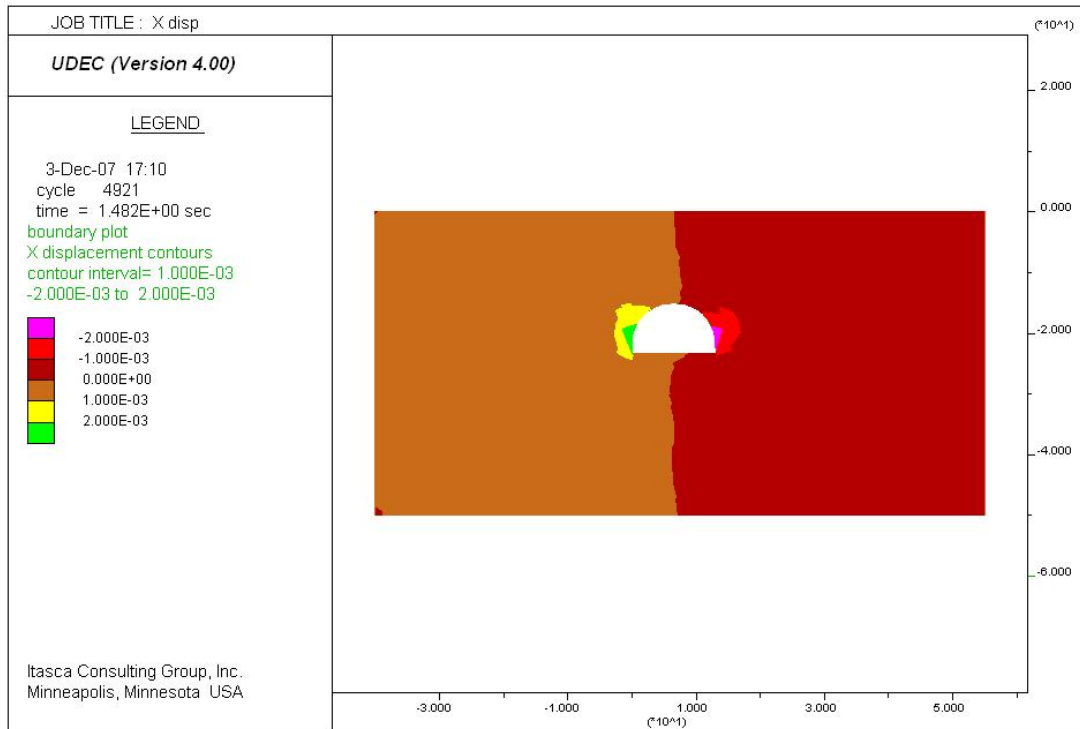
شکل ۶-۱۴ کنتور جابجایی افقی را در مقطع تونل در زون Z₁₋₂، در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست جابجائی های کوچکی در حد ۲ میلی متر رخ داده است.

شکل ۶-۱۵ کنتور تنش متوسط را در مقطع تونل در زون Z₁₋₂، در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می دهد. در تاج تونل تنش ها قشاری بوده و سطح آنها پایین در حد

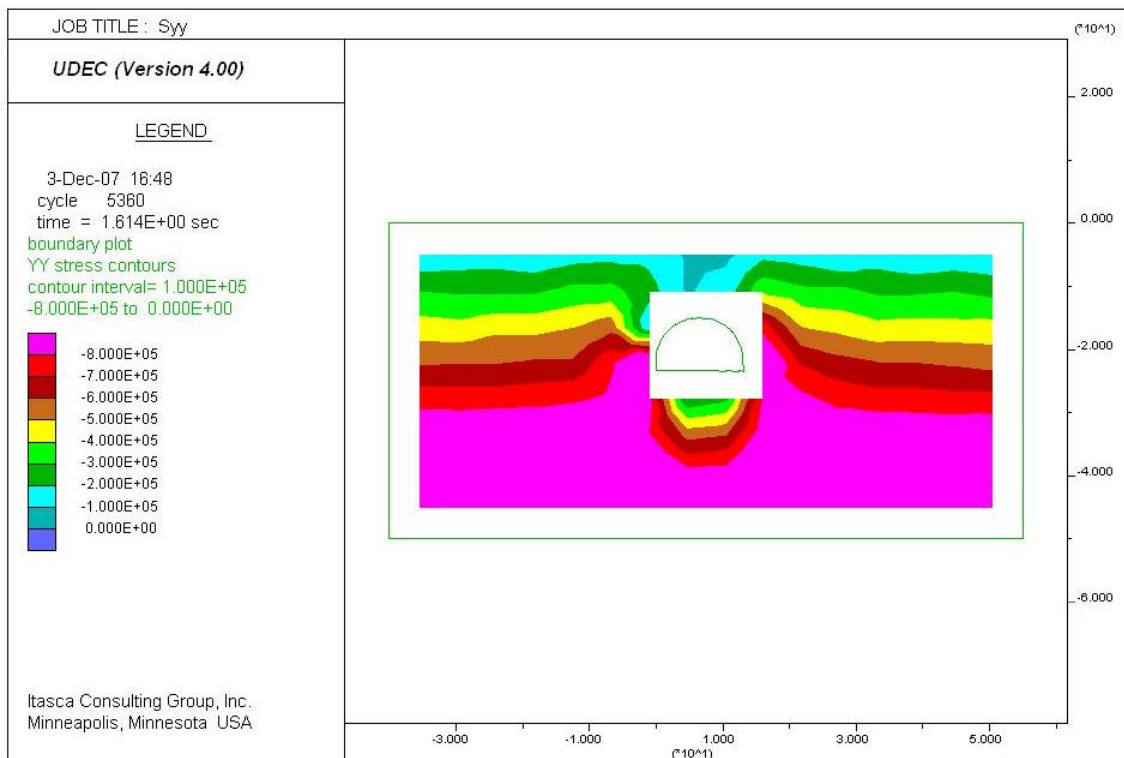
۱۰۰-۳۰۰ کیلو پاسکال، در کف حفاری شده نیز سطح تنش‌ها پایین و در حد ۲۰۰-۷۰۰ کیلو پاسکال و در دیواره نیز سطح تنش‌ها پایین و در حد ۶۰۰-۸۰۰ کیلو پاسکال فشاری است.



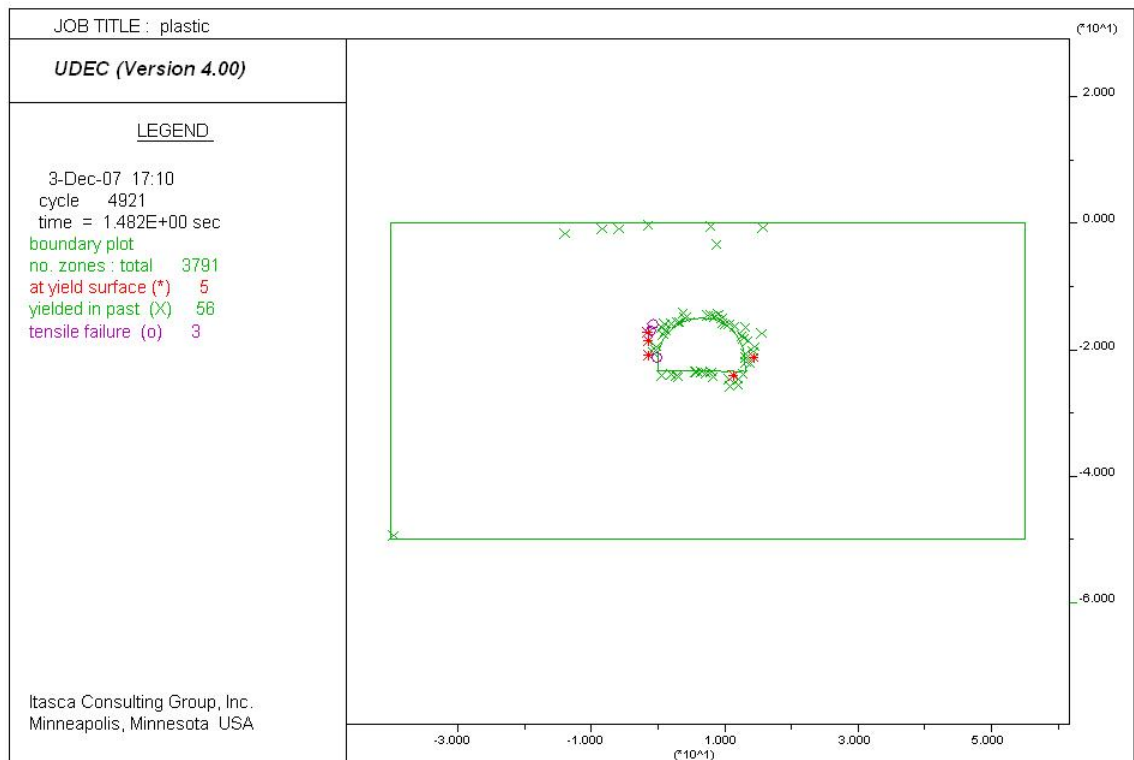
شکل ۶-۱۳- کنتور جابجایی قائم اطراف تونل در زون Z1-2، پس از نصب شاتکریت



شکل ۶-۱۴- کنتور جابجایی افقی اطراف تونل در زون Z1-2، پس از نصب شاتکریت



شکل ۶-۱۵- کنتور تنش متوسط اطراف تونل در زون Z1-2، پس از نصب شاتکریت



شکل ۶-۱۶- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z₁₋₂، پس از نصب شاتکریت

۶-۴-۳- ناحیه ساختاری Z₅

در ناحیه ساختاری Z₅، ۲۱۰ متری دهانه ورودی تونل، ارتفاع روباره تونل ۱۱۵ متر بوده و مشخصاتی که برای این مقطع معرفی شده است از جدول زمین‌شناسی RMR (فصل چهارم) به دست آمده است. به علت مشخصات ضعیف سنگ در زون Z₅ و روباره زیاد، حفاری در این مقطع جابجائی‌های بزرگی به وجود می‌آورد.

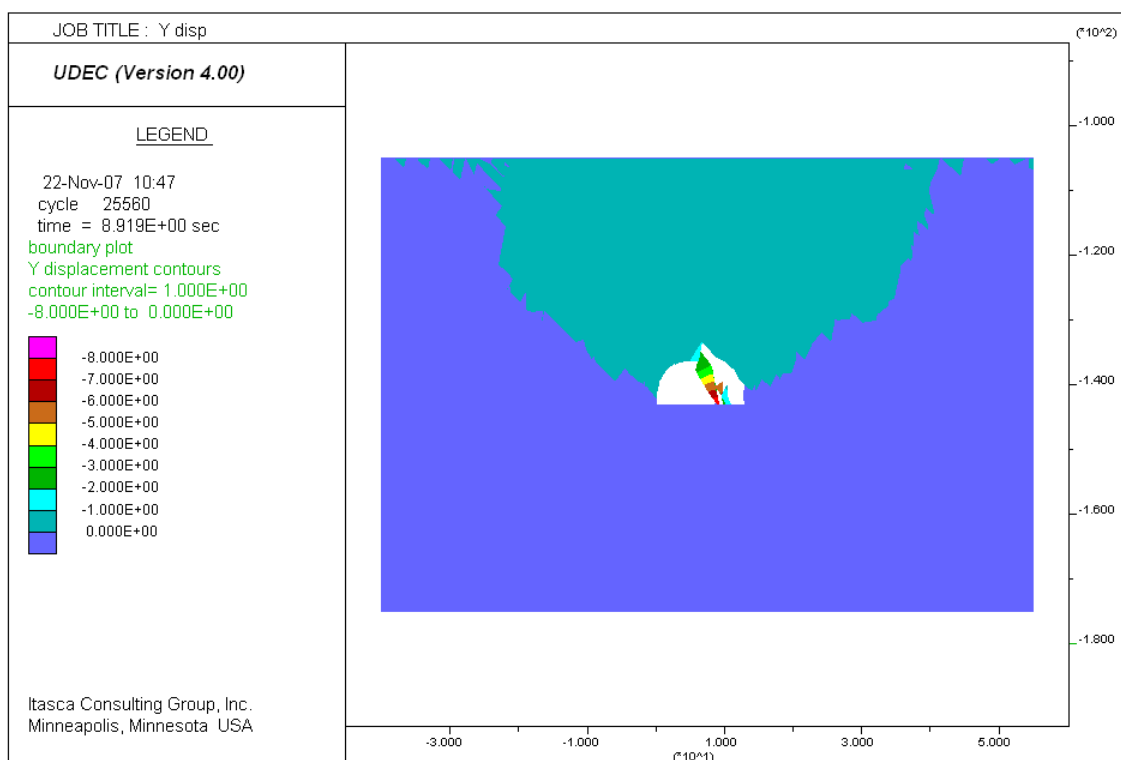
در شکل ۶-۱۷ کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z₅، در ۲۱۰ متری از دهانه ورودی دیده می‌شود. همانطور که از شکل مشخص است، روباره زیاد و جنس ضعیف سنگ موجب ریزش شده است.

در شکل ۶-۱۸ کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z₅، در ۲۱۰ متری از دهانه ورودی دیده می‌شود.

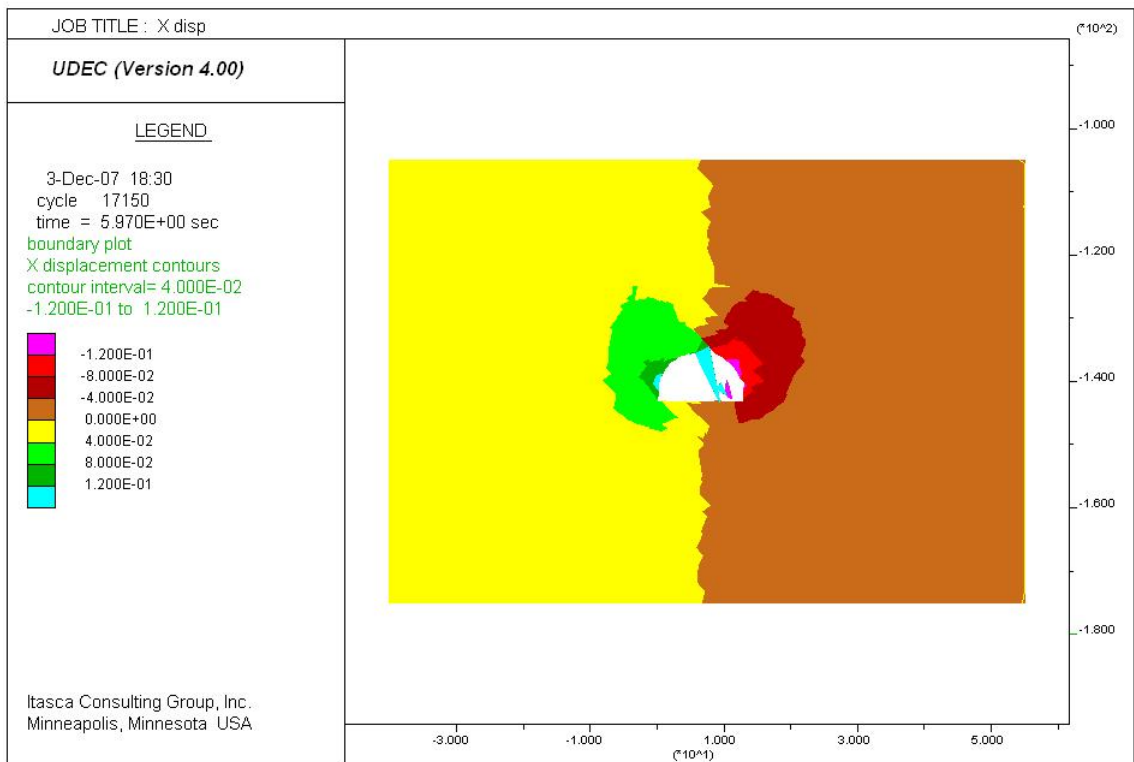
در شکل ۶-۱۹ کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z₅، در ۲۱۰ متری از دهانه ورودی دیده می‌شود. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و سطح آنها پایین و در حد ۰-۶۰۰، در کف تونل سطح تنش‌ها

پایین و در حد ۱۰۰۰-۰ و در دیواره سطح تنشها در حد ۶۰۰-۱۶۰۰ کیلو پاسکال می باشد.

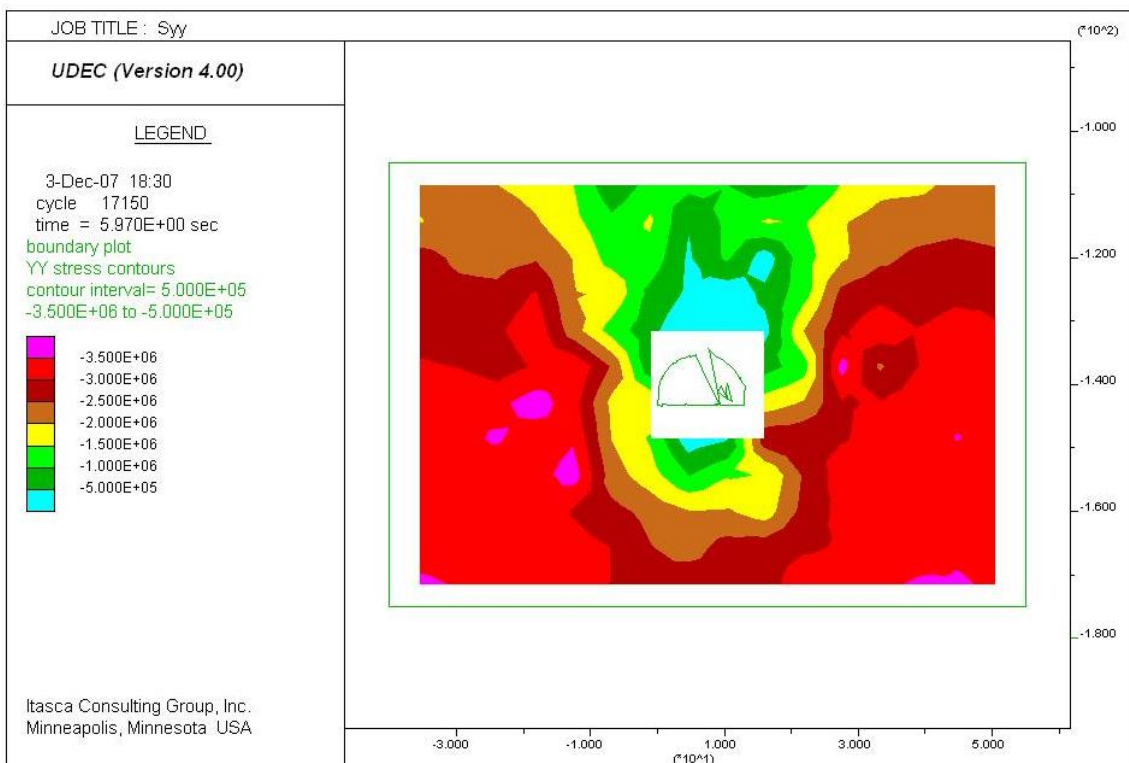
در شکل ۶-۲۰ تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل دیده می شود. همانگونه که از شکل پیداست در اطراف تونل حالت پلاستیک ایجاد می شود و به خصوص در تاج تونل تمرکز نقاط پلاستیک بیشتر است.



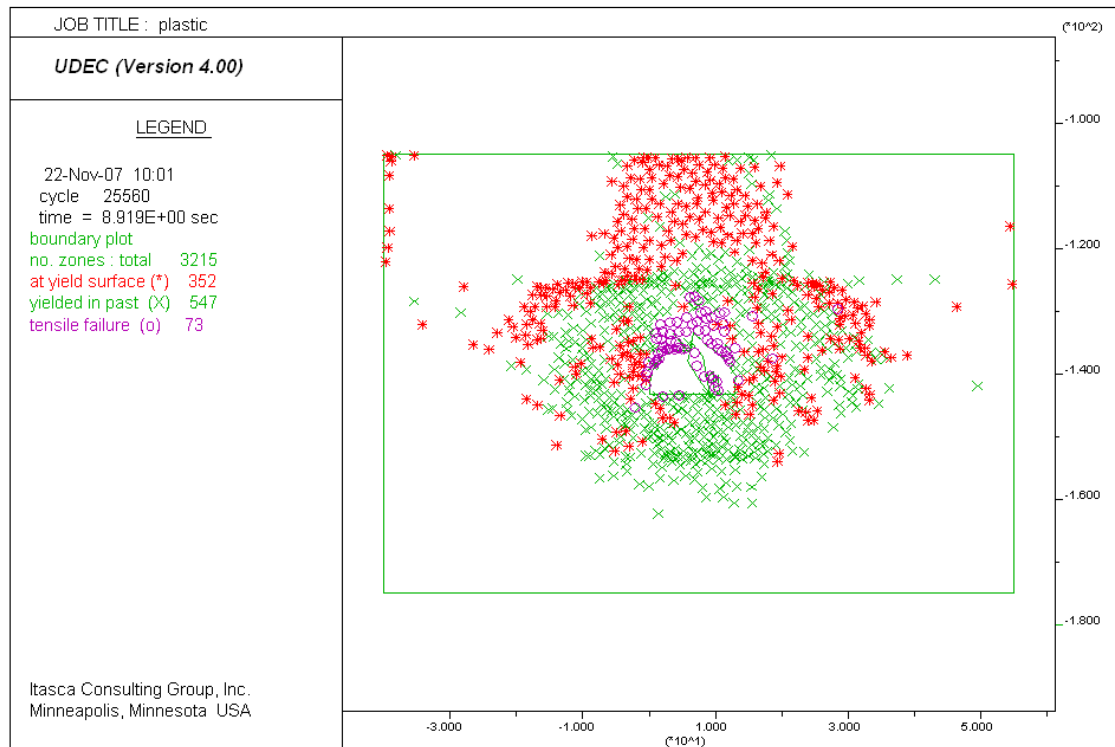
شکل ۶-۱۷- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی



شکل ۶-۱۸- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی



شکل ۶-۱۹- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی



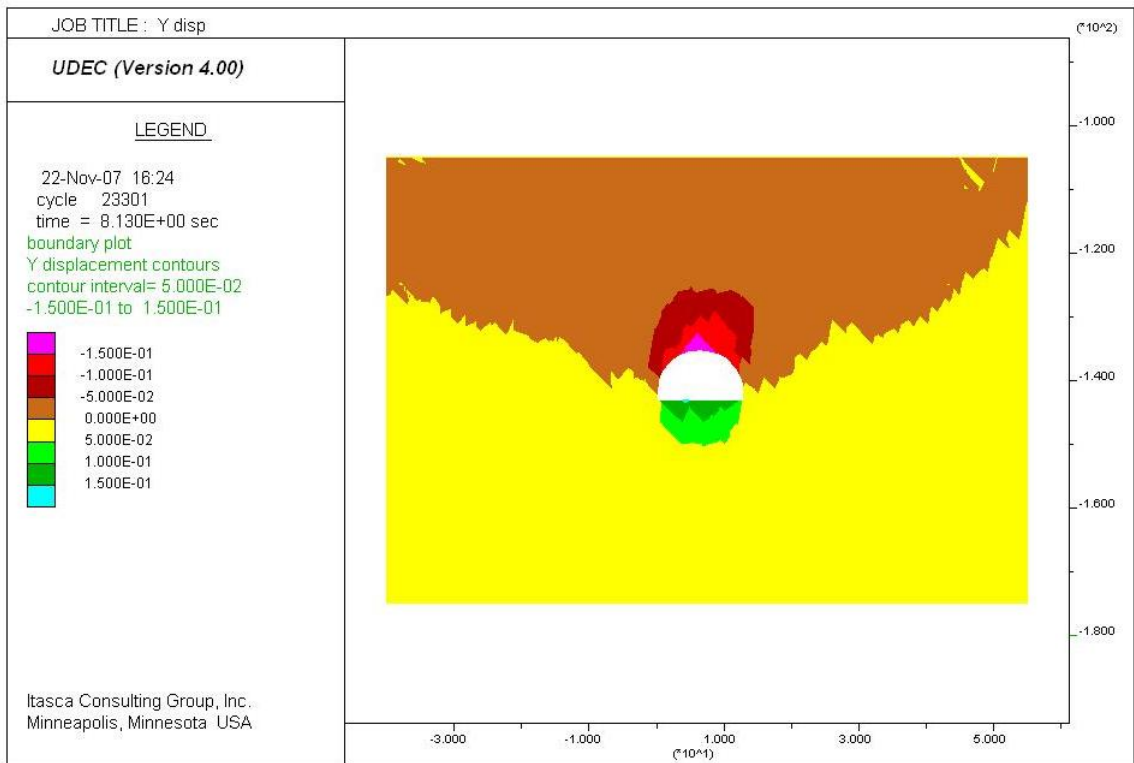
شکل ۶-۲۰ - نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه تونل ورودی

شکل ۶-۲۱ کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حدود ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر و در تاج تونل نشست در حدود ۱۵ سانتی‌متر دیده می‌شود.

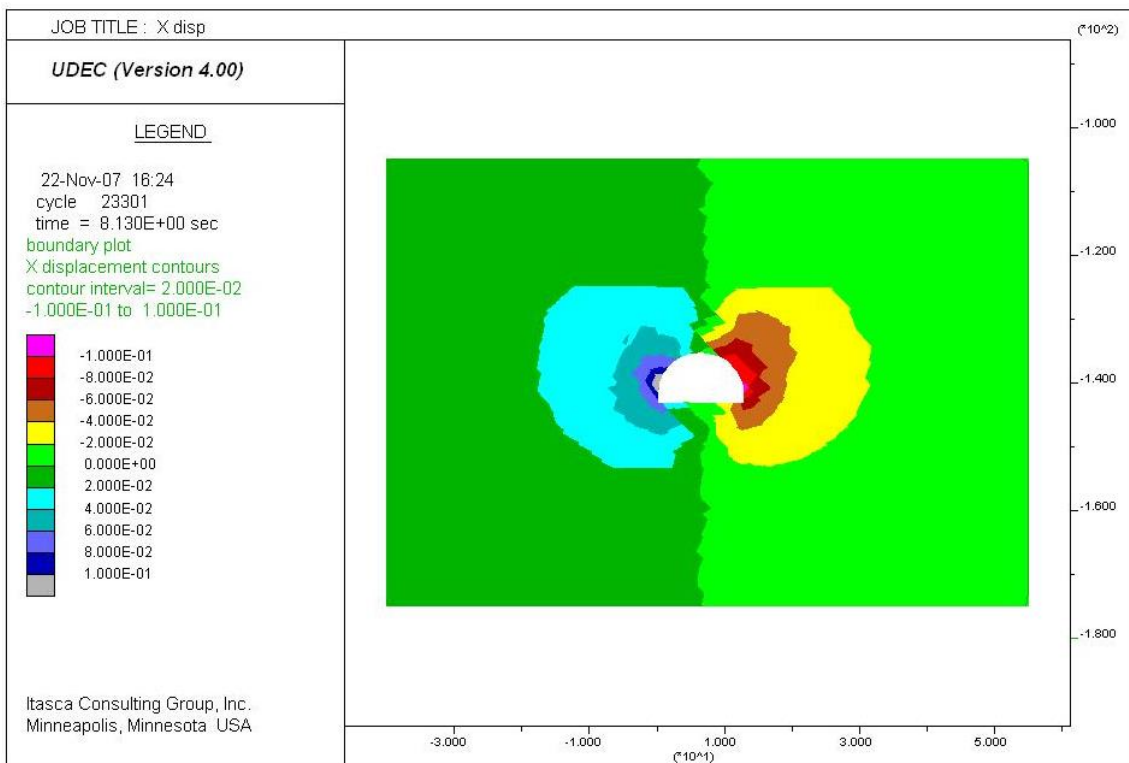
شکل ۶-۲۲ کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل دیده می‌شود جابجائی‌های بزرگی در حد ۱۰ سانتی‌متر رخ می‌دهد.

شکل ۶-۲۳ کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و در حد ۶۰۰-۸۰۰، در کف تونل در حد ۴۰۰-۱۰۰۰ و در دیواره در حد ۸۰۰-۱۸۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد.

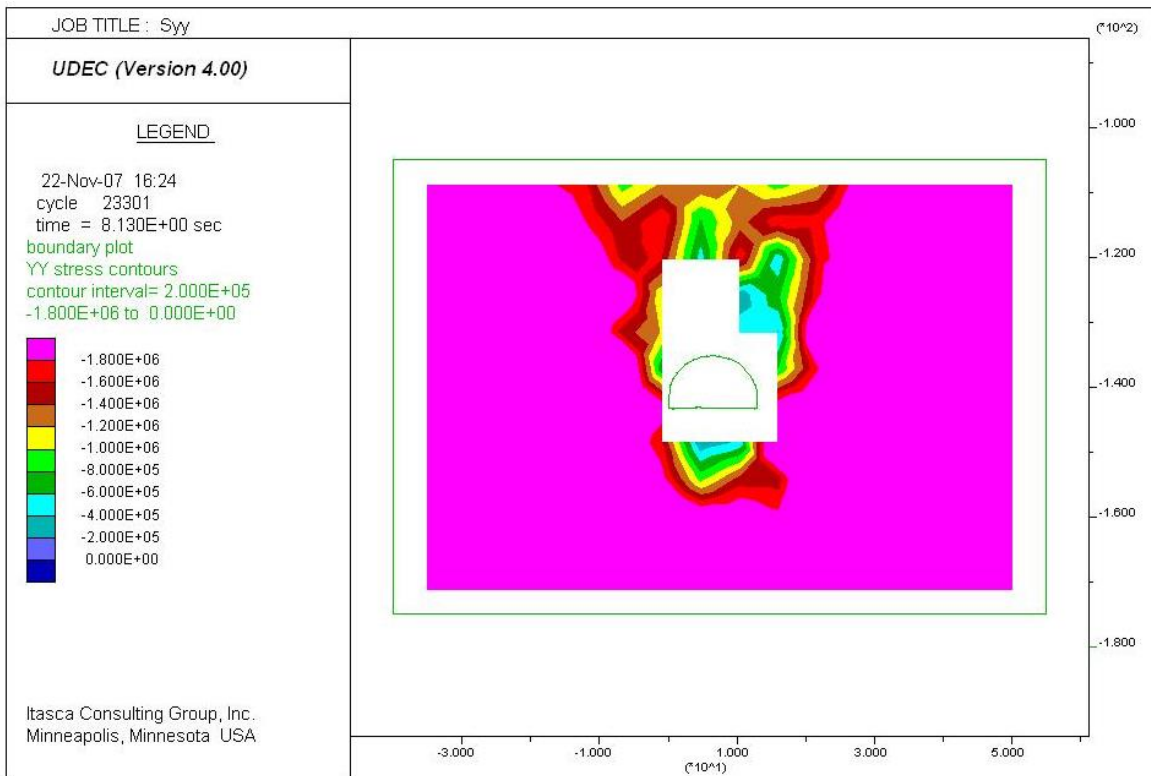
شکل ۶-۲۴ تشکیل نقاط پلاستیک در اطراف تونل را نشان می‌دهد.



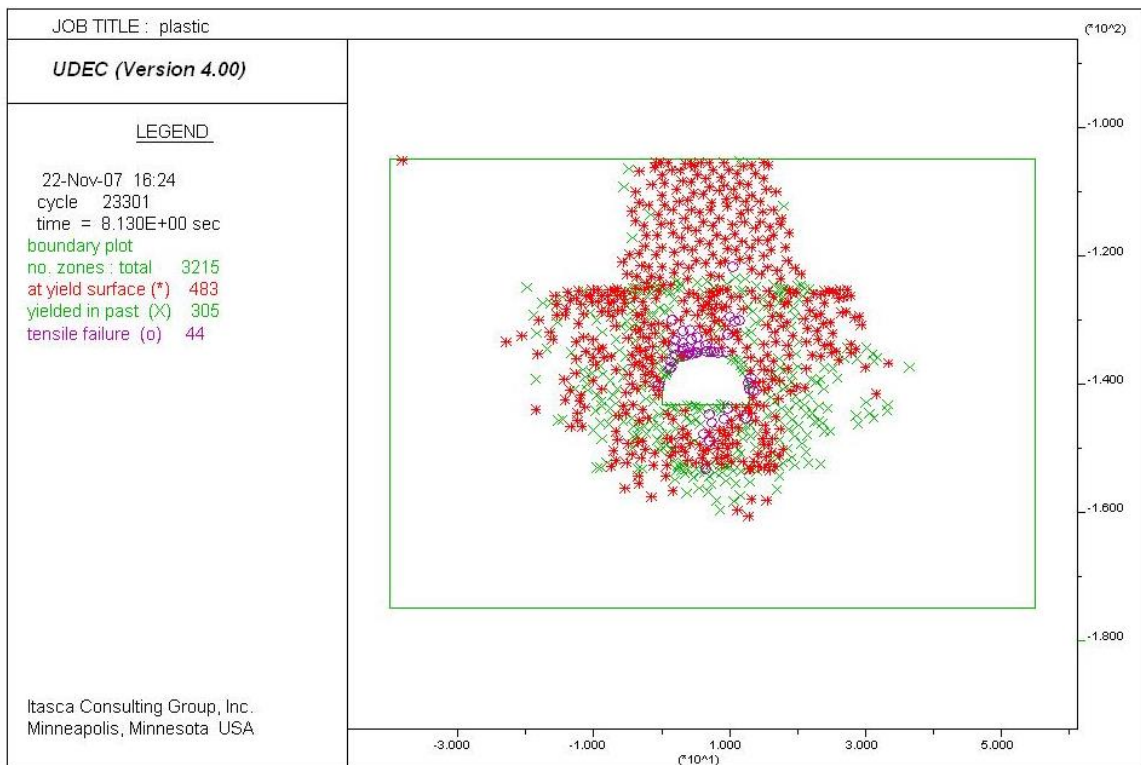
شکل ۶-۲۱- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل، زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل پس از نصب شاکرتی



شکل ۶-۲۲- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل، زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل پس از نصب شاکرتی



شکل ۶-۲۳- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل، زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل پس از نصب شاکریت



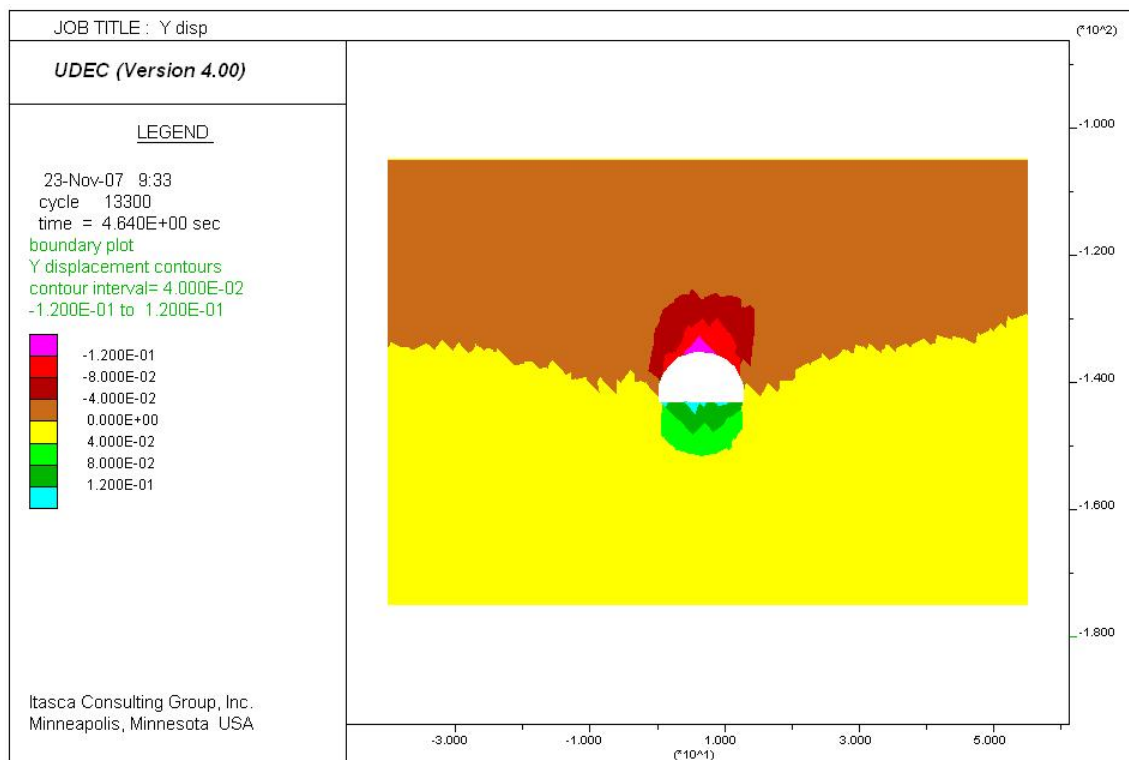
شکل ۶-۲۴- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل، زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل پس از نصب شاکریت

شکل ۶-۲۵ کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و پیچ‌سنگ به قطر ۲۵ میلی‌متر و طول ۵ متر و به فاصله ۱/۵ متر) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حدود ۱۲ سانتی‌متر و در تاج تونل نیز نشست در حدود ۱۲ سانتی‌متر دیده می‌شود که این مقدار همچنان زیاد است.

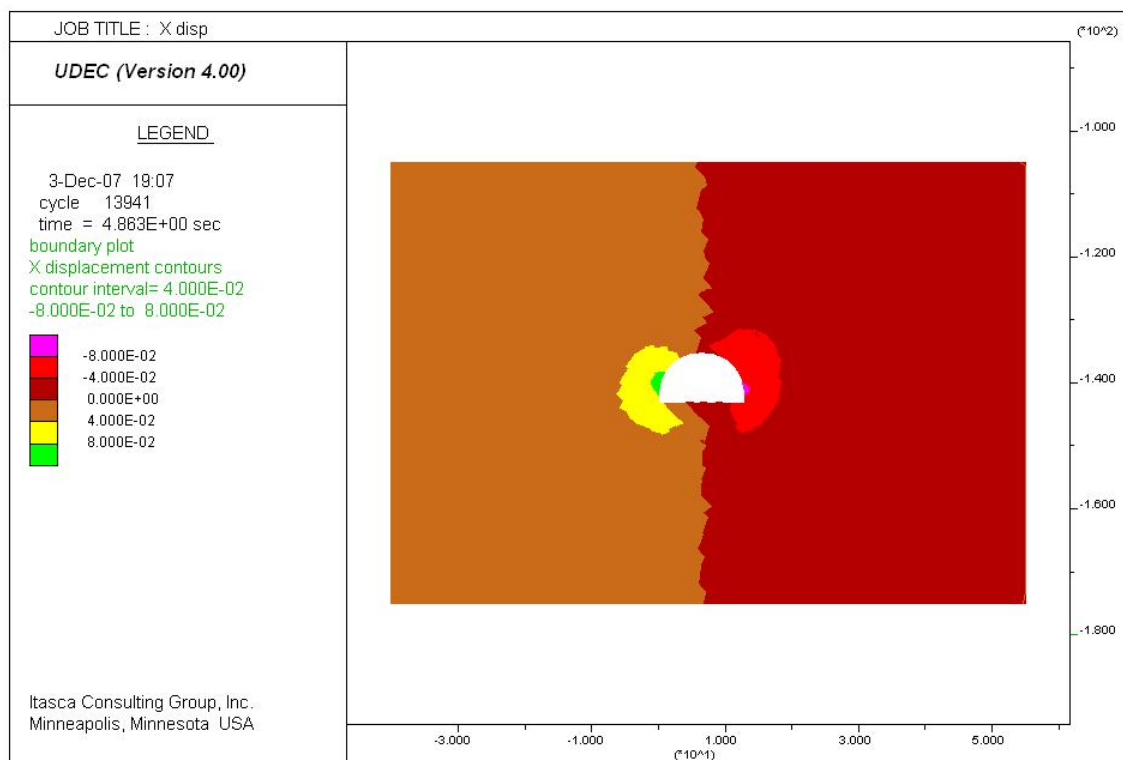
شکل ۶-۲۶ کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت و پیچ‌سنگ) استفاده شده است را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل دیده می‌شود جابجائی‌های بزرگی در حد ۸ سانتی‌متر رخ می‌دهد.

شکل ۶-۲۷ کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت و پیچ‌سنگ) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و در حد ۴۰۰-۱۰۰۰، در کف تونل در حد ۴۰۰-۱۴۰۰ و در دیواره در حد ۸۰۰-۱۶۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد.

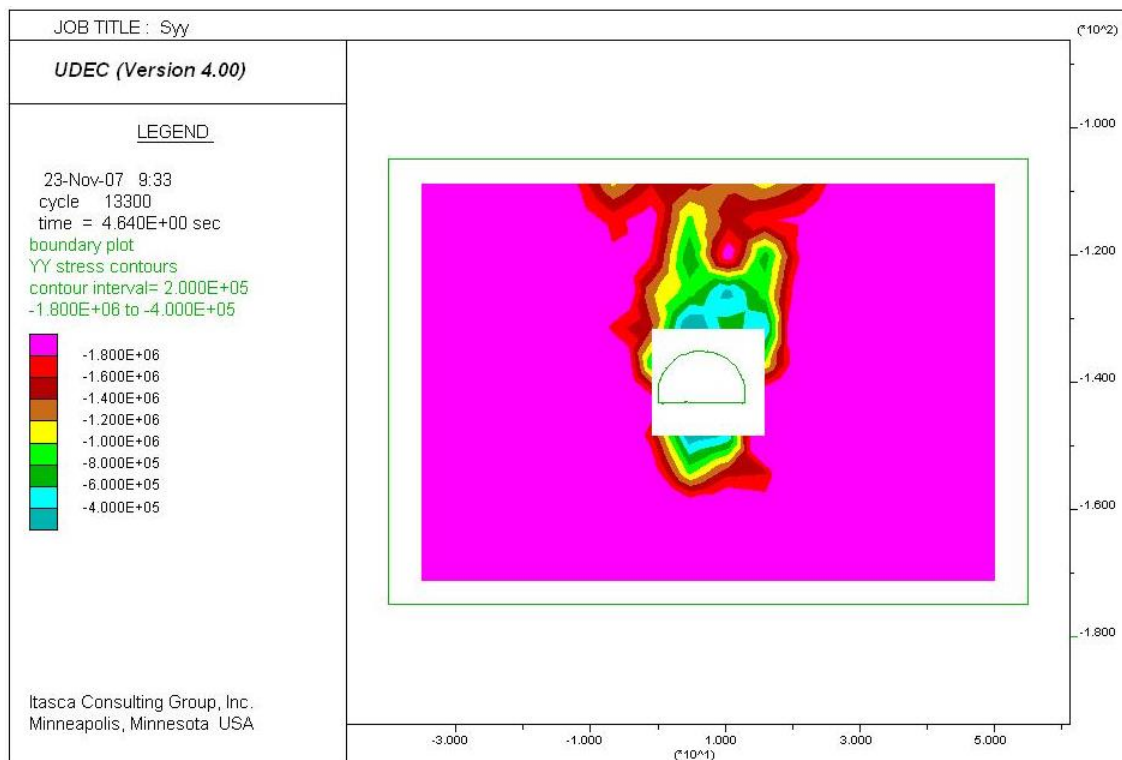
شکل ۶-۲۸ تشکیل نقاط پلاستیک در اطراف تونل را نشان می‌دهد.



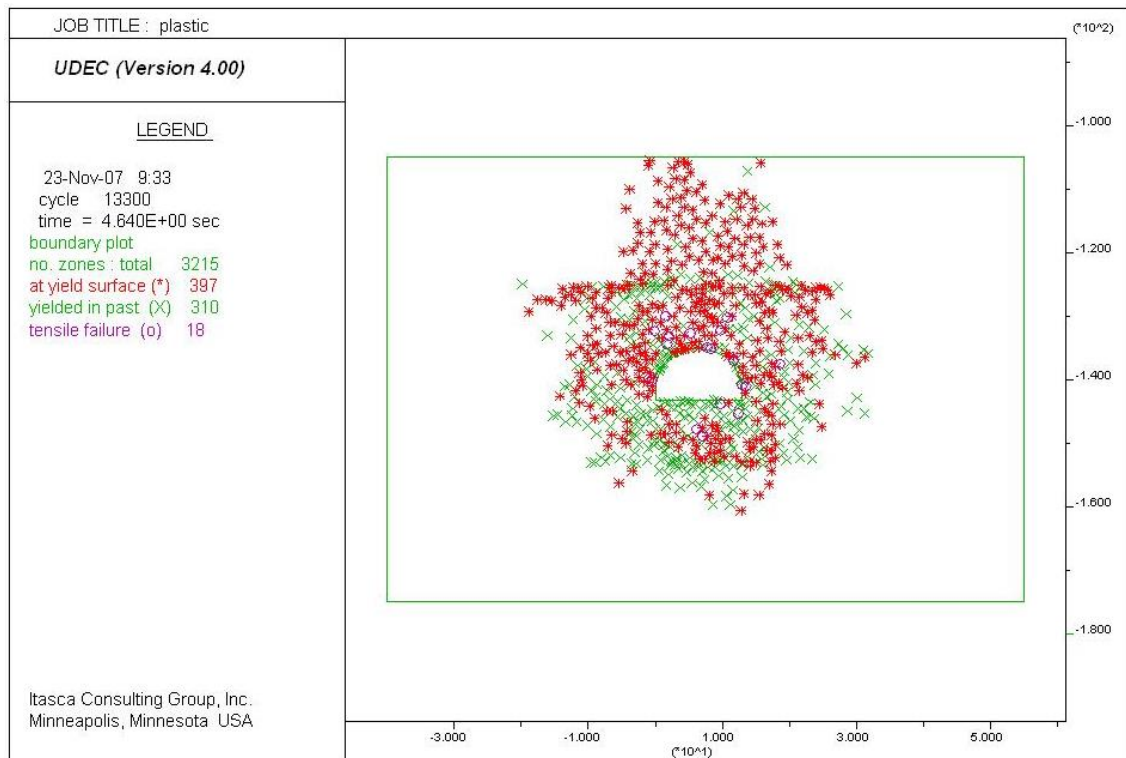
شکل ۶-۲۵- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل، زون Z5، پس از نصب شاتکریت+پیچ‌سنگ



شکل ۶-۲۶- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل، زون Z5، پس از نصب شاتکریت+پیچ‌سنگ



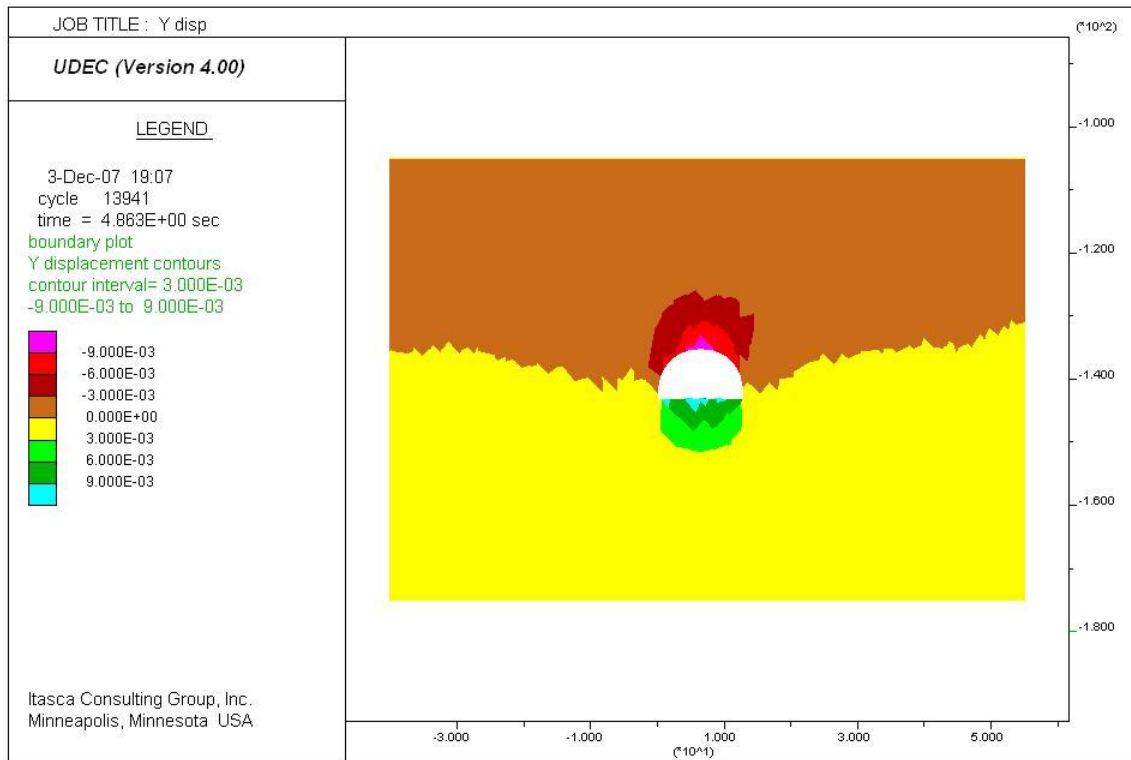
شکل ۶-۲۷- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل، زون Z5، پس از نصب شاتکریت+پیچ‌سنگ



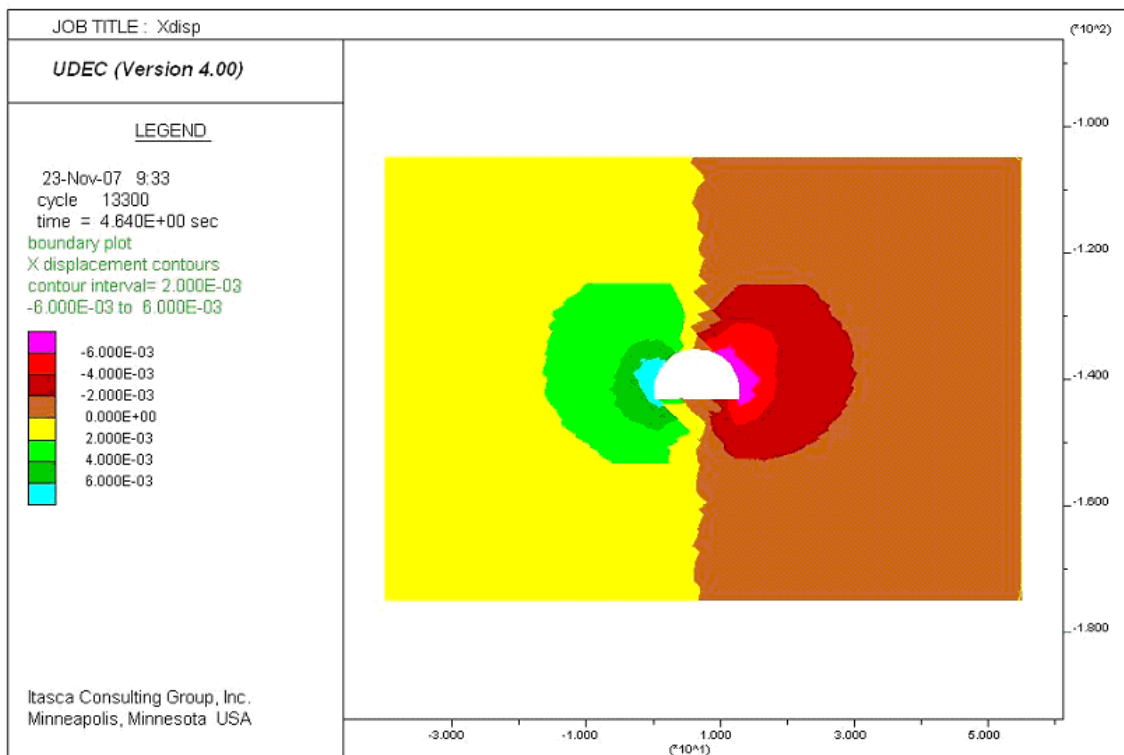
شکل ۶-۲۸- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل، زون Z_5 ، پس از نصب شاتکریت+پیچسنگ

شکل ۶-۲۹- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و پیچسنگ به قطر ۲۵ میلی‌متر و طول ۵ متر و به فاصله ۱/۵ متر و قاب فلزی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حدود ۹ میلی‌متر و در تاج تونل نیز نشست در حدود ۹ میلی‌متر دیده می‌شود.

شکل ۶-۳۰- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z_5 ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت و پیچسنگ و قاب) استفاده شده است را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل دیده می‌شود جابجائی‌هایی در حد ۶ میلی‌متر رخ می‌دهد.



شکل ۶-۲۹- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل، زون Zs، پس از نصب شاتکریت و پیچ‌سنگ و قاب



شکل ۶-۳۰- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل، زون Zs، پس از نصب شاتکریت و پیچ‌سنگ و قاب

۶-۴-۴- ناحیه ساختاری Z₇

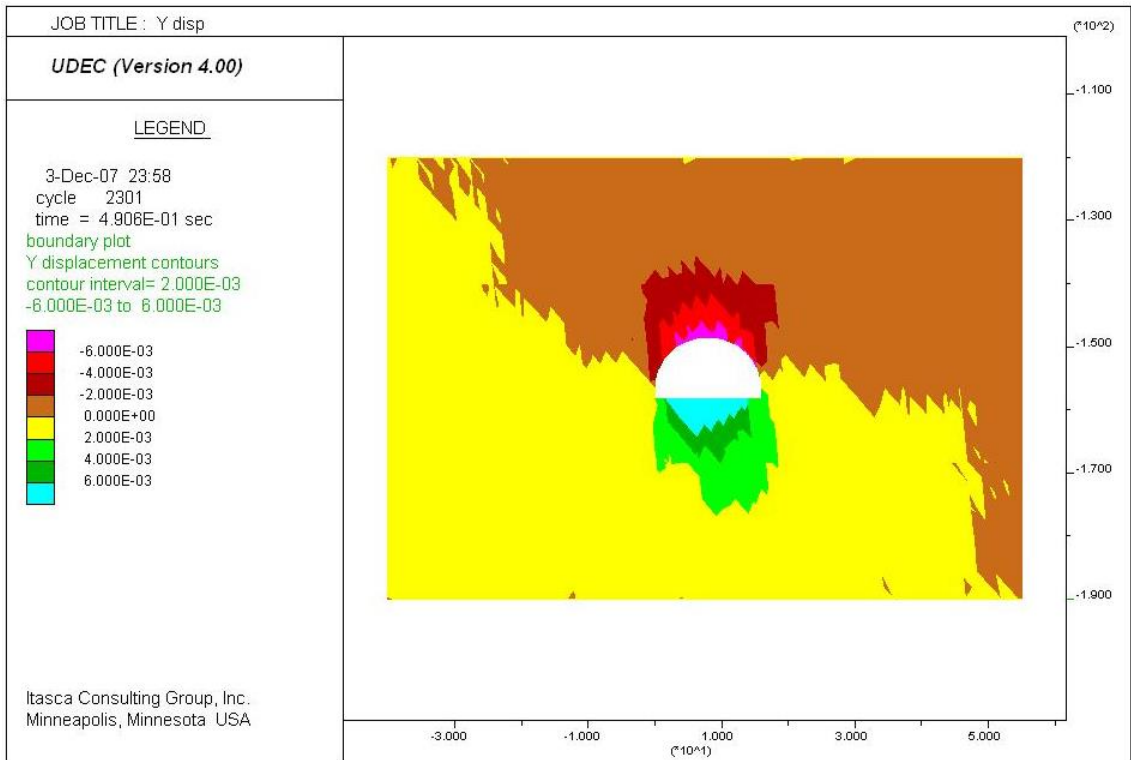
در ناحیه ساختاری Z₇، ۳۲۰ متری دهانه ورودی تونل، ارتفاع روباره تونل ۱۵۰ متر می‌باشد. به علت مشخصات خوب سنگ در زون Z₇، علی‌رغم وجود روباره زیاد، حفاری در این مقطع جابجائی‌های بزرگی به وجود نمی‌آورد.

در شکل ۶-۳۱ کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z₇، در ۳۲۰ متری از دهانه ورودی دیده می‌شود. همانطور که از شکل مشخص است، در کف تونل بالا آمدگی در حدود ۶ میلی‌متر و در تاج تونل نیز نشست در حدود ۶ میلی‌متر رخ داده است.

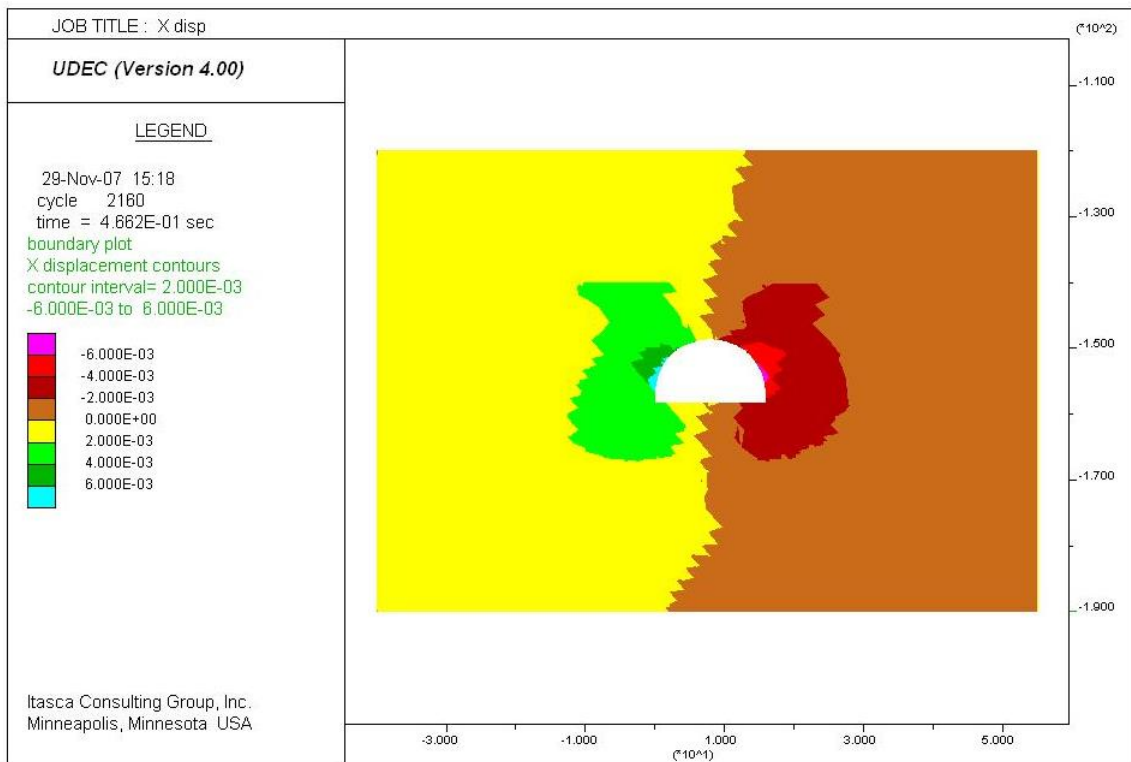
در شکل ۶-۳۲ کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z₇، در ۳۲۰ متری از دهانه ورودی دیده می‌شود. همانطور که از شکل پیداست جابجائی‌هایی به بزرگی ۶ میلی‌متر رخ می‌دهد که علی‌رغم روباره زیاد نشان دهنده جنس خوب سنگ در این ناحیه می‌باشد.

در شکل ۶-۳۳ کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z₇، در ۳۲۰ متری از دهانه ورودی دیده می‌شود. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و سطح آنها پایین و در حد ۱۰۰۰-۱۵۰۰، در کف تونل سطح تنش‌ها پایین و در حد ۱۰۰۰-۲۰۰۰ و در دیواره سطح تنش‌ها در حد ۳۰۰۰-۴۵۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد.

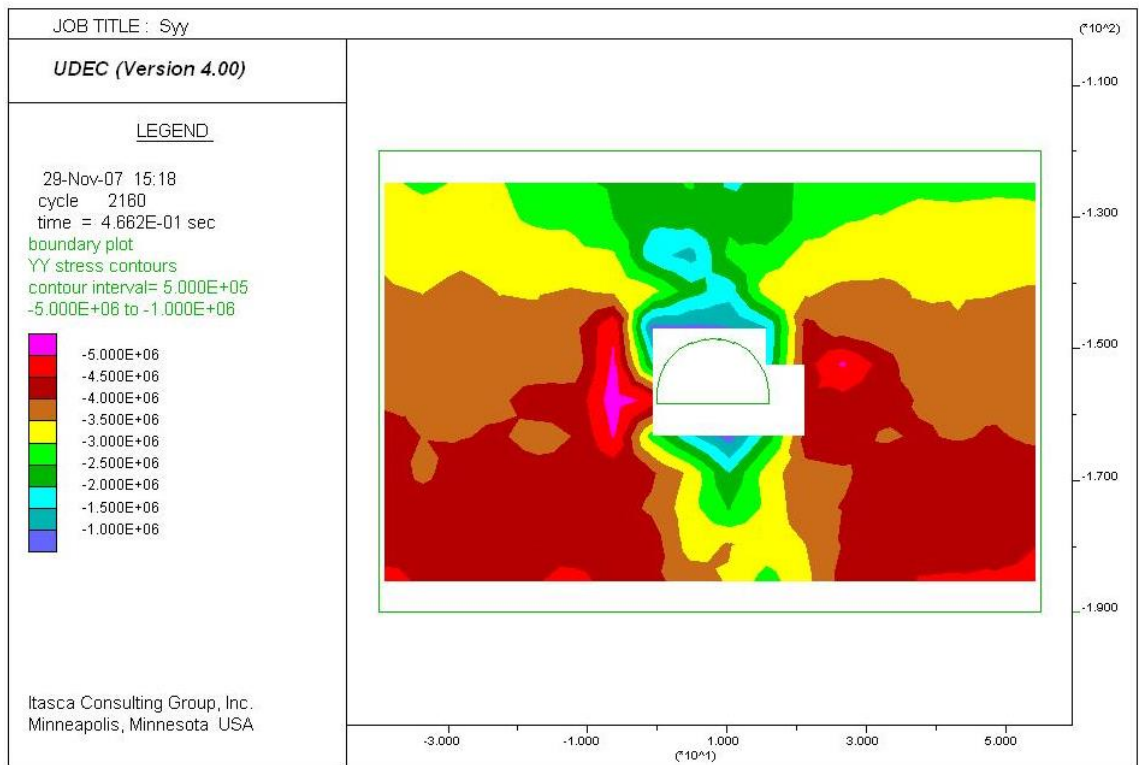
در شکل ۶-۳۴ تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل دیده می‌شود. همانگونه که از شکل پیداست مدل در این ناحیه وارد حالت پلاستیک نمی‌شود.



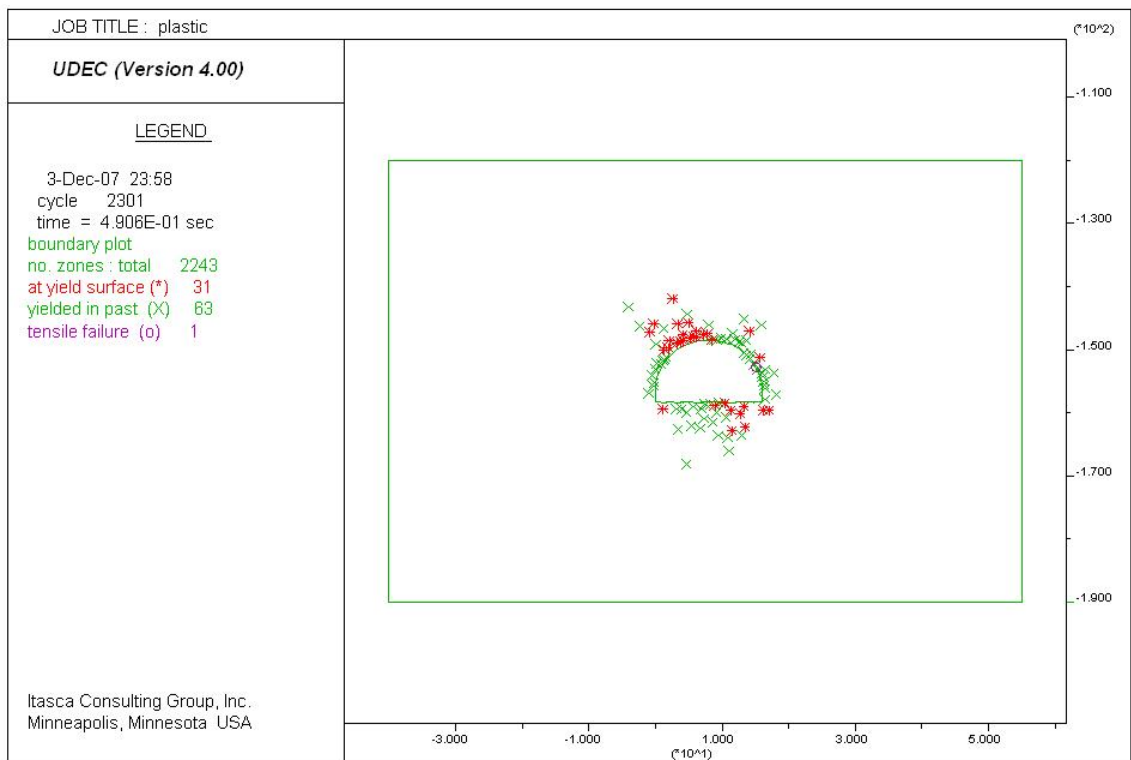
شکل ۶-۳۱- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z_7 ، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل



شکل ۶-۳۲- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z_7 ، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل



شکل ۶-۳۳- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_7 ، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل



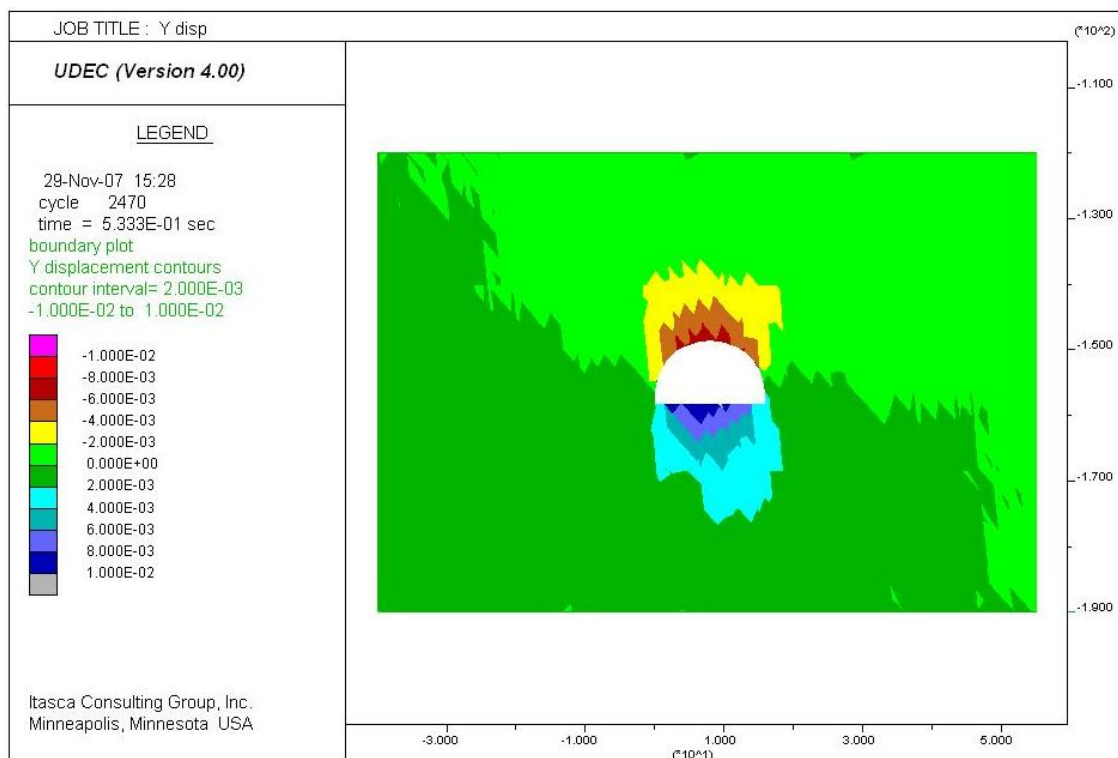
شکل ۶-۳۴- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_7 ، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل

شکل ۶-۳۵ کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z₇، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حد ۸ میلی‌متر و در تاج تونل نشست در حد ۶ میلی‌متر دیده می‌شود.

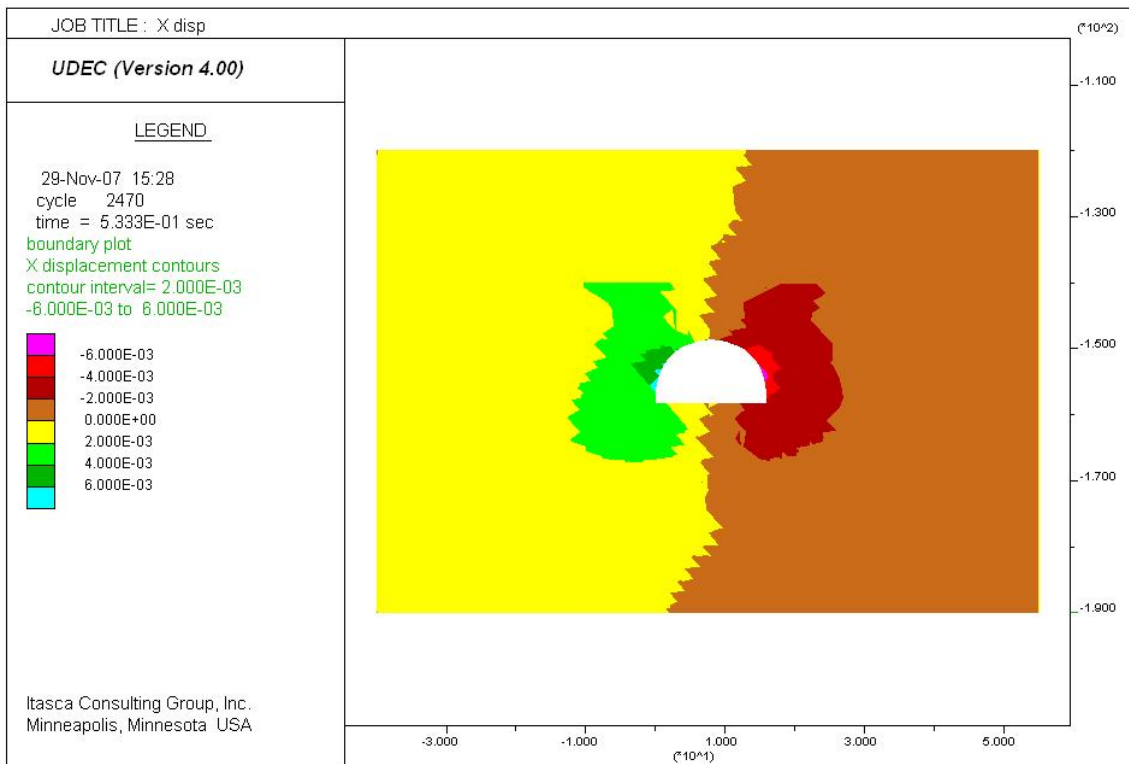
شکل ۶-۳۶ کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z₇، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل دیده می‌شود جابجائی‌هایی در حد ۴ میلی‌متر رخ می‌دهد.

شکل ۶-۳۷ کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z₇، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و در حد ۱۰۰۰-۲۰۰۰، در کف تونل در حد ۱۰۰۰-۲۰۰۰ و در دیواره در حد ۲۰۰۰-۴۵۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد.

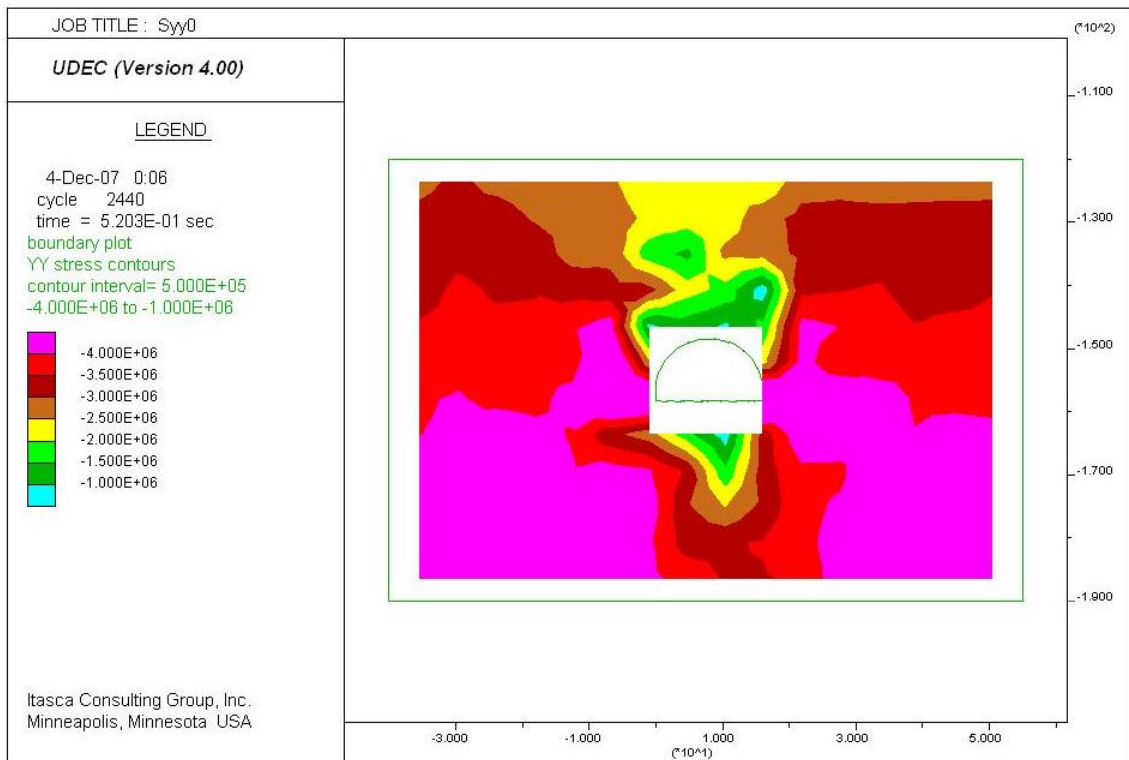
شکل ۶-۳۸ تشکیل نقاط پلاستیک در اطراف تونل را نشان می‌دهد که مشابه حالت بدون نگهدارنده، مدل وارد حالت پلاستیک نمی‌شود.



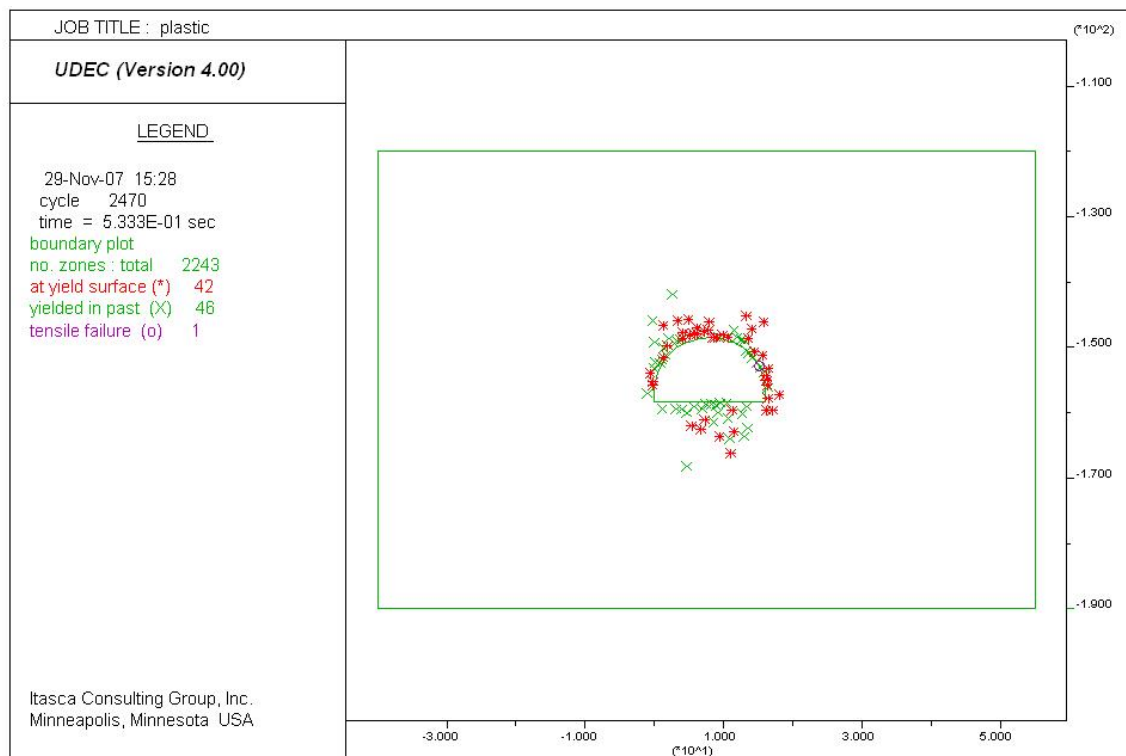
شکل ۶-۳۵- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل، زون Z₇، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل، پس از نصب شاتکریت



شکل ۶-۳۶- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z7، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل، پس از نصب شانکریت



شکل ۶-۳۷- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل، زون Z7، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل، پس از نصب شانکریت



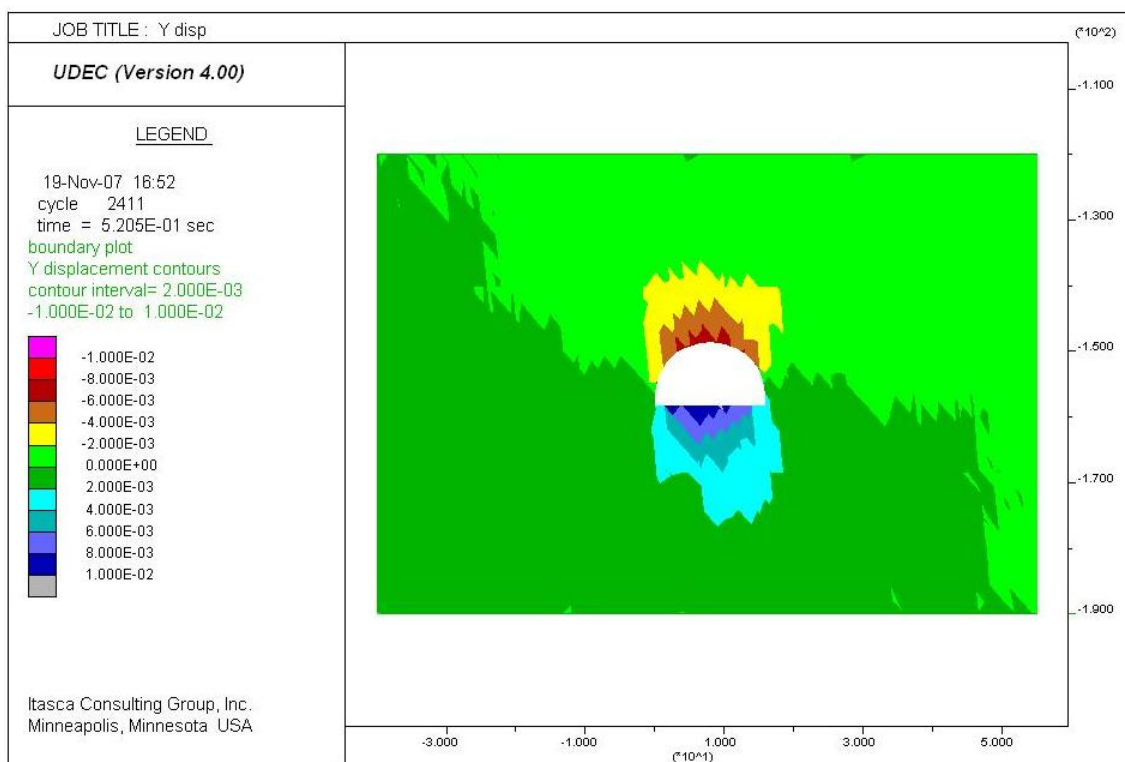
شکل ۶-۳۸- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل، زون Z₇، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل، پس از نصب شاتکریت

شکل ۶-۳۹- کنترل جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z₇، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت+پیچ سنگ) استفاده شده است را نشان می دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حد ۸ میلی متر و در تاج تونل نشست در حد ۶ میلی متر دیده می شود.

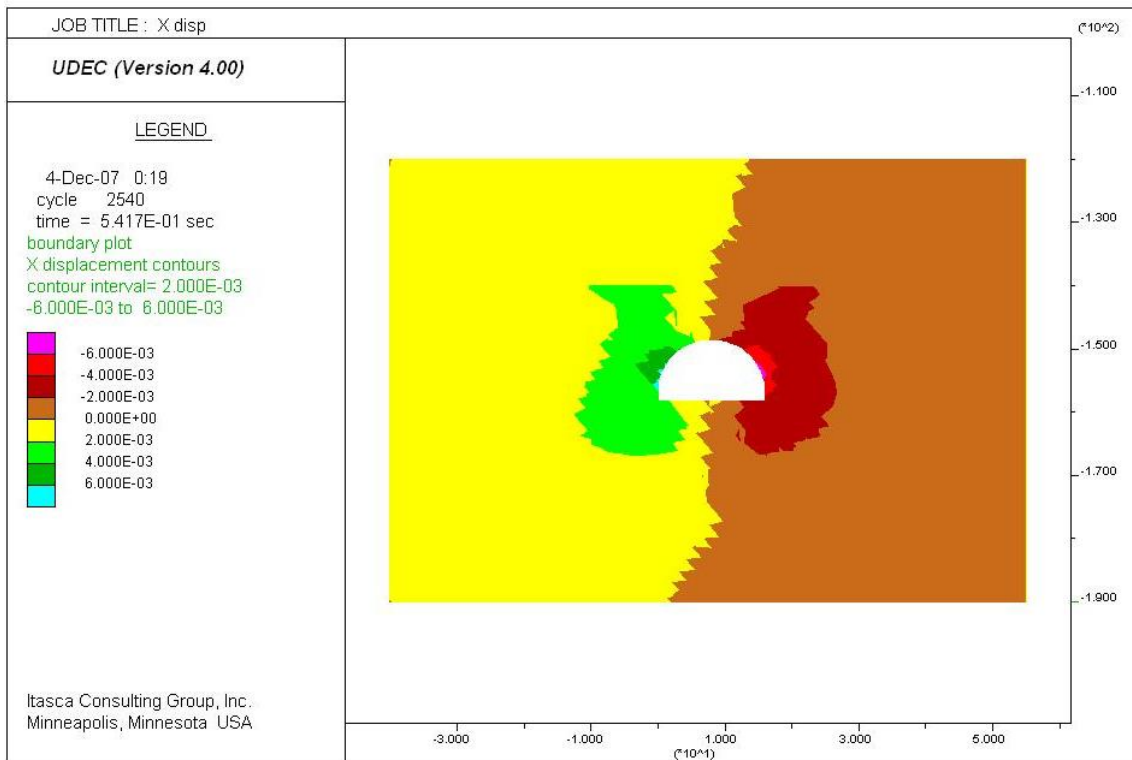
شکل ۶-۴۰- کنترل جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z₇، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت+پیچ سنگ) استفاده شده است را نشان می دهد. همانطور که از شکل دیده می شود جابجائی هایی در حد ۴ میلی متر رخ می دهد.

شکل ۶-۴۱- کنترل تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z₇، ۳۲۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت+پیچ سنگ) استفاده شده است را نشان می دهد. در تاج تونل تنش ها فشاری بوده و در حد ۱۰۰۰-۲۰۰۰، در کف تونل در حد ۱۰۰۰-۲۰۰۰ و در دیواره در حد ۲۰۰۰-۴۵۰۰ کیلو پاسکال می باشد.

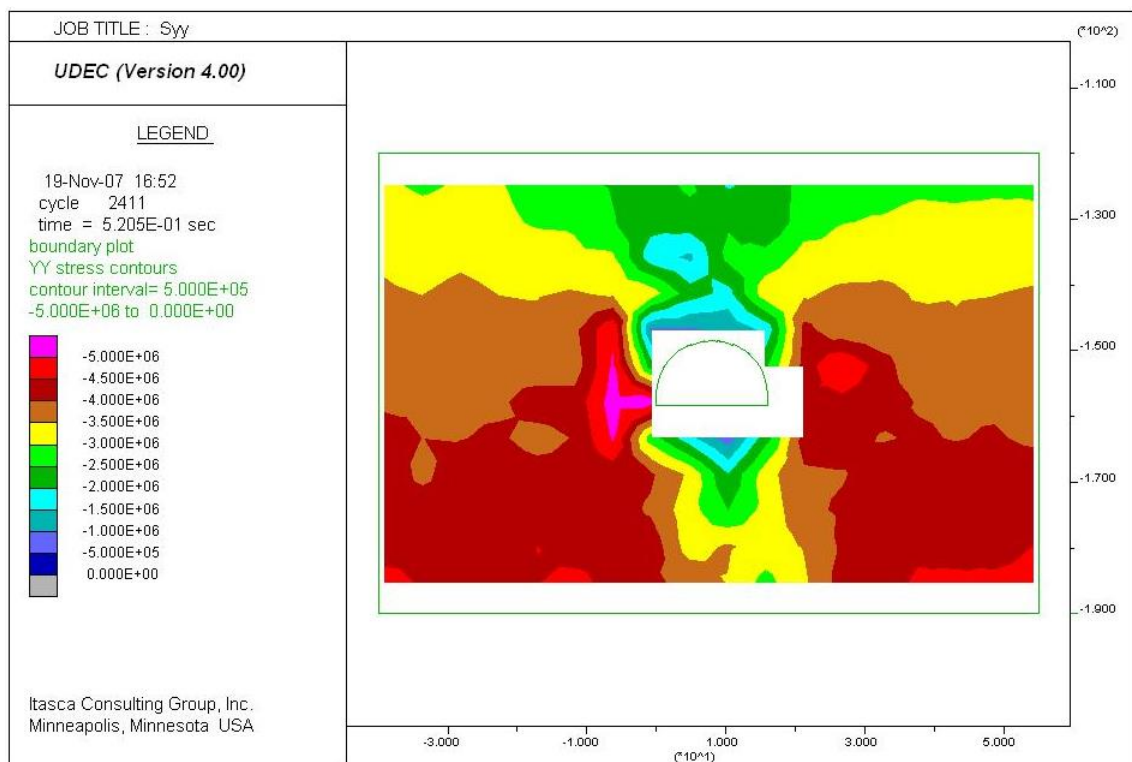
شکل ۶-۴۲ تشکیل نقاط پلاستیک در اطراف تونل را نشان می‌دهد که مشابه حالت‌های قبلی، مدل وارد حالت پلاستیک نمی‌شود.



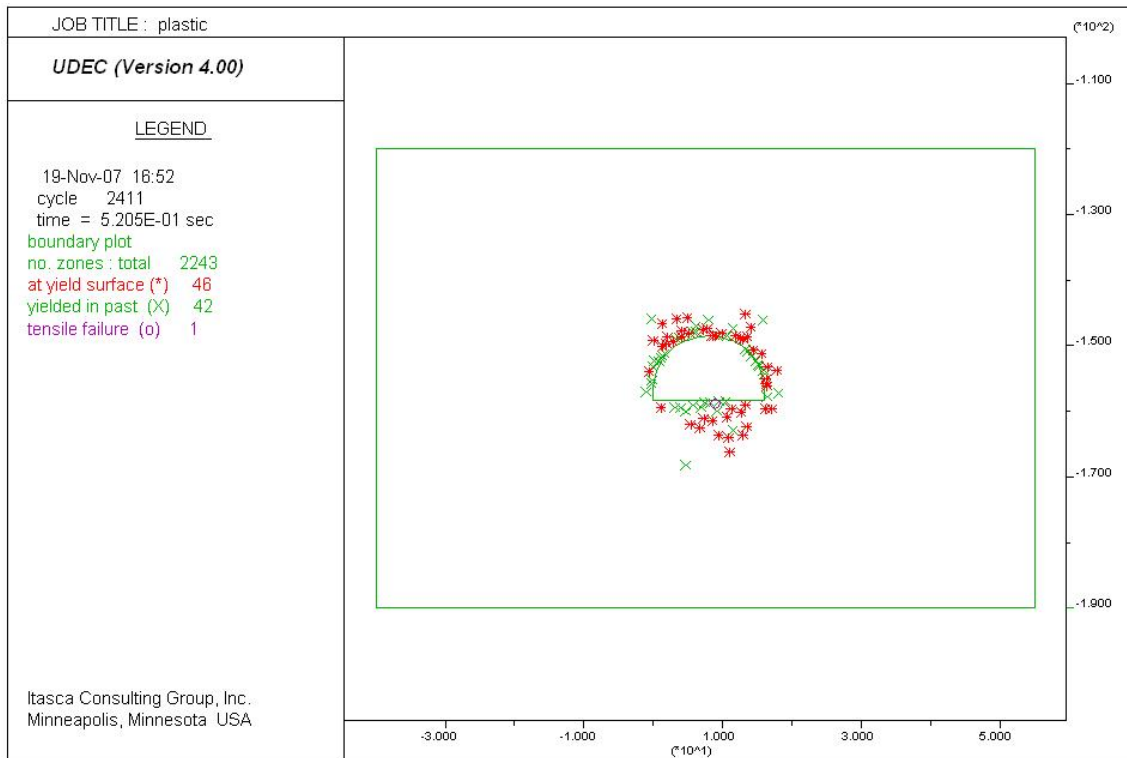
شکل ۶-۳۹- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل، زون Z7، پس از نصب شاتکریت+پیچ‌سنگ



شکل ۶-۴۰- کنتور جابجائی لقی در مقطع تونل، زون Z_7 ، پس از نصب شاکریت+پیچ سنگ



شکل ۶-۴۱- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل، زون Z_7 ، پس از نصب شاکریت+پیچ سنگ



شکل ۶-۴۲- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل، زون Z7، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ

۶-۴-۵- ناحیه ساختاری Z₁₃

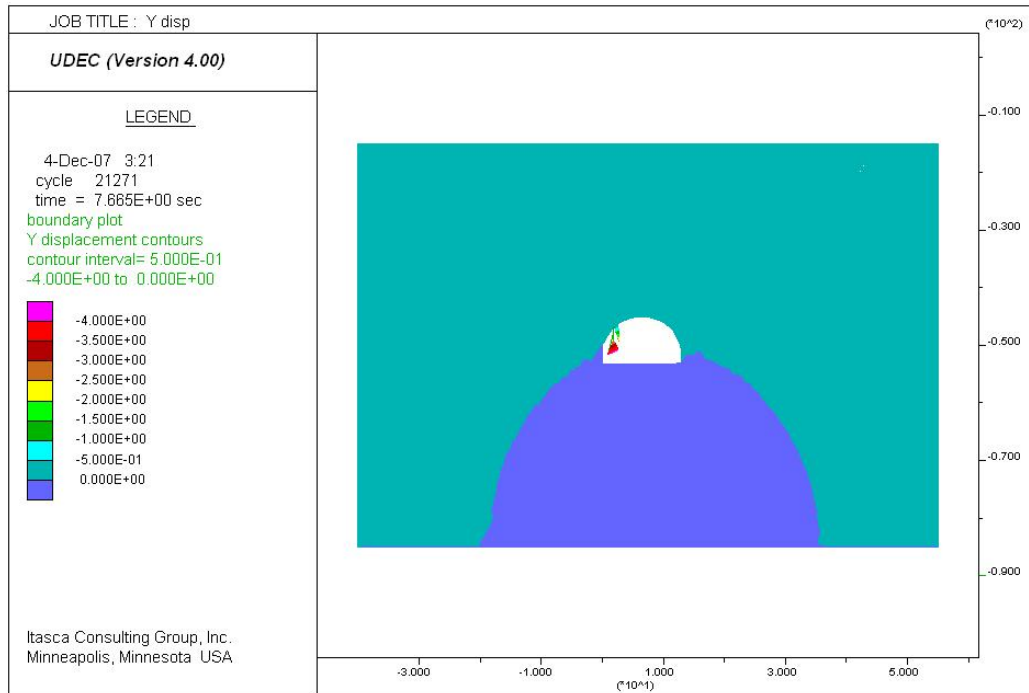
در ناحیه ساختاری Z₁₃، ۱۰۰ متری دهانه خروجی تونل، ارتفاع روباره تونل ۴۵ متر است. به علت مشخصات ضعیف سنگ در زون Z₁₃، علی‌رغم وجود روباره کم، حفاری در این مقطع جابجائی‌های بزرگی به وجود می‌آورد.

در شکل ۶-۴۳ کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z₁₃، در ۱۰۰ متری از دهانه خروجی دیده می‌شود. همانطور که از شکل مشخص است، جنس ضعیف سنگ موجب ریزش در سقف شده است.

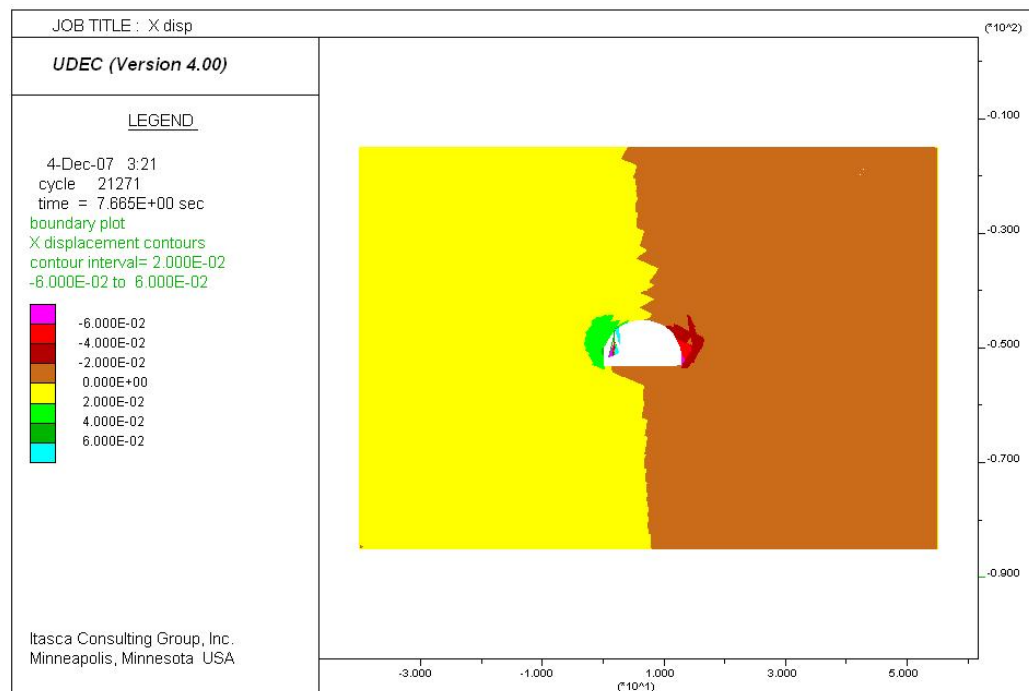
در شکل ۶-۴۴ کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z₁₃، در ۱۰۰ متری از دهانه خروجی دیده می‌شود.

در شکل ۶-۴۵ کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z₁₃، در ۱۰۰ متری از دهانه خروجی دیده می‌شود. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و سطح آنها پایین و در حد ۲۰۰-۴۰۰، در کف تونل سطح تنش‌ها پایین و در حد ۴۰۰-۸۰۰ و در دیواره سطح تنش‌ها در حد ۶۰۰-۱۰۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد.

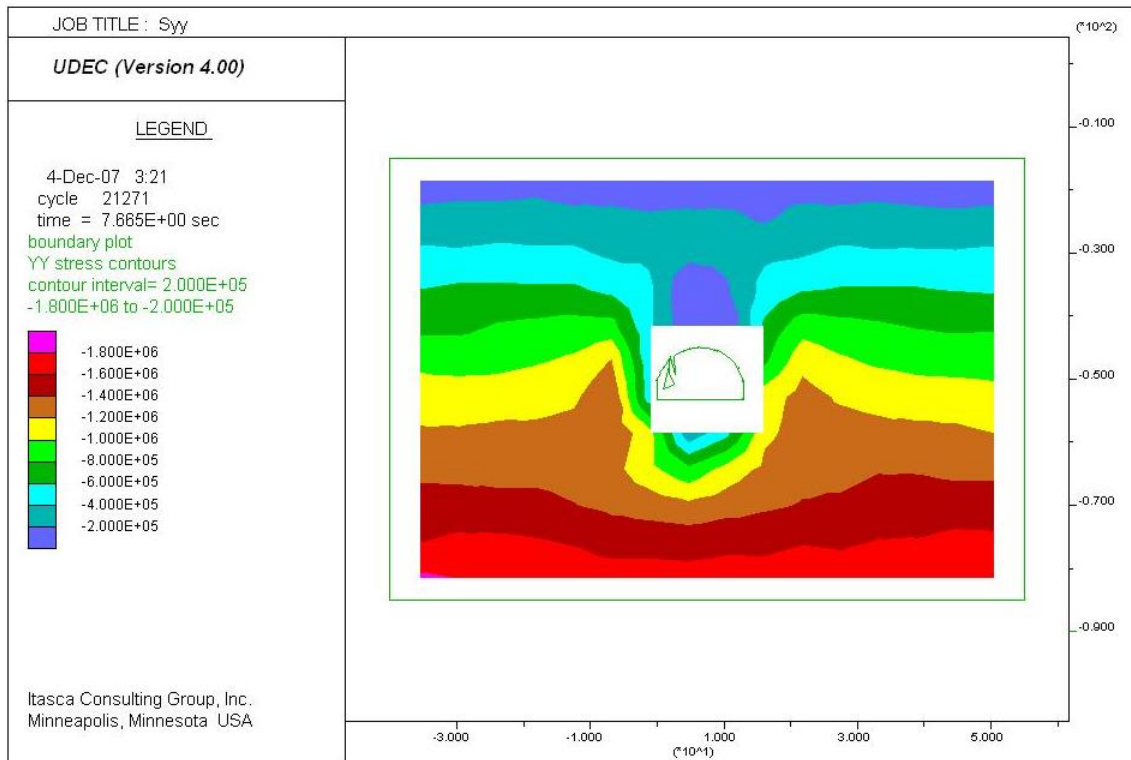
در شکل ۶-۴۶ تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل دیده می‌شود.



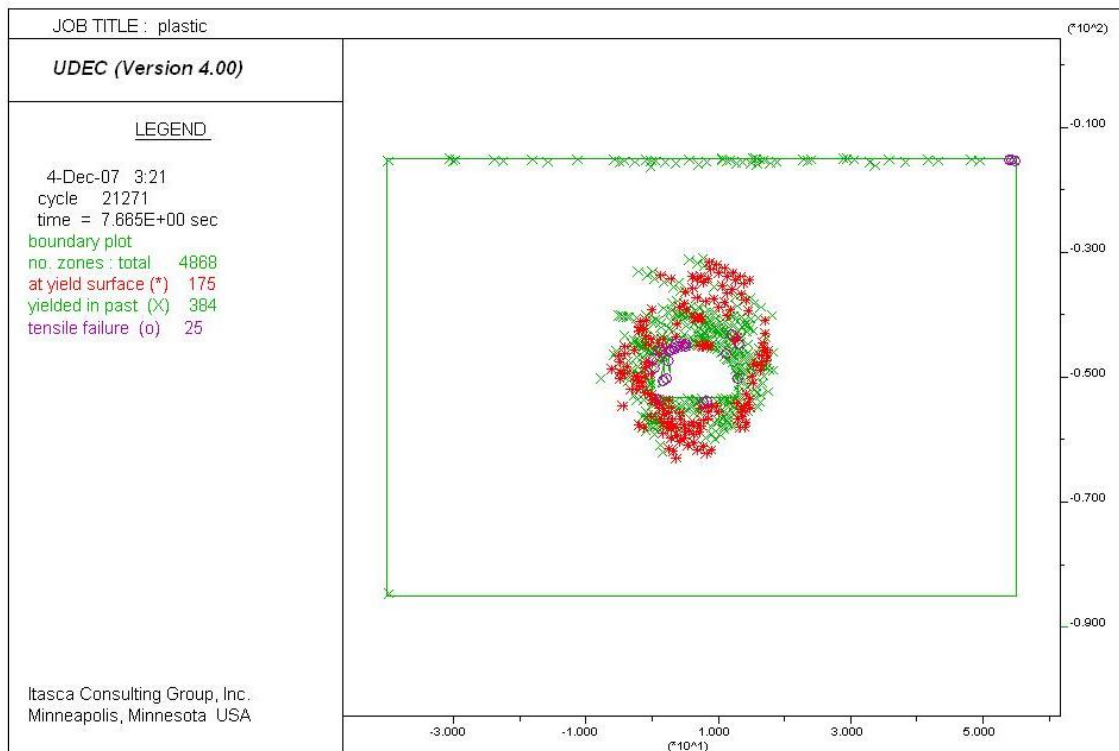
شکل ۶-۴۳- کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z13، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی



شکل ۶-۴۴- کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z13، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی



شکل ۶-۴۵- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی



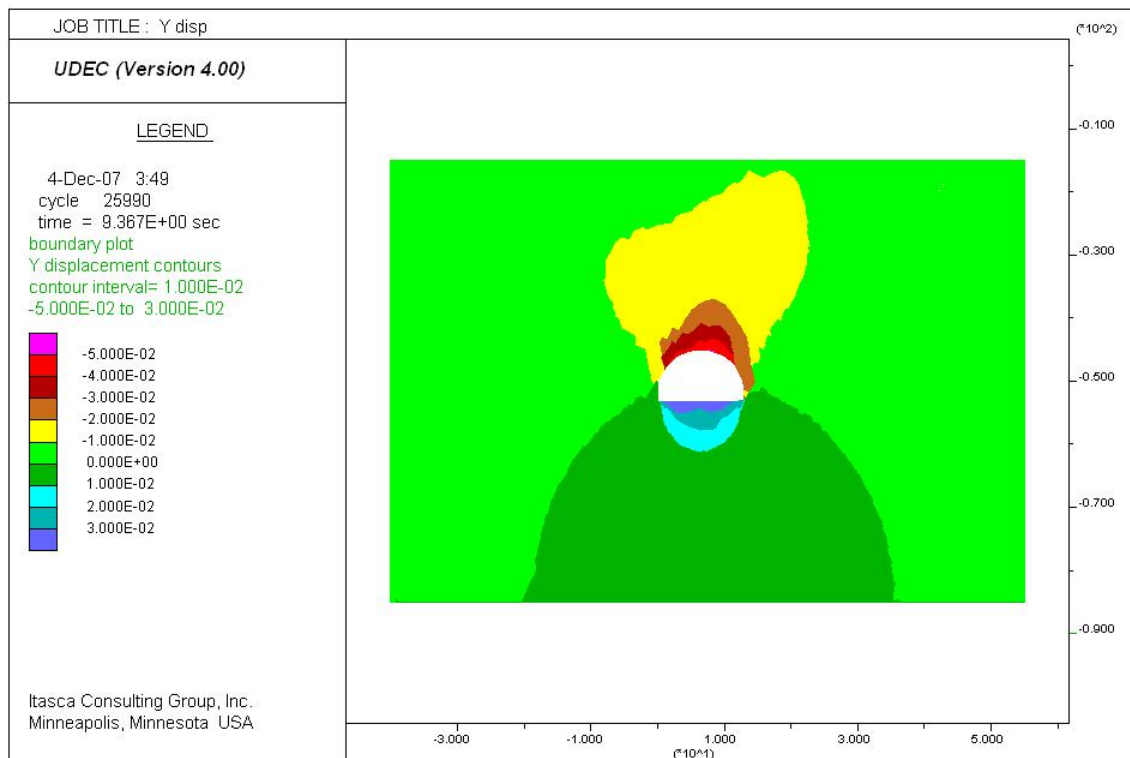
شکل ۶-۴۶- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی

شکل ۶-۴۷ کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده کرده‌ایم، نشان می‌دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حد ۲ سانتی‌متر و در تاج تونل نشست در حد ۵ سانتی‌متر دیده می‌شود.

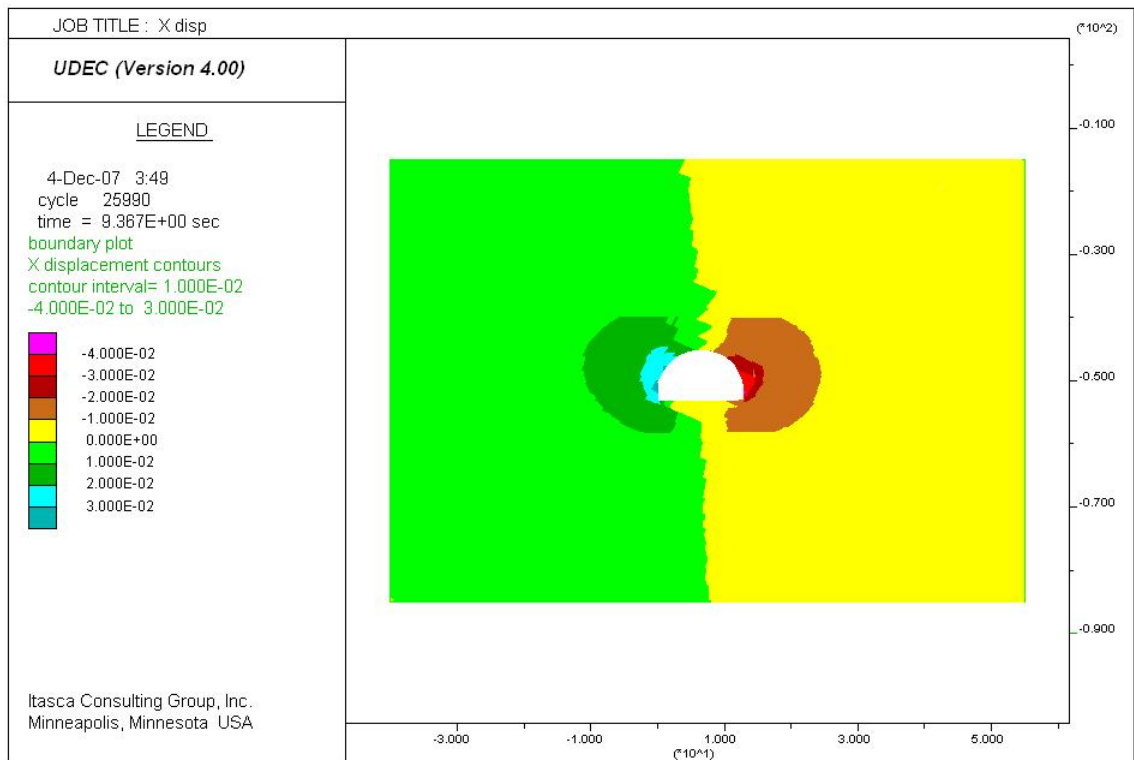
شکل ۶-۴۸ کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده کرده‌ایم، نشان می‌دهد. همانطور که از شکل دیده می‌شود جابجایی‌هایی در حد ۴ سانتی‌متر رخ می‌دهد.

شکل ۶-۴۹ کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده کرده‌ایم، نشان می‌دهد. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و در حد ۲۰۰-۶۰۰، در کف تونل در حد ۲۰۰-۸۰۰ و در دیواره در حد ۸۰۰-۱۲۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد.

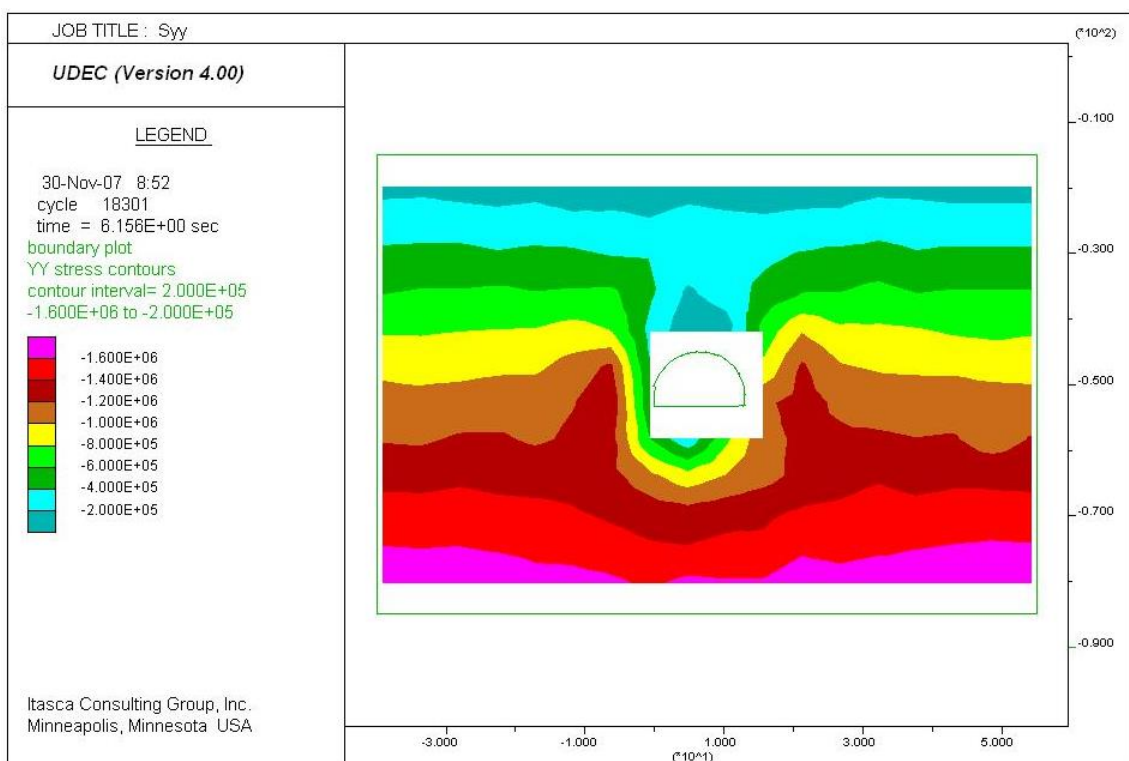
شکل ۶-۵۰ تشکیل نقاط پلاستیک در اطراف تونل را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست تشکیل نقاط پلاستیک در تاج تونل دیده می‌شود.



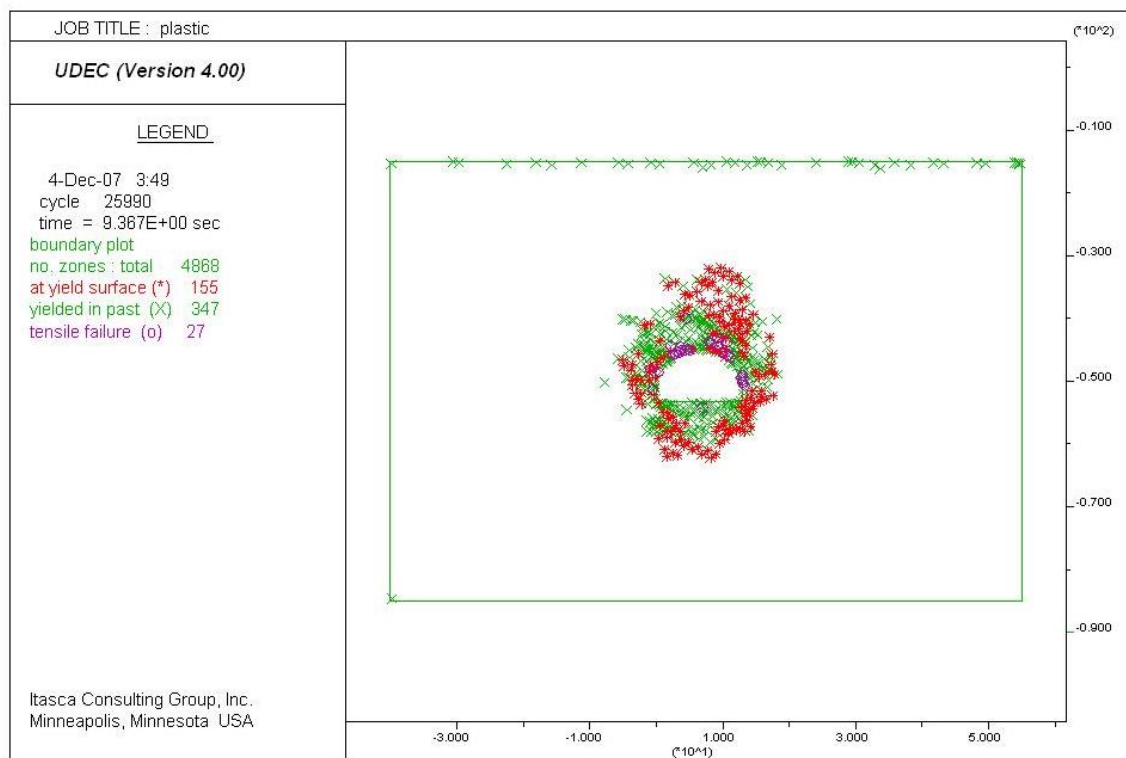
شکل ۶-۴۷- کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی، پس از نصب شاتکریت



شکل ۶-۴۸- کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی، پس از نصب شاتکریت



شکل ۶-۴۹- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی، پس از نصب شاتکریت



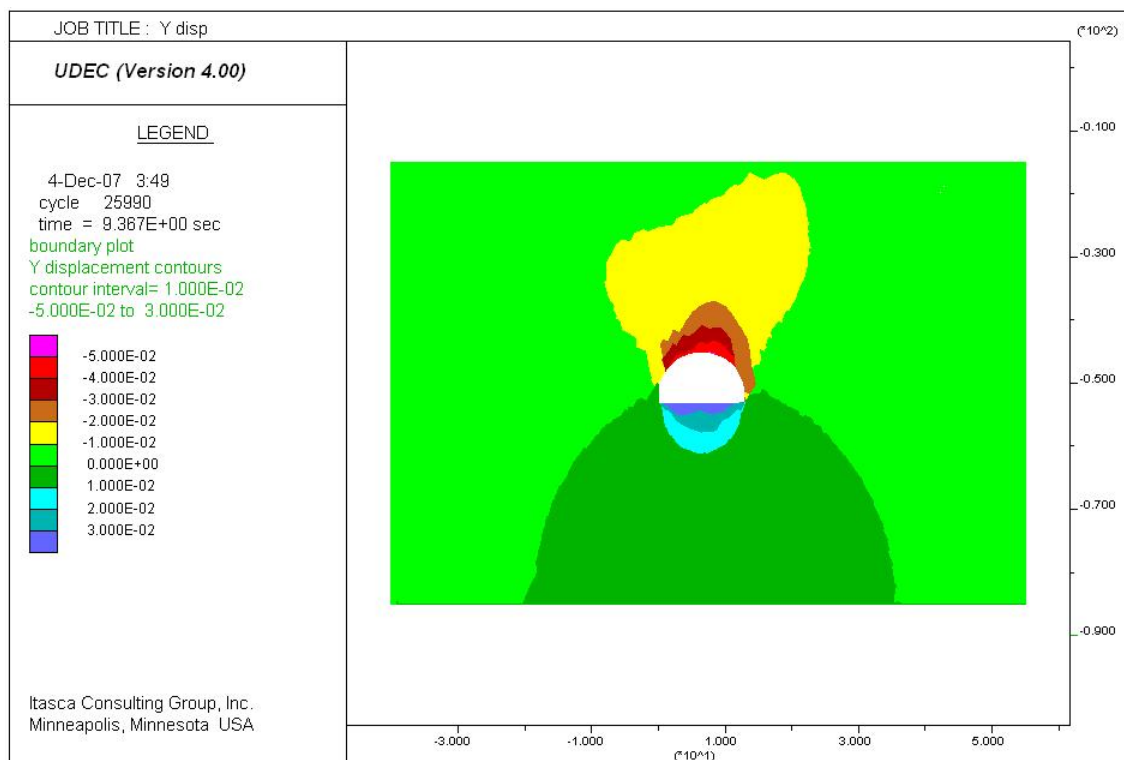
شکل ۶-۵- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی، پس از نصب شاتکریت

شکل ۶-۵۱- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت+پیچ‌سنگ) استفاده کرده‌ایم، نشان می‌دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حد ۳ سانتی‌متر و در تاج تونل نشست در حد ۴ سانتی‌متر دیده می‌شود.

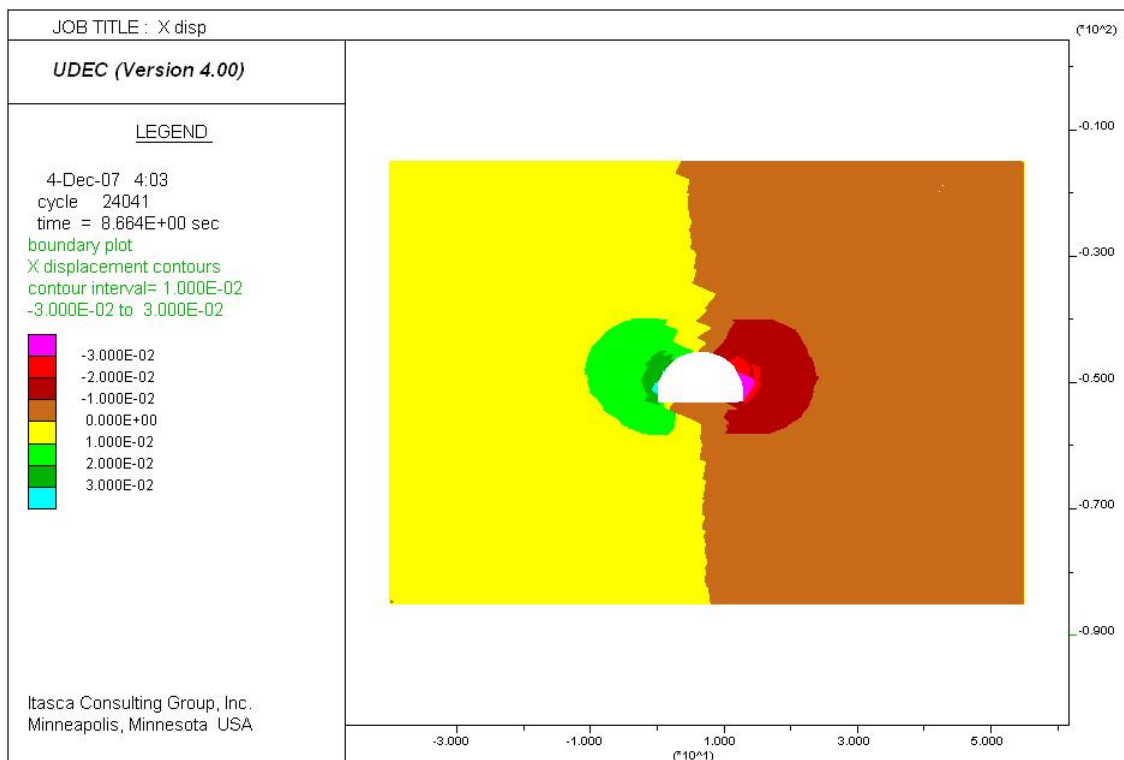
شکل ۶-۵۲- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت+پیچ‌سنگ) استفاده کرده‌ایم، نشان می‌دهد. همانطور که از شکل دیده می‌شود جابجائی‌هایی در حد ۳ سانتی‌متر رخ می‌دهد.

شکل ۶-۵۳- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۱۰۰ متری از دهانه خروجی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت+پیچ‌سنگ) استفاده کرده‌ایم، نشان می‌دهد. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و در حد ۲۰۰-۶۰۰، در کف تونل در حد ۴۰۰-۸۰۰ و در دیواره در حد ۸۰۰-۱۲۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد.

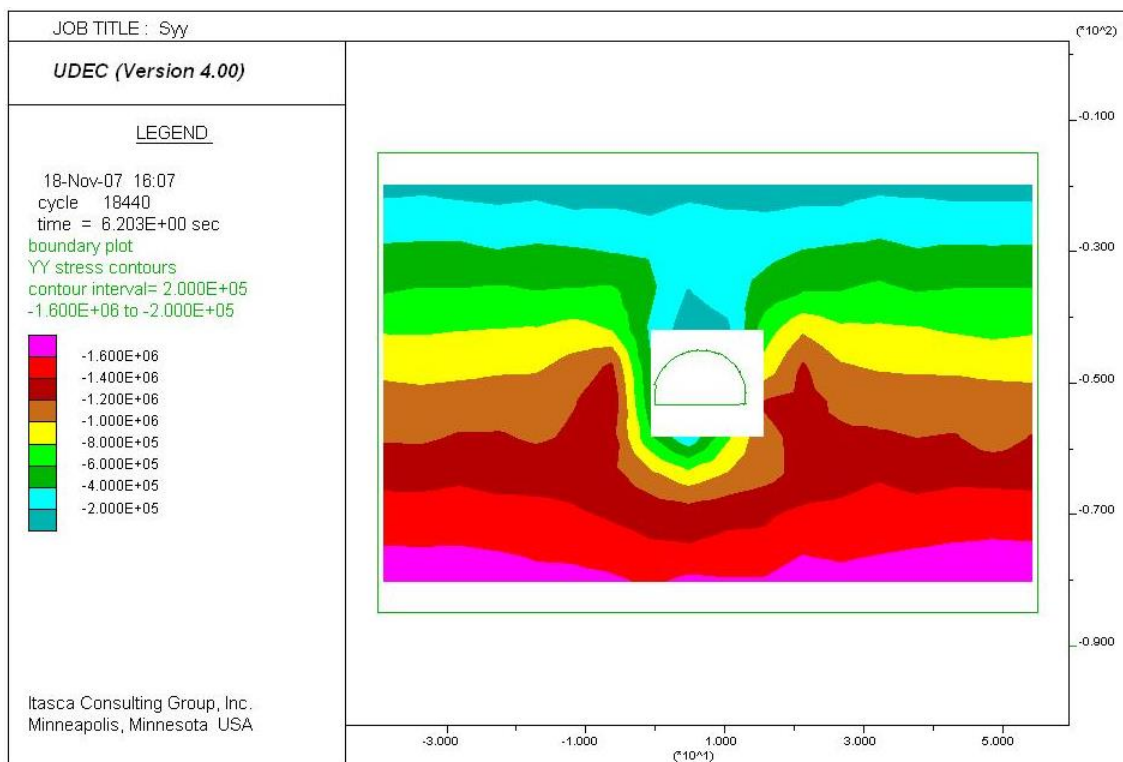
شکل ۶-۵۴ تشکیل نقاط پلاستیک در اطراف تونل را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل پیداست نقاط پلاستیک اطراف تونل کم شده‌اند.



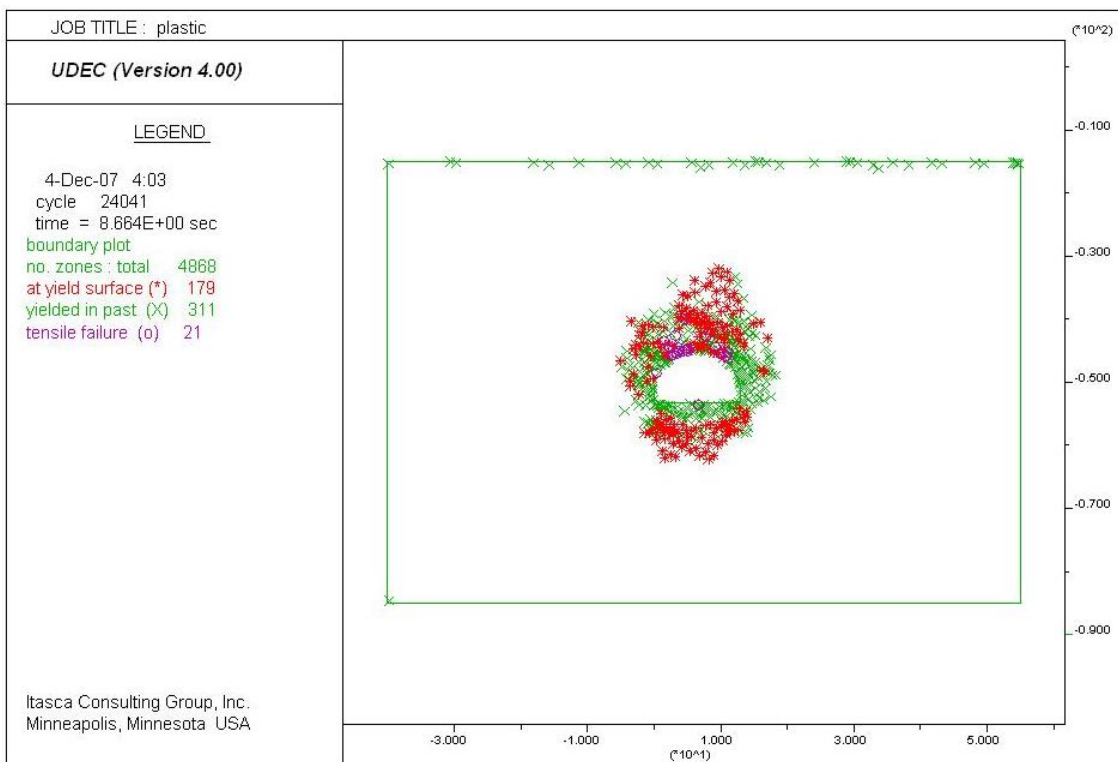
شکل ۶-۵۱- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل، زون Z13، پس از نصب شاتکریت+پیچ‌سنگ



شکل ۶-۵۲- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل، زون Z13، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ



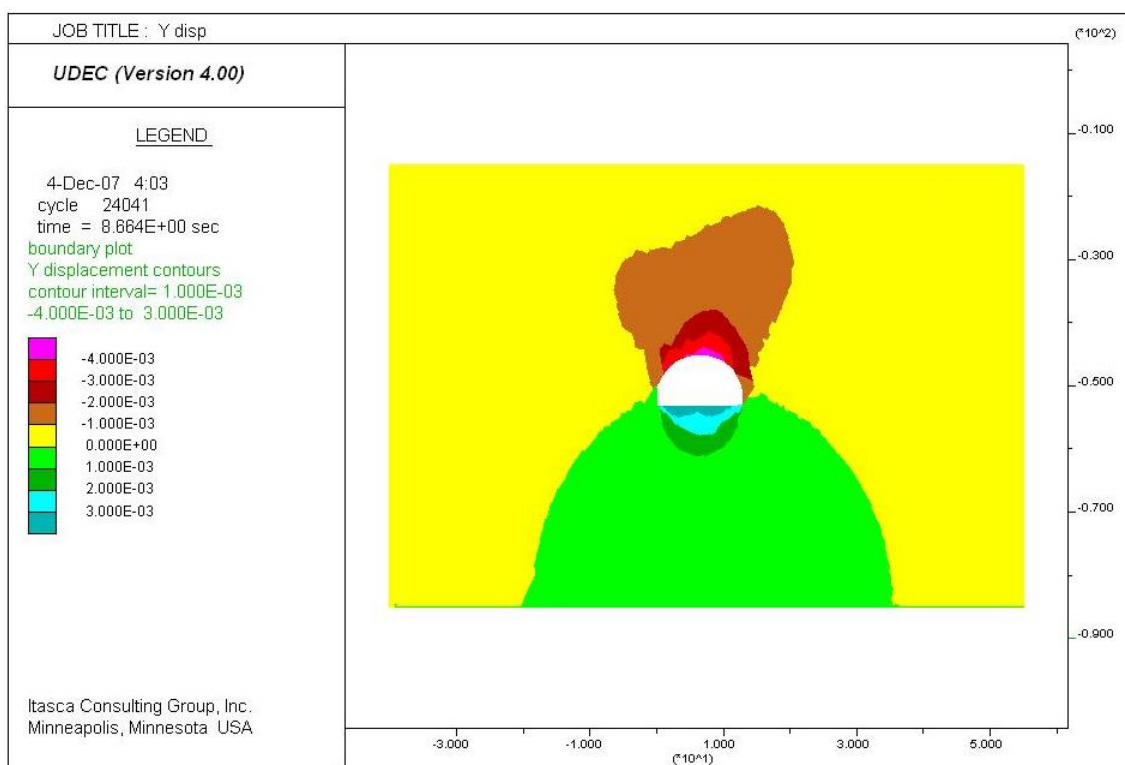
شکل ۶-۵۳- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل، زون Z13، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ



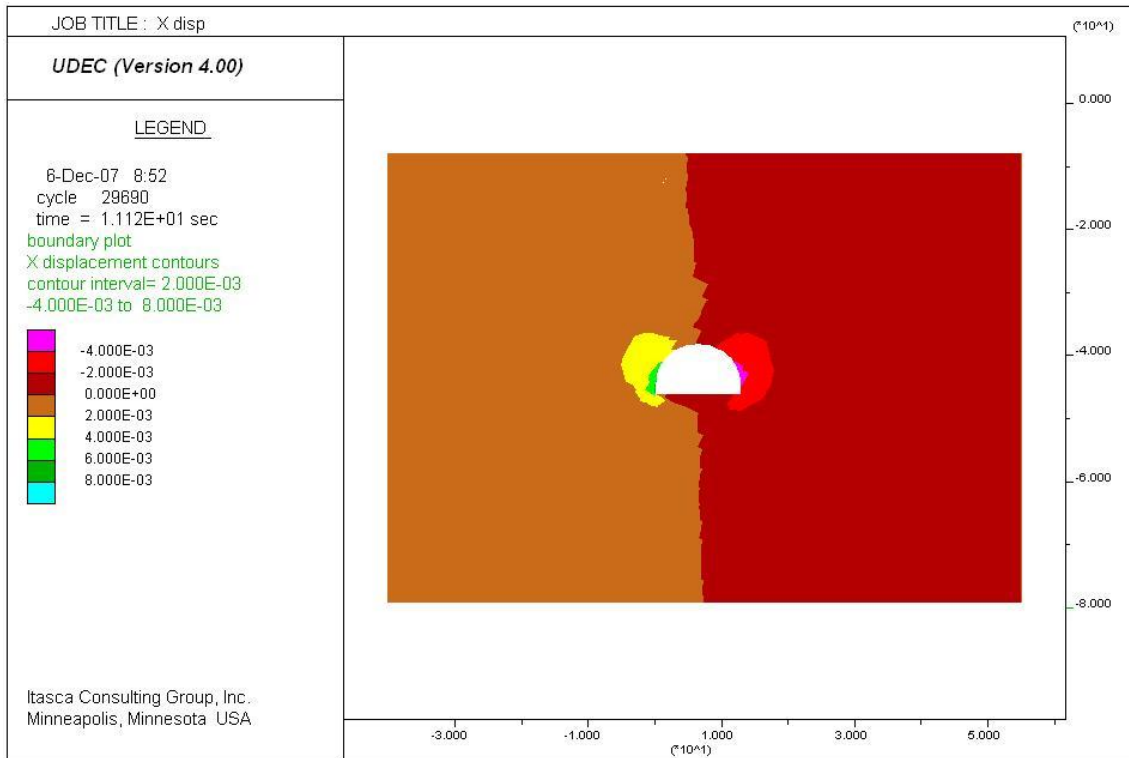
شکل ۶-۵۴- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل، زون Z13، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ

شکل ۵۵-۶ کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و پیچ‌سنگ به قطر ۳۰ میلی‌متر و طول ۵ متر و به فاصله ۱ متر و قاب فلزی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حدود ۳ میلی‌متر و در تاج تونل نیز نشست در حدود ۴ میلی‌متر دیده می‌شود.

شکل ۵۶-۶ کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z_{13} ، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت و پیچ‌سنگ و قاب) استفاده شده است را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل دیده می‌شود جابجائی‌های کوچکی در حد ۶ میلی‌متر رخ می‌دهد.



شکل ۵۵-۶- کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل، زون Z_{13} ، پس از نصب شاتکریت و پیچ‌سنگ و قاب فلزی



شکل ۶-۵۶- کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل، زون Z13، پس از نصب شاتکریت و پیچ سنگ و قاب فلزی

۶-۴-۶- ناحیه ساختاری Z13-2

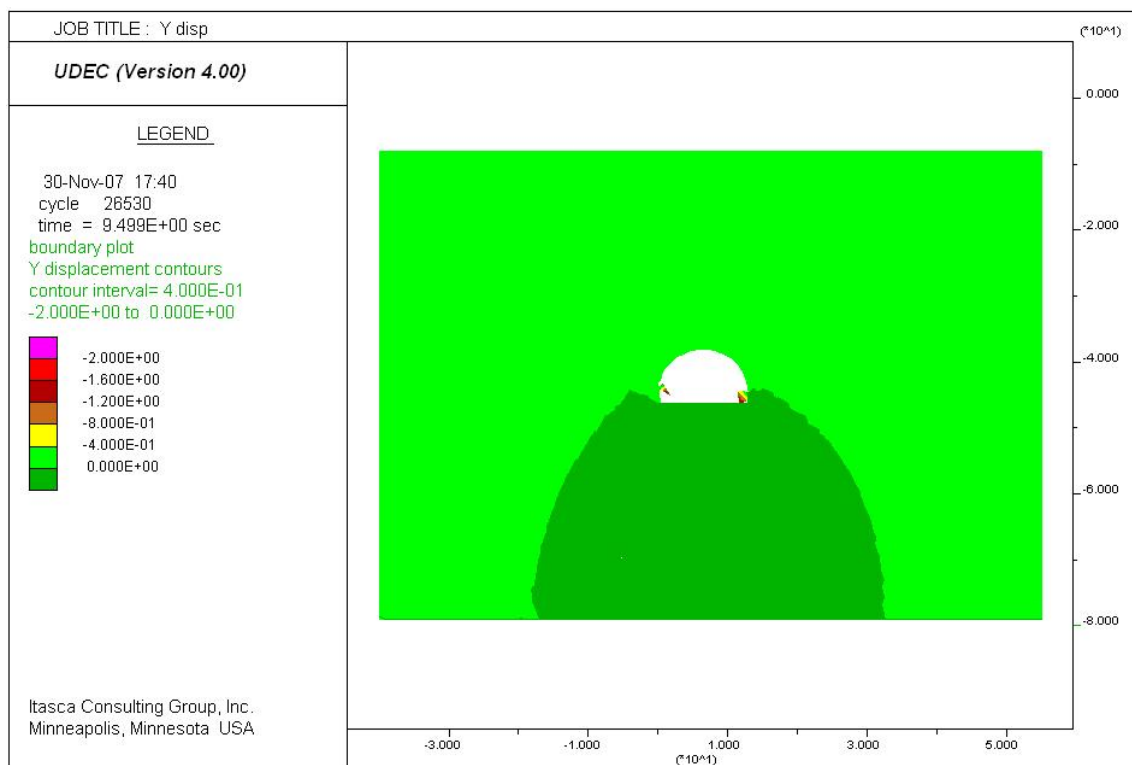
در ناحیه ساختاری Z13-2، دهانه خروجی تونل، ارتفاع روباره تونل ۳۸ متر می‌باشد. و مشخصاتی که برای این مقطع استفاده شده از جدول زمین‌شناسی RMR (فصل چهارم) به دست آمده است. به علت مشخصات ضعیف سنگ در زون Z13-2، علی‌رغم وجود روباره کم، حفاری در این مقطع جابجائی‌های بزرگی به وجود می‌آورد.

در شکل ۶-۵۷ کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z13-2، دهانه خروجی، دیده می‌شود. همانطور که از شکل پیداست، در این مقطع بلافاصله پس از حفاری تونل ریزش در دیواره‌ها اتفاق می‌افتد.

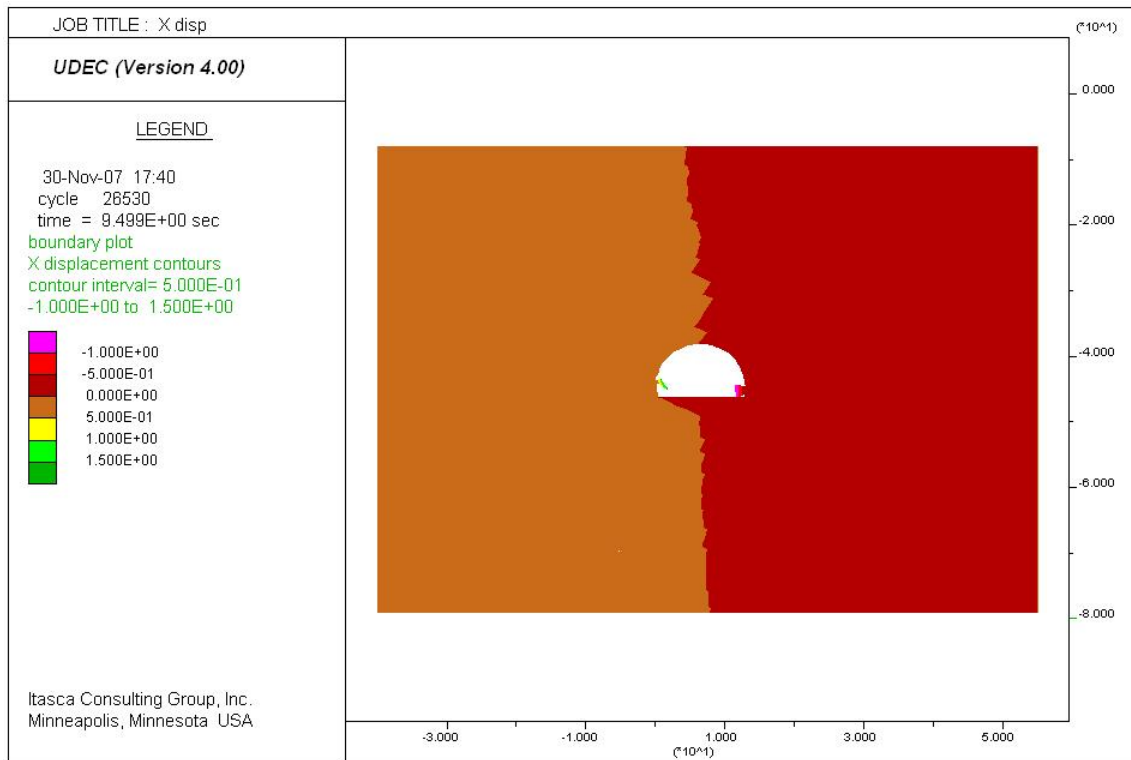
در شکل ۶-۵۸ کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z13-2، دهانه خروجی، دیده می‌شود. همانطور که از شکل پیداست، در این مقطع بلافاصله پس از حفاری تونل ریزش در دیواره‌ها اتفاق می‌افتد.

در شکل ۵۹-۶ کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_{13-2} دهانه خروجی، دیده می‌شود. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و سطح آنها پایین و در حد $۲۰۰-۶۰۰$ ، در کف تونل سطح تنش‌ها پایین و در حد $۱۰۰۰-۴۰۰$ و در دیواره سطح تنش‌ها در حد $۲۰۰-۱۰۰۰$ کیلو پاسکال می‌باشد.

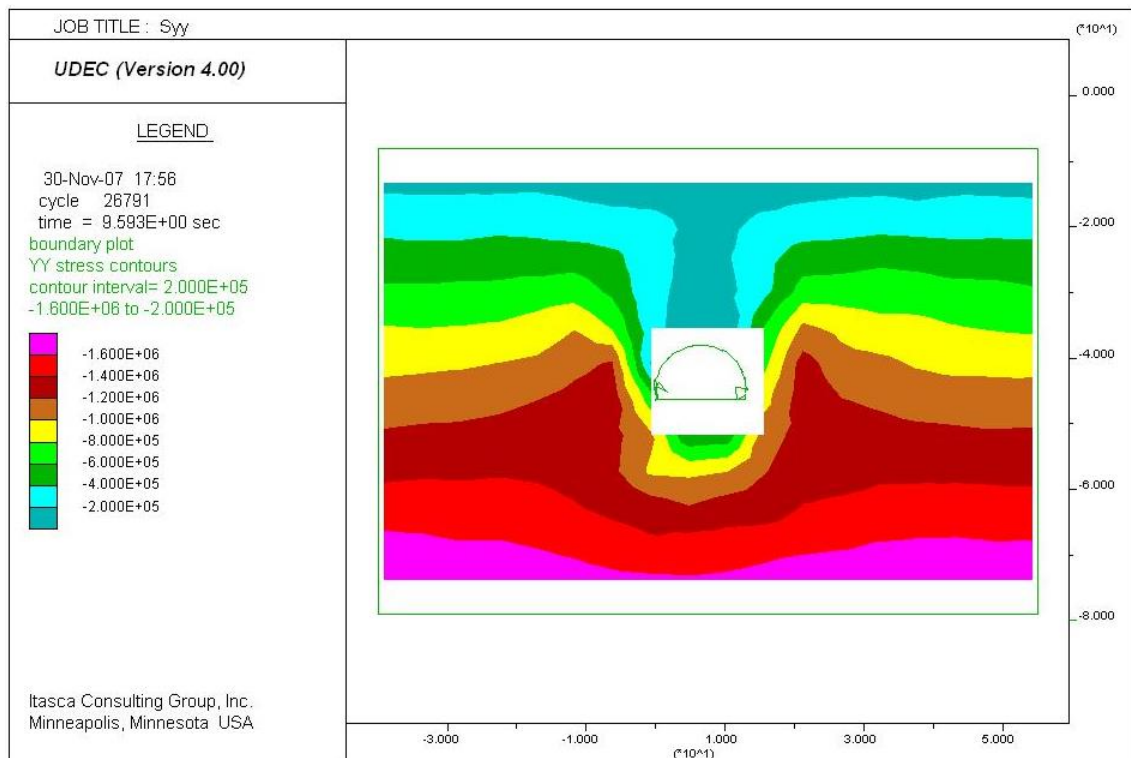
در شکل ۶۰-۶ تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل دیده می‌شود.



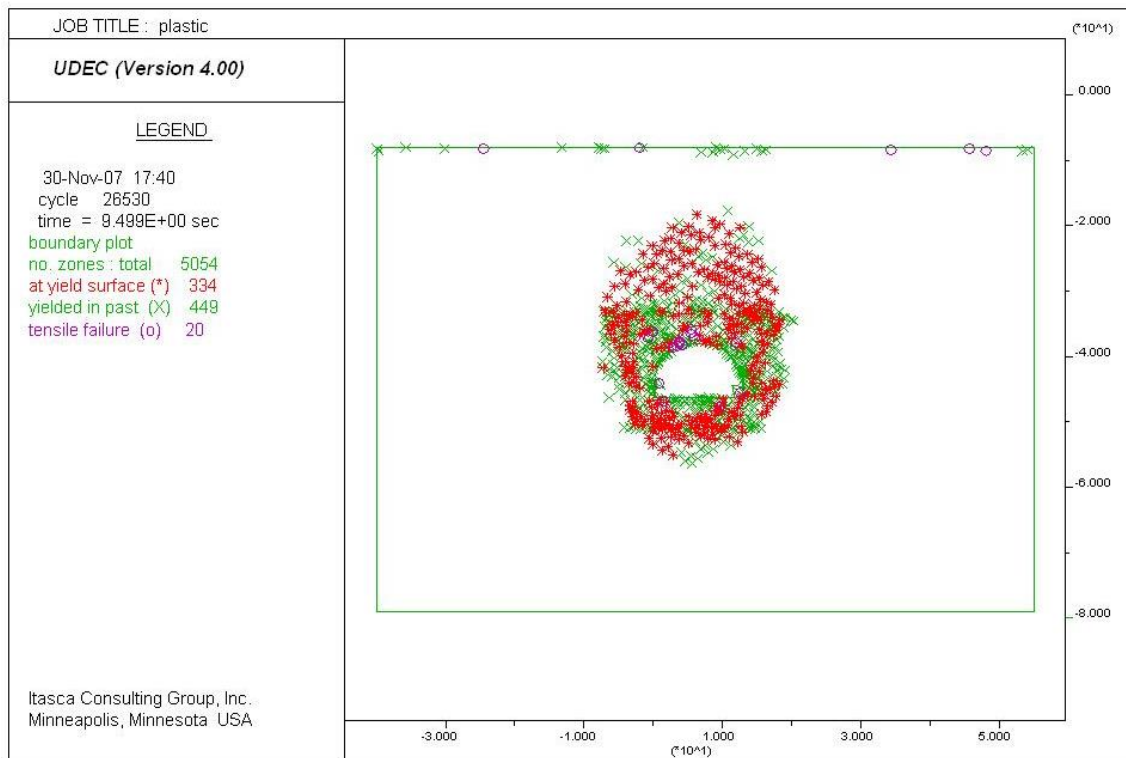
شکل ۶۰-۵۷- کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13-2} دهانه خروجی تونل



شکل ۶-۵۸- کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z13-2، دهانه خروجی تونل



شکل ۶-۵۹- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z13-2، دهانه خروجی تونل



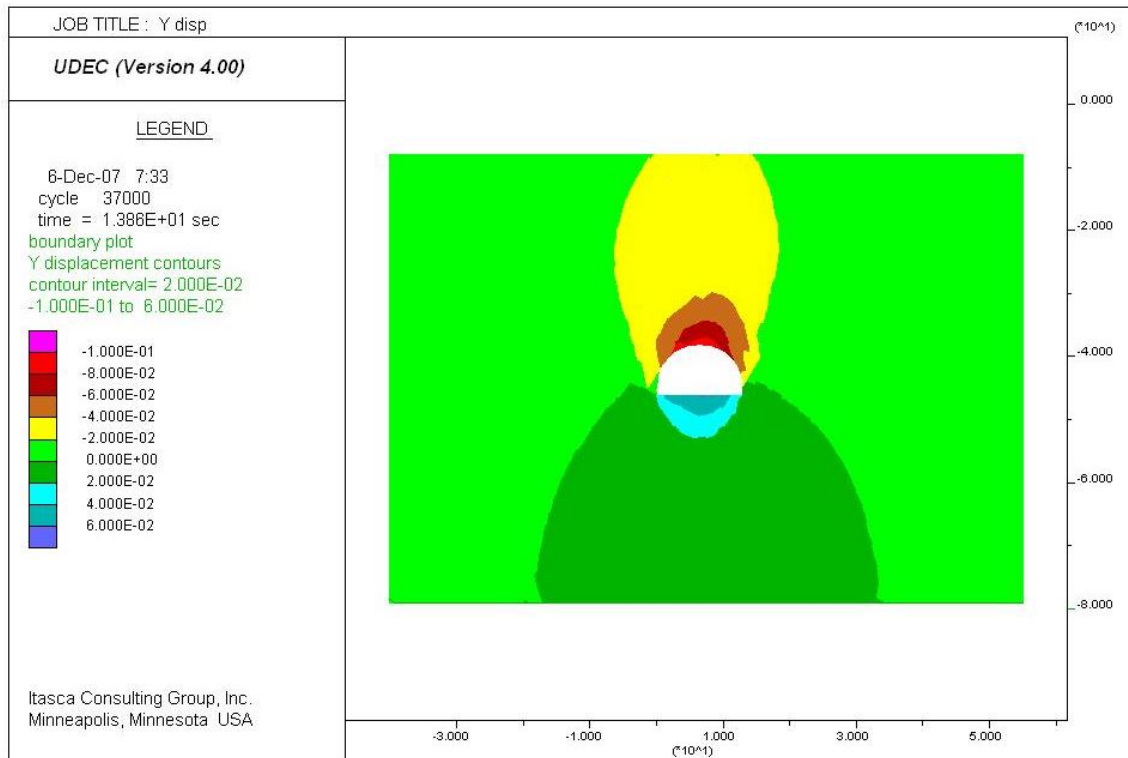
شکل ۶-۶۰- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل

شکل ۶-۶۱ کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حد ۴ سانتی‌متر و در تاج تونل نشست در حد ۸ سانتی‌متر دیده می‌شود.

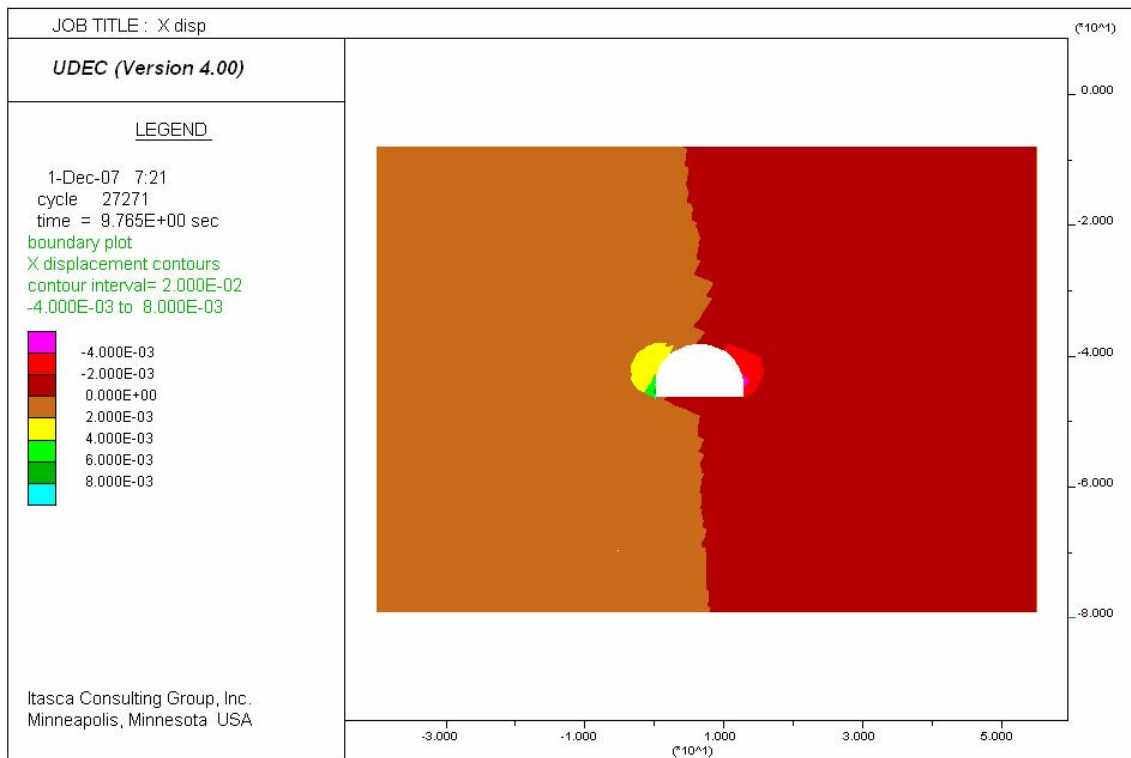
شکل ۶-۶۲ کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل دیده می‌شود جابجائی‌هایی در حد ۶ سانتی‌متر رخ می‌دهد.

شکل ۶-۶۳ کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و در حد ۲۰۰-۶۰۰، در کف تونل در حد ۴۰۰-۸۰۰ و در دیواره در حد ۴۰۰-۱۰۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد.

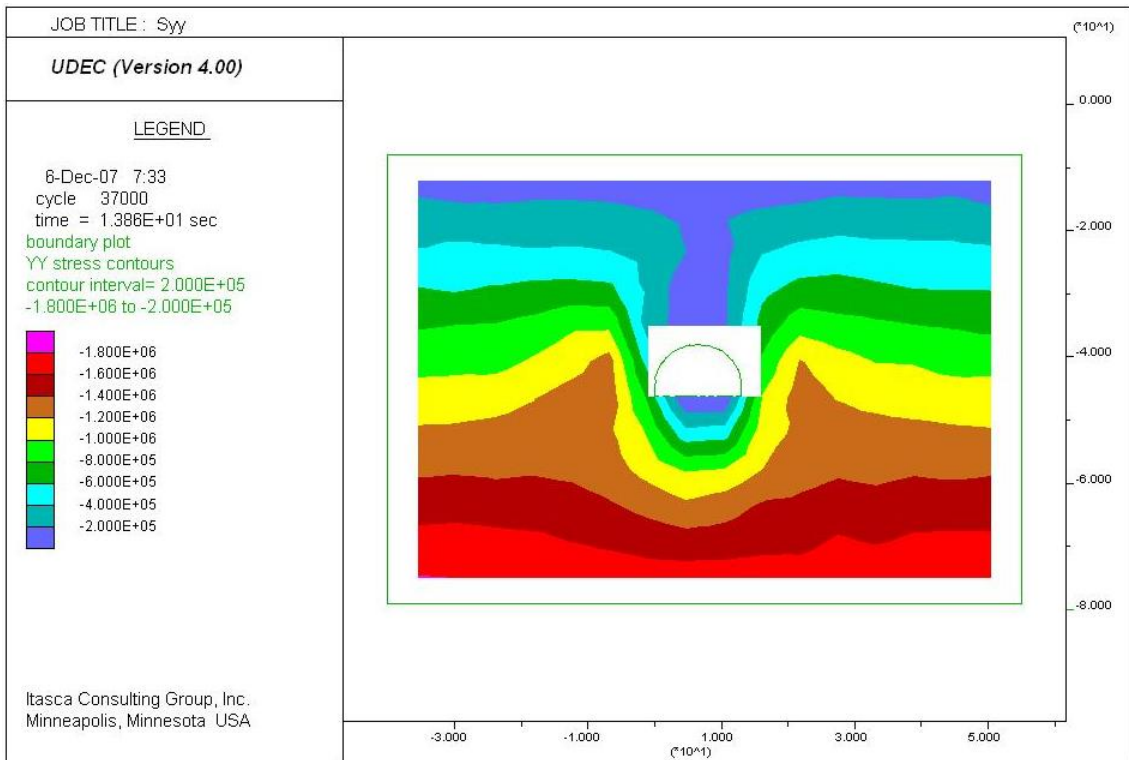
شکل ۶-۶۴ تشکیل نقاط پلاستیک در اطراف تونل را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست تمرکز نقاط پلاستیک در تاج تونل است.



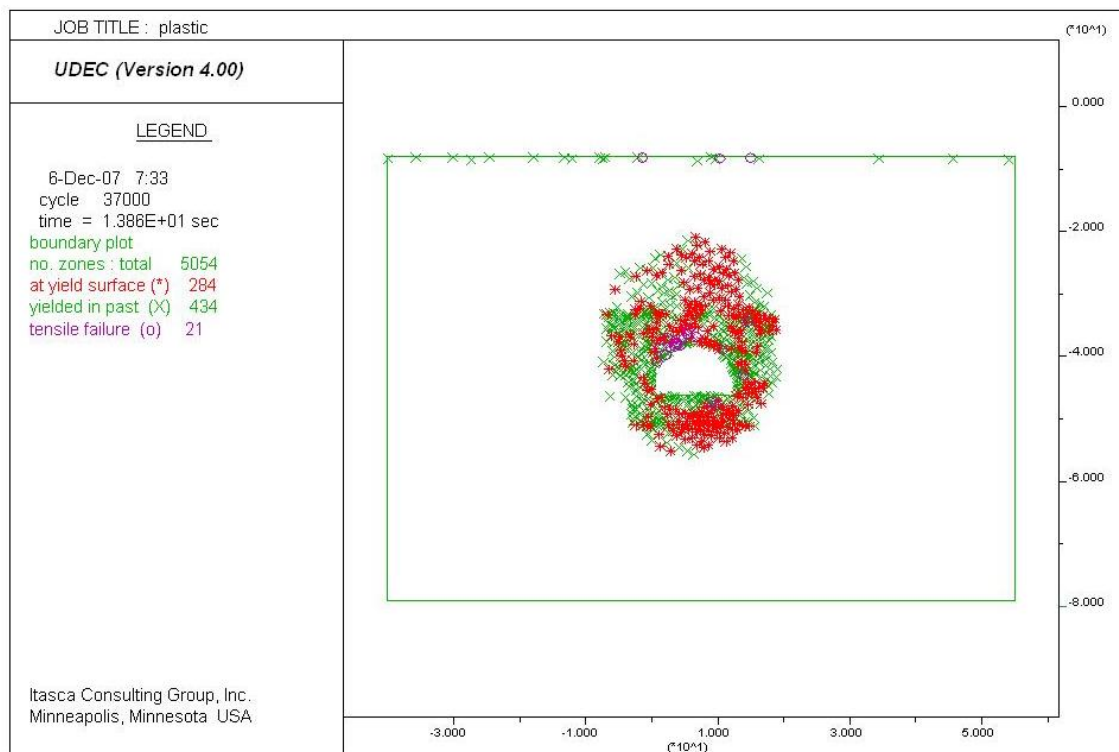
شکل ۶-۶۱- کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z13-2، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شانکریت



شکل ۶-۶۲- کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z13-2، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شانکریت



شکل ۶-۶-۶۳- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z13-2، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شاکریت



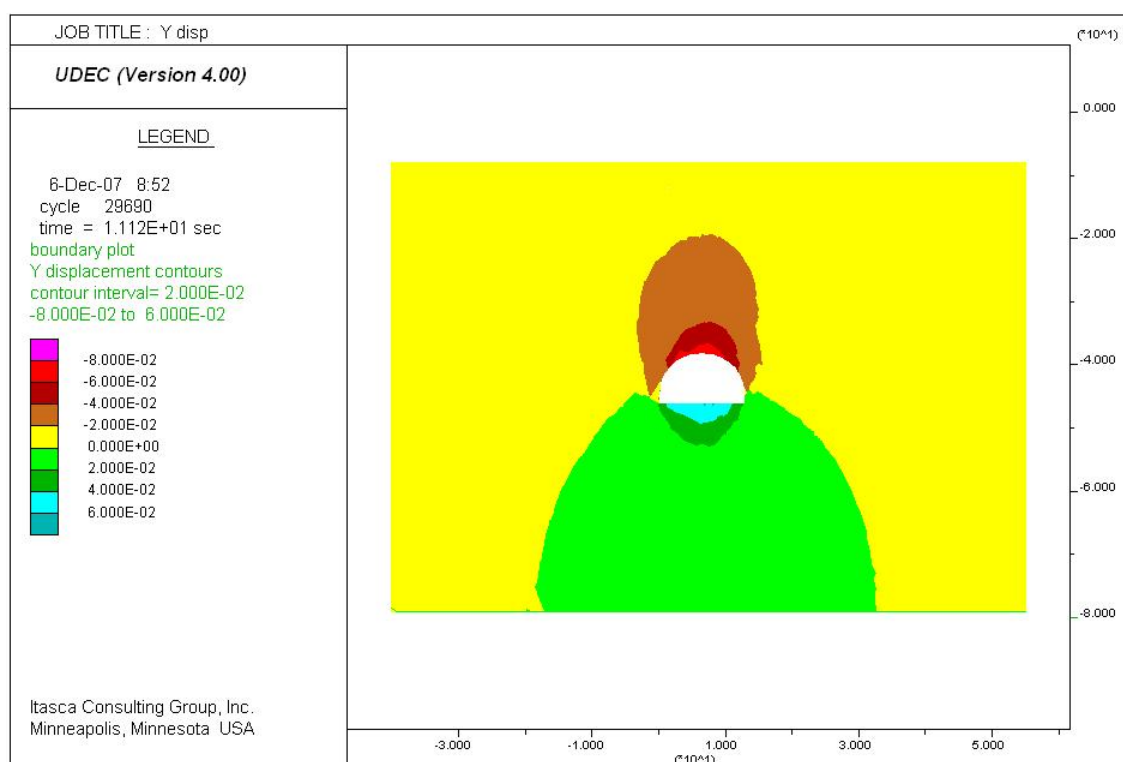
شکل ۶-۶-۶۴- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z13-2، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شاکریت

شکل ۶-۶۵ کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت+پیچ سنگ) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حد ۴ سانتی‌متر و در تاج تونل نشست در حد ۶ سانتی‌متر دیده می‌شود.

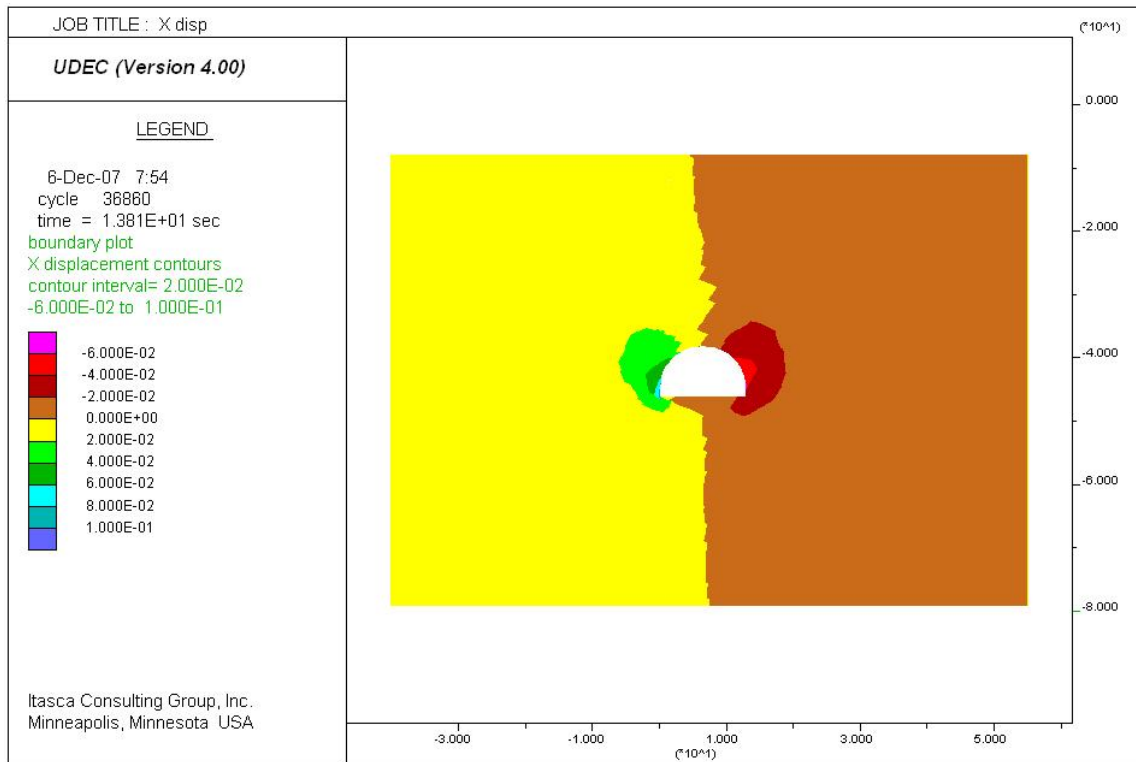
شکل ۶-۶۶ کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت+پیچ سنگ) استفاده شده است را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل دیده می‌شود جابجایی‌هایی در حد ۳ سانتی‌متر رخ می‌دهد.

شکل ۶-۶۷ کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت+پیچ سنگ) استفاده شده است را نشان می‌دهد. در تاج تونل تنش‌ها فشاری بوده و در حد ۲۰۰-۶۰۰، در کف تونل در حد ۲۰۰-۸۰۰ و در دیواره در حد ۴۰۰-۱۰۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد.

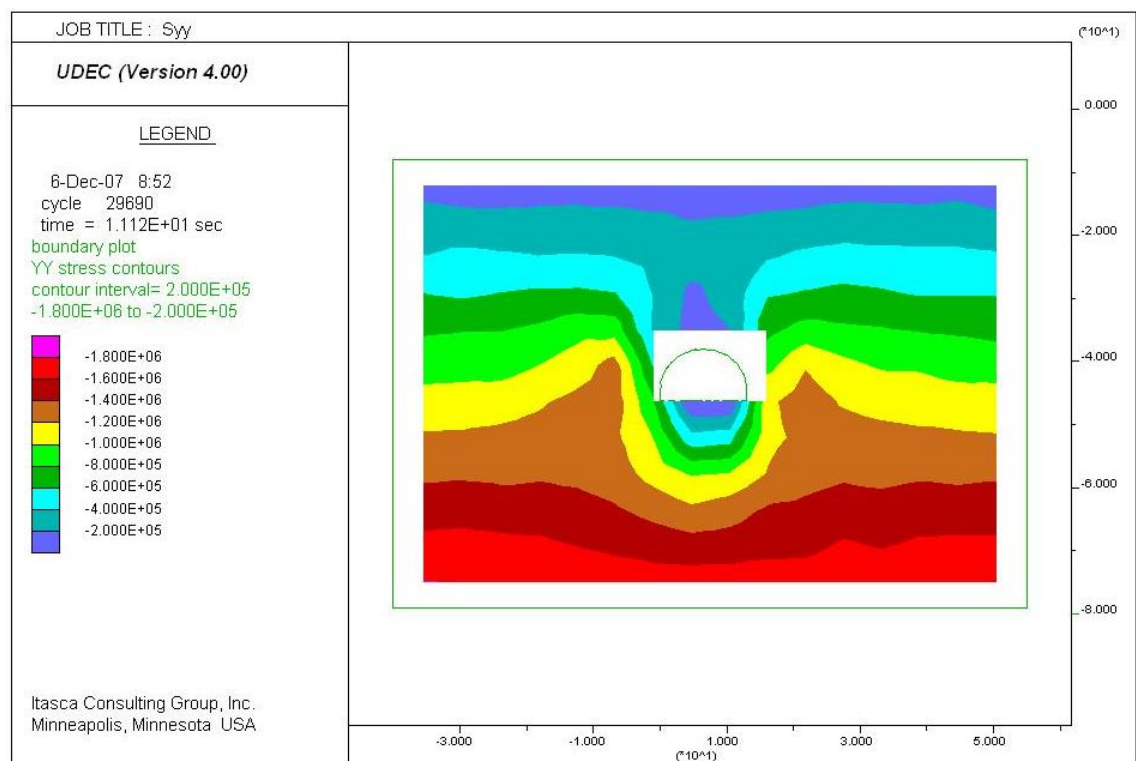
شکل ۶-۶۸ تشکیل نقاط پلاستیک در اطراف تونل را نشان می‌دهد.



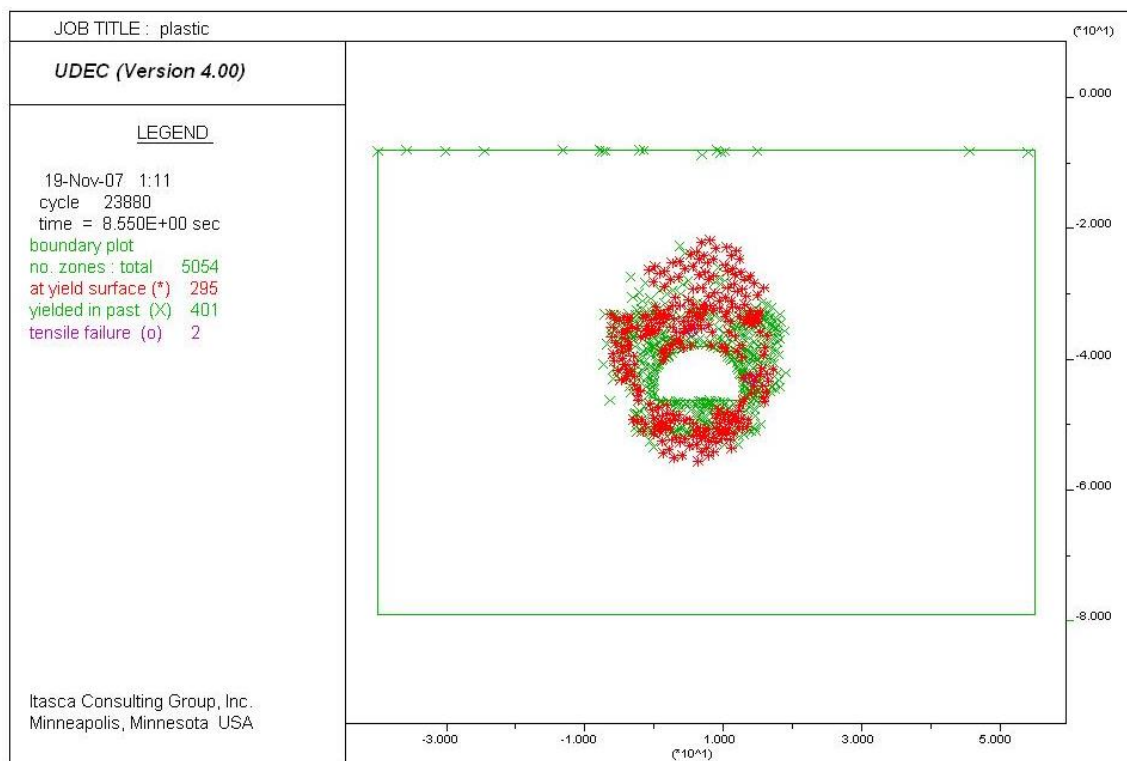
شکل ۶-۶۵- کنتور جابجایی قائم در مقطع تونل در زون Z_{13-2} ، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ



شکل ۶-۶۶- کنتور جابجایی افقی در مقطع تونل در زون Z13-2، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ



شکل ۶-۶۷- کنتور تنش متوسط در مقطع تونل در زون Z13-2، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شاتکریت+پیچ سنگ



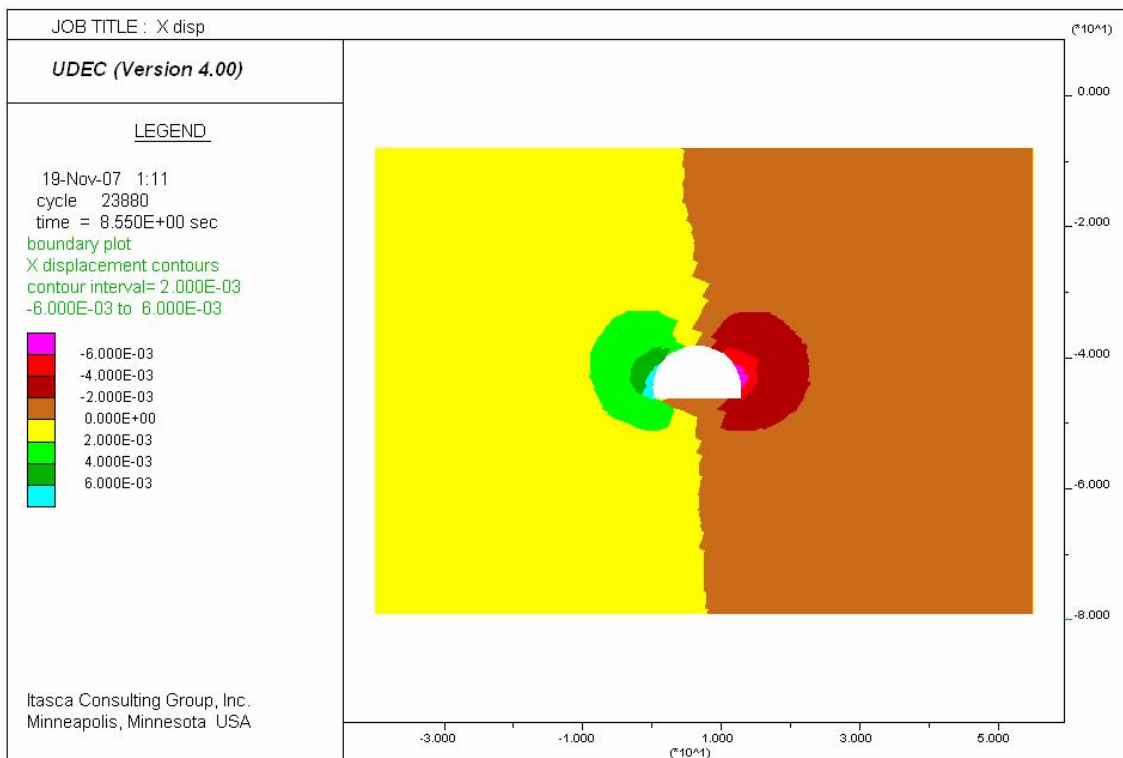
شکل ۶-۶۸- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z₁₃₋₂، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شاتکریت+پیچسنگ

شکل ۶-۶۹ کنتور جابجائی قائم در مقطع تونل در زون Z₁₃₋₂، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت به ضخامت ۲۰ سانتی متر و پیچسنگ به قطر ۲۵ میلی متر و طول ۵ متر و به فاصله ۱/۵ متر و قاب فلزی به ضخامت ۲۰ سانتی متر) استفاده شده است را نشان می دهد. در کف تونل بالا آمدگی در حدود ۹ میلی متر و در تاج تونل نیز نشست در حدود ۹ میلی متر دیده می شود.

شکل ۶-۷۰ کنتور جابجائی افقی در مقطع تونل در زون Z₁₃₋₂، ۲۱۰ متری از دهانه ورودی تونل را در حالتی که از نگهدارنده اولیه (شاتکریت و پیچسنگ و قاب) استفاده شده است را نشان می دهد. همانطور که از شکل دیده می شود جابجائی های کوچکی در حد ۶ میلی متر رخ می دهد.



شکل ۶-۶۹- کنتور جابجایی قائم در زون Z13-2، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شانکریت، پیچ سنگ و قاب



شکل ۶-۷۰- کنتور جابجایی افقی در زون Z13-2، دهانه خروجی تونل، پس از نصب شانکریت، پیچ سنگ و قاب

۶-۶- نتیجه گیری

برای پیش‌بینی سیستم نگهداری اولیه در تونل گردنه رخ به کمک نرم‌افزار UDEC روش کار به این صورت بود که ابتدا مدل به ابعاد ذکر شده در بالا ساخته شد. سپس با وارد کردن مشخصه‌های سنگ برای ۱۵ زون موجود در مسیر تونل و اجرای برنامه میزان جابجایی‌ها و یا ریزش‌های احتمالی برآورد شده که در مرحله بعد با انجام شاتکریت، پیچ‌سنگ و قاب از جابجایی‌های عمده در تاج، کف و دیواره تونل جلوگیری شده است. همانطور که انتظار می‌رفت بیشترین جابجایی‌ها مربوط به زون‌های Z_5 ، Z_{13} و Z_{13-2} بود که با نصب شاتکریت، پیچ‌سنگ و قاب در این زون‌ها جابجایی‌ها تا حد ۱ سانتی‌متر کاهش یافت. نتایج کلی حاصل از حل مدل در نرم‌افزار UDEC در جدول ۶-۱ آمده است.

جدول ۶-۱- نتایج و پیشنهادات در مورد جابجایی‌ها و سیستم‌های نگهداری در زون‌های مختلف تونل

زون	ماکزیمم جابجایی قبل از نصب نگهداری (mm)	شاتکریت (cm)	پیچ‌سنگ	قاب فلزی
Z ₁	۱/۵	۵	-	-
Z ₁₋₂	۴	۵	-	-
Z ₂	۴۰	۵	-	-
Z ₃	ریزش	۱۰	-	-
Z ₄	۲۰	۱۰	بولت‌هایی به طول ۵ متر، قطر ۲۵ میلی‌متر و فواصل ۱/۵ متر	-
Z ₅	ریزش	۲۰	بولت‌هایی به طول ۵ متر، قطر ۳۰ میلی‌متر و فواصل ۱ متر	قاب به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و فواصل ۱ متر
Z ₆	۱۰۰	۱۵	بولت‌هایی به طول ۴ متر، قطر ۲۵ میلی‌متر و فواصل ۱/۵ متر	-
Z ₇	۶	۱۰	-	-
Z ₈	۱۵۰	۵	-	-
Z ₉	۸	۵	-	-
Z ₁₀	۱۵	۵	-	-
Z ₁₁	ریزش	۱۰	بولت‌هایی به طول ۴ متر، قطر ۲۵ میلی‌متر و فواصل ۱/۵ متر	-
Z ₁₂	۲۰	۱۰	بولت‌هایی به طول ۴ متر، قطر ۲۵ میلی‌متر و فواصل ۱/۵ متر	-
Z ₁₃	ریزش	۱۰	بولت‌هایی به طول ۴ متر، قطر ۲۵ میلی‌متر و فواصل ۱/۵ متر	قاب به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و فواصل ۱ متر
Z ₁₃₋₂	ریزش	۱۵	بولت‌هایی به طول ۵ متر، قطر ۳۰ میلی‌متر و فواصل ۱ متر	قاب به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و فواصل ۱ متر

۷-۱- نتیجه گیری

با توجه به آنچه که در فصل‌های گذشته راجع به تحلیل پایداری و پیش‌بینی سیستم نگهداری به روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی توضیح داده شد، چند نکته اساسی می‌توان استنباط کرد که این نکات عبارتند از:

۱- با توجه به بررسی‌های به عمل آمده، مسیر تونل از ۴ واحد لیتولوژیکی مختلف (دوران دوم تا سوم) عبور می‌کند.

۲- در دهانه ورودی و خروجی تونل، دو گسل اصلی شمالی رخ و جنوبی رخ و در طول محور تونل یک زون گسله شامل تعدادی گسل همراه با شبکه‌ای از درز و شکاف‌ها قابل مشاهده است. گسل‌های برداشت شده در طول مسیر تونل شامل گسل‌های F_2 و F_4 اصلی هستند. حرکت گسل‌های فوق می‌تواند موجب آسیب‌پذیری تونل شود.

۳- با توجه به طبقه‌بندی توده‌سنگ انجام گرفته به روش RMR و Q کیفیت توده‌سنگ‌ها خیلی ضعیف تا خوب می‌باشد.

۴- برآورد Q یک درجه ضعیف تر از روش RMR است لذا سیستم نگهداری پیش‌بینی شده توسط Q از RMR کمی سنگین تر است.

۵- طبق نتایج به دست آمده از تحلیل پایداری به کمک نرم‌افزار UDEC در زون Z_5 می‌توان مشاهده کرد که بیشترین جابجایی در سقف تونل می‌باشد که موجب ریزش آن می‌شود.

۶- کنترل جابجایی در هر کدام از مقاطع مقادیر مختلف و جهت جابجایی سنگ‌ها را در آن مقاطع نشان می‌دهد. هر چند اندازه‌های این جابجایی‌ها شاید به دلیل تقریب‌هایی که در نرم‌افزار به کار رفته، دقت لازم را نداشته باشد ولی معیاری برای پیش‌بینی رفتار توده‌سنگ در اثر حفاری می‌دهد.

۷- حفاری تمام مقطع تونل هر چند بر طبق جدول زمین‌شناسی RMR پیشنهاد نشده است ولی تحلیل تونل با روش عددی معیاری را برای نحوه پایداری تونل و جابجایی تاج و کف تونل می‌دهد.

۸- آنچه که در تحلیل تونل، در صفحات قبلی آمده است، تحلیل مقطع حفاری شده به همراه نگهدارنده اولیه می‌باشد. مناسب بودن نگهدارنده‌های پیشنهاد شده با استفاده از روش‌های عددی و به کمک نرم‌افزار UDEC مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تحلیل مقاطع مختلف به وسیله برنامه، سیستم نگهداری اولیه در مقاطع مختلف به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

(a) سیستم نگهداری برای زون Z_1

۱- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۵ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.
تذکر: سیستم نگهداری اولیه می‌تواند بلافاصله بعد از حفاری نصب نشود.

(b) سیستم نگهداری برای زون Z_{1-2}

۱- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۵ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.
تذکر: سیستم نگهداری اولیه باید بلافاصله بعد از حفاری نصب شود.

(c) سیستم نگهداری برای زون Z_2

۱- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۵ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه می‌تواند بلافاصله بعد از حفاری نصب نشود.

(d) سیستم نگهداری برای زون Z₃

۱- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه باید بلافاصله بعد از حفاری نصب شود.

(e) سیستم نگهداری برای زون Z₄

۱- اجرای شبکه منظم پیچ‌سنگ با بولتهایی به طول ۴ متر و قطر ۲۵ میلی‌متر و به فواصل ۱/۵ متر

از یکدیگر به طور منظم.

۲- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه باید بلافاصله بعد از حفاری نصب شود.

(f) سیستم نگهداری برای زون Z₅

۱- اجرای شبکه منظم پیچ‌سنگ با بولتهایی به طول ۵ متر و قطر ۳۰ میلی‌متر و به فواصل ۱ متر

از یکدیگر به طور منظم.

۲- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

۳- اجرای قاب فلزی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و فاصله ۱ متر.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه بلافاصله بعد از حفاری نصب شود.

(g) سیستم نگهداری برای زون Z₆

۱- اجرای شبکه منظم پیچ‌سنگ با بولتهایی به طول ۴ متر و قطر ۲۵ میلی‌متر و به فواصل ۱/۵ متر

از یکدیگر به طور منظم.

۲- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه بلافاصله بعد از حفاری نصب شود.

h سیستم نگهداری برای زون Z_7

۱- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه می‌تواند بلافاصله بعد از حفاری نصب نشود.

i سیستم نگهداری برای زون Z_8

۲- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۵ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه می‌تواند بلافاصله بعد از حفاری نصب نشود.

j سیستم نگهداری برای زون Z_9

۱- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۵ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه می‌تواند بلافاصله بعد از حفاری نصب نشود.

k سیستم نگهداری برای Z_{10}

۱- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۵ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه می‌تواند بلافاصله بعد از حفاری نصب نشود.

l سیستم نگهداری برای زون Z_{11}

۱- اجرای شبکه منظم پیچ‌سنگ با بولت‌هایی به طول ۴ متر و قطر ۲۵ میلی‌متر و به فواصل ۱/۵ متر

از یکدیگر به طور منظم.

۲- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه بلافاصله بعد از حفاری نصب شود.

(m) سیستم نگهداری برای زون Z₁₂

۱- اجرای شبکه منظم پیچ‌سنگ با بولتهایی به طول ۴ متر و قطر ۲۵ میلی‌متر و به فواصل ۱/۵ متر از یکدیگر به طور منظم.

۲- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه بلافاصله بعد از حفاری نصب شود.

(n) سیستم نگهداری برای زون Z₁₃

۱- اجرای شبکه منظم پیچ‌سنگ با بولتهایی به طول ۴ متر و قطر ۲۵ میلی‌متر و به فواصل ۱/۵ متر از یکدیگر به طور منظم.

۲- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

۳- اجرای قاب فلزی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و فاصله ۱ متر.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه باید بلافاصله بعد از حفاری نصب شود.

(o) سیستم نگهداری برای زون Z₁₃₋₂

۱- اجرای شبکه منظم پیچ‌سنگ با بولتهایی به طول ۵ متر و قطر ۳۰ میلی‌متر و به فواصل ۱ متر از یکدیگر به طور منظم.

۲- اجرای شاتکریت (بتن پاشیده) به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر در سقف و دیواره‌ها.

۳- اجرای قاب فلزی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و فاصله ۱ متر.

تذکر: سیستم نگهداری اولیه باید بلافاصله بعد از حفاری نصب شود.

۲-۷- پیشنهادات

۱- حفر یک گمانه دیگر در رسوبات کواترنر حوالی راهدارخانه به عمق حداقل ۱۳۰ متر (این قسمت از تونل در نزدیکی‌های دهانه خروجی قرار دارد و ضعیف می‌باشد) به این دلیل که برای دقت در نتایج باید رفتار دقیق سنگ را در دست داشته باشیم.

۲- با توجه به جنس نامناسب زمین برای کنترل تغییر شکل واقعی زمین در محل تونل نسبت به تغییر شکل مدل شده بر اساس اطلاعات برداشت شده از سطح زمین و تصحیح ضخامت لاینینگ و پوشش‌های اولیه، ضروری است در طول حفاری در قسمت‌های سست تونل با نصب ابزار دقیق رفتار زمین مورد بررسی قرار گیرد و در صورت لزوم تدابیر فنی لازم اندیشیده شود.

۳- در تحلیل اندرکنش به دلیل اینکه فرمول‌های موجود برای تونل دایره‌ای شکل صحت دارد، لازم است در این مورد با احتیاط بیشتر عمل کرد.

۴- با توجه به اینکه سنگ‌های تشکیل دهنده اطراف دهانه خروجی از جنس شیل و مارن هستند و در مجاورت آب امکان شکستگی دارند، لذا ضروری است که در این محدوده حائل‌های موقت به سرعت نصب شوند.

۱-۱- ناحیه ساختاری شماره ۲

از ۵۹ متری ابتدای تونل تا ۳۰ متر بعد از آن ناحیه ساختاری ۲ با ۷ دسته درزه شناسایی شده که سه دسته درزه آنها اصلی هستند. مشخصات آنها مطابق جدول ۱-۱ می‌باشد [۲۹].

جدول ۱-۱- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z_2 [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S_4	دسته درزه S_5	دسته درزه S_6
میانگین جهات درزه	N345/75SW	N80/103NW	N50/130NW
وضعیت سطح درزه‌ها	موجدار و زبر	موجدار و زبر	موجدار - صاف
ماده پرکننده	رس ماسه‌ای	رس ماسه‌ای	رس ماسه‌ای
وضعیت آب	نم	نم	نم

فاصله درزه‌ها	بیشتر از ۲ متر	بیشتر از ۲ متر	بیشتر از ۲ متر
جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۱۰ متر	بیشتر از ۴۰ متر	بیشتر از ۱۰ متر

میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در این ناحیه در جدول ۱-۲ ذکر شده است.

جدول ۱-۲- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z_2 [۲۹]

اندیس کیفی توده سنگ	۹۰٪-۱۰۰٪
مجموعه دسته درزه‌ها	۳ دسته درزه اصلی
وضعیت سطح درزه‌ها	موجودار - زیر
ماده پرکننده درزه‌ها	رس - کلسیک
مقدار آب درزه‌ها	نم
فاصله بین درزه‌ها	بیشتر از ۲ متر
میانگین جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۱۵ متر
میانگین جهت درزه‌ها	نامطلوب

۱-۲- ناحیه ساختاری شماره ۳

از ۸۹ متری تا ۲۰ متر بعد از آن ناحیه ساختاری ۳ با ۹ دسته درزه شناسایی شده که سه دسته

درزه آنها اصلی هستند. مشخصات آنها طبق جدول ۱-۳ می‌باشد [۲۹].

جدول ۱-۳- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z_3 [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S_7	دسته درزه S_8	دسته درزه S_9
میانگین جهت درزه	N355/55SW	N65/80NW	N335/70NW
وضعیت سطح درزه‌ها	مسطح و نرم	مسطح و نرم	مسطح و نرم
ماده پرکننده	رس غیرممتد	رس غیرممتد	رس غیرممتد
وضعیت آب	مرطوب	مرطوب	خشک
فاصله درزه‌ها	بیشتر از ۲ متر	۲ متر	۲ متر
جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۱۵ متر	۱۰ متر	بیشتر از ۴۰ متر

میانگین پارامترهای ژئومکانیکی این ناحیه در جدول ۴-۱ آورده شده است [۲۹].

جدول ۴-۱- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z₃ [۲۹]

اندیس کیفی توده سنگ	۷۵-۹۰%
مجموعه دسته درزه‌ها	۳ دسته درزه اصلی
وضعیت سطح درزه‌ها	موجدار - نرم
ماده پرکننده درزه‌ها	رس - کلسیت غیرممتد
مقدار آب درزه‌ها	نم تا مرطوب
فاصله بین درزه‌ها	۲ تا ۲/۵ متر
جدایش	۰/۱ تا بیش از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	۱۰ تا ۴۰ متر
جهت درزه‌ها	نامطلوب

۳-۱- ناحیه ساختاری شماره ۴

از ۱۰۹ متری ابتدای تونل تا ۶۳ متر بعد از آن ناحیه ساختاری ۴ با ۸ دسته درزه شناسایی شده که ۲ دسته درزه آنها اصلی هستند. مشخصات این درزه‌ها و میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در جداول ۵-۱ و ۶-۱ آمده است. [۲۹].

جدول ۵-۱- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z₄ [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S ₁₀	دسته درزه S ₁₁
میانگین جهات درزه	N55/80NW	N320/50NW
وضعیت سطح درزه‌ها	زبر و موجدار	صاف و زبر
ماده پرکننده	رس	کلسیت رس غیرممتد
وضعیت آب	خشک	خشک تا مرطوب
فاصله درزه‌ها	۲ متر	۲ متر
جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۲۰ متر	بیشتر از ۲۰ متر

جدول ۶-۱- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z₄ [۲۹]

اندیس کیفی توده سنگ	۷۵-۹۰%
مجموعه دسته درزه‌ها	۲ دسته درزه اصلی

وضعیت سطح درزه‌ها	صاف - موجدار
ماده پر کننده درزه‌ها	رس - کلسیت
مقدار آب درزه‌ها	نم تا مرطوب
فاصله بین درزه‌ها	۲ متر
میانگین جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۲۰ متر
جهت درزه‌ها	نامطلوب

۴-۱- ناحیه ساختاری شماره ۶

از ۲۱۶ متری ابتدای تونل تا ۱۰۶ متر بعد از آن ناحیه ۶ ساختاری با ۶ دسته درزه شناسایی شده که ۳ دسته درزه آنها اصلی هستند. مشخصات آنها در جدول ۷-۱ آورده شده است [۲۹].

جدول ۷-۱- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z₆ [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S ₁₅	دسته درزه S ₁₆	دسته درزه S ₁₇
میانگین جهات درزه	N45/45NW	N295/85NE	N325/55NW
وضعیت سطح درزه‌ها	مسطح - زبر	مواج - نرم	پله‌ای - زبر
ماده پر کننده	تمیز غیرممتد	کلسیت غیرممتد	کلسیت غیرممتد
وضعیت آب	خشک	خشک	خشک
فاصله درزه‌ها	۲ متر	۲ متر	۲ متر
جدایش	۲/۵ تا ۱۰ میلی‌متر	۰/۵ تا ۲/۵ میلی‌متر	۰/۵ تا ۲/۵ میلی‌متر
طول درزه‌ها	۱۰ متر	۱۰ متر	۱۰ متر

میانگین پارامترهای ژئومکانیکی این زون مطابق جدول ۸-۱ می‌باشد [۲۹].

جدول ۸-۱- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z₆ [۲۹]

اندیس کیفی توده‌سنگ	۹۰٪-۱۰۰٪
مجموعه دسته درزه‌ها	۳ دسته درزه اصلی
وضعیت سطح درزه‌ها	صاف - موج
ماده پر کننده درزه‌ها	کلسیت - رس غیرممتد

مقدار آب درزه‌ها	مرطوب تا قطره قطره
فاصله بین درزه‌ها	۲ متر
میانگین جدایش	کمتر از ۵ میلی‌متر
طول درزه‌ها	۲ تا ۱۰ متر
جهت درزه‌ها	نامطلوب

۵-۱- ناحیه ساختاری شماره ۷

در داخل طبقات سنگ آهک خاکستری این ناحیه ۶ دسته درزه شناسایی شده که ۲ دسته درزه آنها اصلی هستند. مشخصات دسته درزه‌ها و میانگین پارامترهای ژئومکانیکی آنها به ترتیب در جداول ۹-۱ و ۱۰-۱ آمده است [۲۹].

جدول ۹-۱- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z₇ [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S ₁₈	دسته درزه S ₁₉
میانگین جهات درزه	N80/85SW	N65/50NE
وضعیت سطح درزه‌ها	مواج - نرم	پله‌ای - زبر
ماده پرکننده	کلسیت غیرممتد	رس ماسه‌ای غیرممتد
وضعیت آب	خشک	مرطوب
فاصله درزه‌ها	۲ متر	۲ متر
جدایش	کمتر از ۰/۱ میلی‌متر	تا کمتر از ۰/۱ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۱۰ متر	بیشتر از ۱۰ متر

جدول ۱۰-۱- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z₇ [۲۹]

اندیس کیفی توده سنگ	۱۰۰٪-۹۰٪
مجموعه دسته درزه‌ها	۲ دسته درزه اصلی
وضعیت سطح درزه‌ها	نرم و موجدار
ماده پرکننده درزه‌ها	کلسیت - رس غیرممتد
مقدار آب درزه‌ها	مرطوب تا قطره قطره
فاصله بین درزه‌ها	۲ متر
میانگین جدایش	۰/۱ تا ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۱۰ متر

نسبتاً خوب	جهت درزه‌ها
------------	-------------

۶-۱- ناحیه ساختاری شماره ۸

در داخل طبقات سنگ آهک خاکستری این ناحیه، ۱۱ دسته درزه شناسائی شده که ۳ دسته درزه آنها اصلی هستند. مشخصات آنها با جدول ۱۱-۱ داده شده است [۲۹].

جدول ۱۱-۱- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z_8 [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S_{20}	دسته درزه S_{21}	دسته درزه S_{22}
میانگین جهات درزه	N325/70NW	N80/45SE	N90/90S
وضعیت سطح درزه‌ها	مسطح - نرم	پله‌ای زبر	مواج - زبر
ماده پرکننده	رس غیرممتد	رس ماسه‌ای غیرممتد	رس ماسه‌ای غیرممتد
وضعیت آب	مرطوب	نم	نم
فاصله درزه‌ها	۲ متر	۲ متر	۲ متر
جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	۲/۵ تا ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۲۰ متر	بیشتر از ۲۰ متر	بیشتر از ۱۵ متر

میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در جدول ۱۲-۱ آمده است [۲۹].

جدول ۱۲-۱- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z_8 [۲۹]

اندیس کیفی توده سنگ	%۷۵- %۹۰
مجموعه دسته درزه‌ها	۳ دسته درزه اصلی
وضعیت سطح درزه‌ها	نرم و موجدار
ماده پرکننده درزه‌ها	رس ماسه‌ای غیرممتد
مقدار آب درزه‌ها	نم
فاصله بین درزه‌ها	۲ متر
میانگین جدایش	کمتر از ۰/۱ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۲۰ متر
جهت درزه‌ها	نسبتاً خوب

۷-۱- ناحیه ساختاری شماره ۹

در داخل طبقات سنگ آهک خاکستری این ناحیه ۱۲ دسته درزه شناسائی شده که ۲ دسته درزه آنها اصلی هستند. مشخصات آنها مطابق جدول ۱-۱۳ می باشد [۲۹].

جدول ۱-۱۳- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z₉ [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S ₂₃	دسته درزه S ₂₄
میانگین جهات درزه	N35/65NW	N330/75NE
وضعیت سطح درزه‌ها	مواج - زبر	مواج - صاف
ماده پرکننده	رس ماسه ای غیرممتد	رس غیرممتد
وضعیت آب	خشک	مرطوب
فاصله درزه‌ها	۲ متر	۲ متر
جدایش	۲/۵ تا ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	۱۰ متر	۱۰ متر

میانگین پارامترهای ژئومکانیکی این ناحیه در جدول ۱-۱۴ آورده شده است [۲۹].

جدول ۱-۱۴- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z₉ [۲۹]

اندیس کیفی توده سنگ	۹۵%-۸۰%
مجموعه دسته درزه‌ها	۲ دسته درزه اصلی
وضعیت سطح درزه‌ها	صاف موجدار
ماده پرکننده درزه‌ها	رس ماسه‌ای غیرممتد و کلسیت
مقدار آب درزه‌ها	نم تا مرطوب
فاصله بین درزه‌ها	۲ متر
میانگین جدایش	۰/۱ تا ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	۱۰ متر
جهت درزه‌ها	نامطلوب

۸-۱- ناحیه ساختاری شماره ۱۰

در داخل طبقات سنگ آهک خاکستری این ناحیه ۱۲ دسته درزه شناسائی شده که ۳ دسته درزه آنها اصلی هستند. مشخصات و میانگین پارامترهای ژئومکانیکی آنها مطابق جداول ۱-۱۵ و ۱-۱۶ می باشد [۲۹].

جدول ۱-۱۵- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z₁₀ [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S ₂₅	دسته درزه S ₂₆	دسته درزه S ₂₇
میانگین جهات درزه	N295/85SW	N320/45SW	N35/80SE
وضعیت سطح درزه‌ها	مواج - نرم	مسطح - زبر	مسطح - نرم
ماده پرکننده	رس غیرممتد	رس غیرممتد	رس ماسه‌ای غیرممتد
وضعیت آب	نم	نم	مرطوب
فاصله درزه‌ها	۲ متر	۲ متر	۲ متر
جدایش	۲/۵ تا ۱۰ میلی‌متر	۲/۵ تا ۱۰ میلی‌متر	۲/۵ تا ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	۱۰ متر	۱۰ متر	۱۰ متر

جدول ۱-۱۶- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z₁₀ [۲۹]

اندیس کیفی توده سنگ	%۸۰- %۹۱
مجموعه دسته درزه‌ها	۳ دسته درزه اصلی
وضعیت سطح درزه‌ها	صاف موجدار
ماده پرکننده درزه‌ها	رس ماسه غیر ممتد و کلسیت
مقدار آب درزه‌ها	نم تا مرطوب
فاصله بین درزه‌ها	۰/۶ تا ۲ متر
میانگین جدایش	۰/۱ تا ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	۳ تا ۱۰ متر
جهت درزه‌ها	نسبتاً خوب

۹-۱- ناحیه ساختاری شماره ۱۱

در داخل طبقات سنگی این ناحیه ۱۱ دسته درزه شناسائی شده که ۳ دسته درزه آنها اصلی هستند. مشخصات آنها در جدول ۱-۱۷ آمده است [۲۹].

جدول ۱-۱۷- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z₁₁ [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S ₂₈	دسته درزه S ₂₉	دسته درزه S ₃₀
میانگین جهات درزه	N350/70SW	N40/70NW	N315/55NE
وضعیت سطح درزه‌ها	پله‌ای - نرم	مسطح زبر	مواج - زبر
ماده پرکننده	رس ماسه‌ای غیرممتد	رس ماسه‌ای غیرممتد	رس ماسه‌ای غیرممتد
وضعیت آب	خشک	مرطوب	نم
فاصله درزه‌ها	۲ متر	۲ متر	۲ متر
جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۲۰ متر	بیشتر از ۲۰ متر	بیشتر از ۲۰ متر

میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در جدول ۱-۱۸ آورده شده است [۲۹].

جدول ۱-۱۸- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z₁₁ [۲۹]

اندیس کیفی توده سنگ	۸۰%-۷۵%
مجموعه دسته درزه‌ها	۳ دسته درزه اصلی
وضعیت سطح درزه‌ها	صاف موجدار
ماده پرکننده درزه‌ها	رس ماسه‌ای غیرممتد
مقدار آب درزه‌ها	چکه‌چکه تا جریان
فاصله بین درزه‌ها	۲ متر
میانگین جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۲۰ متر
جهت درزه‌ها	نسبتاً خوب

۱-۱۰- ناحیه ساختاری شماره ۱۲

در داخل طبقات سنگی این ناحیه ، ۹ دسته درزه شناسایی شده که ۳ دسته درزه آنها اصلی هستند. مشخصات آنها و پارامترهای ژئومکانیکی در این زون مطابق جدول ۱-۱۹ و ۱-۲۰ می‌باشد [۲۹].

جدول ۱-۱۹- مشخصات دسته درزه‌ها در زون Z₁₂ [۲۹]

مشخصات درزه‌ها	دسته درزه S ₃₁	دسته درزه S ₃₂	دسته درزه S ₃₃
میانگین جهات درزه	N325/60SW	N45/80NW	N25/25SE

وضعیت سطح درزه‌ها	مسطح - نرم	مواج - نرم	مواج - نرم
ماده پرکننده	کلسیت رس غیرممتد	رس ماسه‌ای غیرممتد	کلسیت ممتد
وضعیت آب	نم تا مرطوب	نم تا مرطوب	خشک
فاصله درزه‌ها	۰/۶ تا ۲ متر	۰/۶ تا ۲ متر	بیشتر از ۲ متر
جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	۱۰ متر	۱۰ متر	بیشتر از ۱۵ متر

جدول ۱-۲۰- میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در زون Z_{12} [۲۹]

اندیس کیفی توده‌سنگ	۷۵%-۹۰%
مجموعه دسته درزه‌ها	۳ دسته درزه اصلی
وضعیت سطح درزه‌ها	زبر موجدار
ماده پرکننده درزه‌ها	رس ماسه‌ای - کلسیت
مقدار آب درزه‌ها	نم تا مرطوب
فاصله بین درزه‌ها	۰/۶ تا ۲ متر
میانگین جدایش	بیشتر از ۱۰ میلی‌متر
طول درزه‌ها	بیشتر از ۱۰ متر
جهت درزه‌ها	نسبتاً خوب

۲-۱- اندیس مقاومت زمین‌شناسی^{۲۶}

این سیستم توسط هوک و همکاران (۱۹۹۵) ابداع شده و در سال‌های ۱۹۹۵، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۲ نیز توسط آنها بازبینی گردیده است. این سیستم برای ارزیابی کاهش مقاومت توده‌سنگ به وسیله مشاهدات صحرائی در شرایط مختلف زمین‌شناسی معرفی شده و به طور مستقیم برای ارزیابی پارامترهای طراحی و مهندسی (مدول تغییر شکل‌پذیری و پارامترهای مقاومتی هوک- براون و مور- کلمب) به کار می‌رود (دیر و میلر^{۲۷}، ۱۹۶۶). در این روش بر حسب تعداد دسته درزه (اندازه بلوک) و شرایط درزه‌های توده‌سنگ یا به طور کلی بر پایه توصیفات زمین‌شناسی توده‌سنگ، می‌توان اندیس مقاومت زمین‌شناسی را تعیین نمود.

²⁶ Geological Strength Index (GSI)

²⁷ Deere & Miller

۲-۱-۱- تعیین GSI با استفاده از طبقه‌بندی‌های RMR و Q

شاخص مقاومت زمین‌شناسی را می‌توان با استفاده از مقدار RMR تعیین کرد (مقادیر RMR و Q را می‌توان از جداول ۱-۲ و ۲-۲ به دست آورد). در رده‌بندی ژئومکانیکی سال ۸۹ اگر $RMR_{89} > 23$ باشد میزان GSI با توجه به رابطه زیر تعیین می‌شود ولی باید در نظر داشته باشیم که برای آب زیرزمینی امتیاز ۱۵، یعنی توده‌سنگ در شرایط کاملاً خشک فرض می‌گردد و همچنین جهت ناپیوستگی باید خیلی مطلوب در نظر گرفته شود به این صورت که برای تعدیل جهت ناپیوستگی‌ها امتیاز آنها را معادل صفر قرار دهیم:

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

اگر میزان $RMR_{89} < 23$ باشد در این صورت نمی‌توان برای به دست آوردن اندیس مقاومت زمین‌شناسی از رابطه بالا استفاده نمود و به جای آن از مقدار Q' (اندیس کیفیت تونل‌سازی اصلاح شده) استفاده می‌شود. در این حالت برای J_w و SRF در رده‌بندی بارتن و همکاران، مقدار ۱ که معادل یک توده‌سنگ خشک تحت تأثیر شرایط تنش متوسط است، استفاده می‌شود. با توجه به توضیحات بالا مقدار Q اصلاح شده برابر خواهد بود با:

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a}$$

و در نتیجه با استفاده از رابطه زیر مقدار GSI تخمین زده می‌شود:

$$GSI = 9LnQ' + 44$$

جدول ۲-۱- امتیاز مربوط به مقاومت فشاری تک محوره در روش RMR [۸]

امتیاز	مقاومت فشاری (MPa)	شاخص بار نقطه‌ای (Mpa)
۱۵	بیشتر از ۲۵۰	بیشتر از ۱۰
۱۲	۲۵۰ تا ۱۰۰	۱۰ تا ۴
۷	۱۰۰ تا ۵۰	۴ تا ۲
۴	۵۰ تا ۲۵	۲ تا ۱
۲	۲۵ تا ۵	برای شاخص بار نقطه‌ای کمتر از ۲ آزمایش مقاومت فشاری ترجیح داده می‌شود.
۱	۵ تا ۱	
۰	کمتر از ۱	

ادامه جدول ۲-۱- امتیاز وابسته به مقدار RQD در روش RMR [۸]

امتیاز	RQD(%)
۲۰	۱۰۰ تا ۹۱
۱۷	۹۰ تا ۷۶
۱۳	۷۵ تا ۵۱
۸	۵۰ تا ۲۵
۳	کمتر از ۲۵

ادامه جدول ۱-۲- امتیاز مربوط به فاصله درزه‌ها در روش RMR [۸]

امتیاز	فاصله درزه‌ها (m)
۲۰	بیشتر از ۲
۱۵	۲ تا ۰/۶
۱۰	۰/۶ تا ۰/۲
۸	۰/۲ تا ۰/۰۶
۵	کمتر از ۰/۰۶

ادامه جدول ۱-۲- امتیاز مربوط به چگونگی سطوح درزه‌ها در روش RMR [۸]

امتیاز	شرح
۳۰	سطح درزه‌ها بسیار زبر؛ درزه‌ها غیر ممتد، فاقد جدایش و سنگ دیواره درزه‌ها غیر هوازده
۲۵	سطح درزه‌ها کمی زبر، جدایش سطوح درزه‌ها کمتر از ۱ میلی‌متر و سنگ دیواره آنها غیر هوازده
۲۰	سطح درزه‌ها کمی زبر، جدایش سطوح درزه‌ها کمتر از ۱ میلی‌متر و سنگ دیواره آنها شدیداً هوازده
۱۰	سطح درزه‌ها صاف یا پرشده، پرشدگی کمتر از ۵ میلی‌متر یا جدایش ۱ تا ۵ میلی‌متر. گسترش درزه‌ها خیلی زیاد.
۰	ارشدگی با مواد سست با ضخامت بیش از ۵ میلی‌متر یا جدایش سطوح آنها بیش از ۵ میلی‌متر. گسترش درزه‌ها خیلی زیاد.

ادامه جدول ۱-۲- امتیاز مربوط به وضعیت آب‌های زیرزمینی در روش RMR

امتیاز	نسبت فشار آب به تنش اصلی حداکثر (σ_w/σ_1)	آبدهی تونل (lit/min)	شرح ناحیه
۱۵	صفر	صفر	کاملاً خشک
۱۰	کمتر از ۰/۱	کمتر از ۱۰	نمناک
۷	۰/۱ تا ۰/۲	۲۵ تا ۱۰	آبدار
۴	۰/۲ تا ۰/۵	۱۲۵ تا ۲۵	آب تحت فشار کم
۰	بیشتر از ۰/۵	بیشتر از ۱۲۵	جریان آب

ادامه جدول ۱-۲- تأثیر هندسه درزه‌ها و توجیه تونل بر امتیاز سنگ [۸]

امتداد دسته درزه‌ها

حفاری در جهت شیب درزه‌ها		حفاری در جهت شیب درزه‌ها	
شیب ۲۰ تا ۴۵	شیب ۴۵ تا ۹۰	شیب ۲۰ تا ۴۵	شیب ۴۵ تا ۹۰
نامناسب	متوسط	مناسب	کاملاً مناسب
بدون توجه به امتداد		امتداد دسته درزه‌ها موازی با محور تونل	
شیب ۰ تا ۲۰		شیب ۲۰ تا ۴۵	شیب ۴۵ تا ۹۰
متوسط		مناسب	کاملاً مناسب

ادامه جدول ۲-۱- تصحیح امتیازات بر حسب نوع و توجیه سازه و نسبت به امتداد شیب درزه‌ها [۸]

شرح	تونل	پی	دیواره‌های سنگی شیبدار
کاملاً مناسب	۰	۰	۰
مناسب	-۲	-۲	-۵
متوسط	-۵	-۷	-۲۵
نامناسب	-۱۰	-۱۵	-۵۰
کاملاً نامناسب	-۱۲	-۲۵	-۶۰

جدول ۲-۲- امتیاز مربوط به پارامتر J_n [۸]

امتیاز	شرح
۱ تا ۰/۵	سنگ توده‌ای بدون درزه یا بسیار کم درزه
۲	یک دسته درزه
۳	یک دسته درزه همراه با درزه‌های اتفاقی
۴	دو دسته درزه
۶	دو دسته درزه همراه با درزه‌های اتفاقی
۹	سه دسته درزه
۱۲	سه دسته درزه همراه با درزه‌های اتفاقی
۱۵	چهار دسته درزه یا بیشتر همراه با درزه‌های اتفاقی
۲۰	سنگ شکسته و شبیه خاک

تذکر: در محل‌های تقاطع سه برابر و در دهانه‌های فضاهای زیرزمینی دو برابر مقادیر فوق برای J_n در نظر گرفته می‌شود.

ادامه جدول ۲-۲- امتیاز مربوط به پارامتر J_r [۸]

امتیاز	شرح
۴	الف- در شرایطی که قبل از جابجایی برشی، درزه‌ها حداقل ۱۰ سانتی متر از سطوح آنها با هم تماس داشته باشند.
۳	درزه‌های ناپیوسته
۲	زیر یا نامنظم، دارای تموج
۱/۵	صاف، دارای تموج
۱/۵	شبیه آینه گسل، دارای تموج
۱	زیر یا نامنظم
۰/۵	صاف، مسطح
	شبیه آینه گسل، مسطح
۱	ب- در شرایطی که در هنگام برش خوردن درزه، دیواره‌های درزه با هم تماس نداشته باشند.
۱	بین سطوح درزه با کانی‌های رسی پر شده باشد، به طوری که مانع تماس دیواره درزه‌ها شود.
۱	بین سطوح درزه با ماسه یا شن پر شده باشد، به طوری که مانع تماس دیواره درزه‌ها شود.

تذکر: در قسمت ب، اگر میانگین فاصله بین درزه‌های یک دسته درزه از ۳ متر بیشتر باشد، به J_r یک واحد اضافه می‌شود.

ادامه جدول ۲-۲- امتیاز مربوط به پارامتر J_w [۸]

امتیاز	فشار تقریبی آب (kg/cm^2)	شرح
۱	کمتر از ۱	حفر سازه در محیط‌های خشک و با جریان کم
۰/۶۶	۱ تا ۲/۵	جریان آب با فشار متوسط و شسته شدن موضعی پرکننده‌ها
۰/۵	۲/۵ تا ۱۰	جریان آب با فشار زیاد در سنگ‌های مستحکم.
۰/۳۳	۲/۵ تا ۱۰	جریان آب با فشار زیاد و شسته شدن مواد پرکننده
۰/۱ تا ۰/۲	بیشتر از ۱۰	جریان آب با فشار فوق‌العاده زیاد که در طول زمان کم می‌شود
۰/۱ تا ۰/۰۵	بیشتر از ۱۰	جریان آب با فشار فوق‌العاده زیاد که در طول زمان تقلیل نیابد.

تذکر: به جز دو مورد اول، سایر موارد تقریبی است. در صورت استفاده از زهکشی، مقدار J_w افزایش می‌یابد. [۸]

ادامه جدول ۲-۲- امتیاز مربوط به پارامتر J_a [۸]

امتیاز	شرح
۰/۷۵ ۱ ۲ ۳ ۴	<p>الف- در شرایطی که سطوح درزه با هم تماس داشته باشند. در صورت وجود ماده پرکننده، این مواد به خوبی به هم جوش خورده و سخت، ناتراوا و مستحکم باشند، مثل کوارتز. دیواره‌های درزه دگرسان نشده‌اند، تنها سطوح آن کمی دگرسان شده‌اند. دیواره‌های درزه دگرسان شده، پوششی از کانی‌های مستحکم مثل ماسه بدون وجود رس. پوشش‌های سیلنتی با ماسه‌های رسی همراه با کمی رس. پوشش کانی‌های رسی و کم اصطکاک مثل میکا، تالک و کمی رس‌های آماسی.</p>
جدول امتیاز به SRF	<p>ب- در شرایطی که قبل از جابجایی برشی درزه‌ها حداقل ۱۰ سانتی‌متر از آنها با هم تماس داشته باشند. ماده پرکننده ذرات ماسه‌ای، سنگ تجزیه شده بدون رس. ماده پرکننده رس بسیار مستحکم با ضخامت کمتر از ۵ میلی‌متر و دارای پیوستگی. ماده پرکننده رس با استحکام متوسط با ضخامت کمتر از ۵ میلی‌متر و دارای پیوستگی. ماده پرکننده رس آماسی نامستحکم دارای پیوستگی با ضخامت کمتر از ۵ میلی‌متر که مقدار J_a آن بستگی به مقدار کانی‌های آماسی و حضور آب دارد.</p>
۴ ۶ ۸ ۸ تا ۱۲	<p>ج- در شرایطی که در هنگام برش خوردن درزه، دیواره‌های درزه با هم تماس نداشته باشند. ماده پرکننده از سنگ خرد شده یا رس باشد. در این حالت با توجه به نوع رس امتیاز آن متفاوت است. ماده پرکننده سیلت یا ماسه همراه با رس اندک. ماده پرکننده نوارهای ضخیم رسی.</p>
۶ تا ۸ یا ۸ تا ۱۲ ۵ ۱۰ تا ۱۳ یا ۱۳ تا ۲۰	

ادامه
۲-۲-
مربوط
پارامتر
[۸]

امتیاز	شرح
۱۰ ۵ ۲/۵ ۷/۵ ۵ ۲/۵ ۵	<p>الف- سازه با مناطق ضعیف بر خورد کند و احتمال سست شدن توده‌سنگ پس از احداث سازه وجود داشته باشد. برخورد پیاپی با مناطق ضعیف حاوی رس در سنگ‌های سست. مناطق ضعیف منفرد حاوی رس، سازه در اعماق کمتر از ۵۰ متر واقع باشد. مناطق ضعیف منفرد حاوی رس، سازه در اعماق بیشتر از ۵۰ متر واقع باشد. مناطق برش خورده پیاپی در سنگ‌های مستحکم بدون رس. مناطق برشی در سنگ مستحکم، سازه در اعماق کمتر از ۵۰ متر واقع باشد. مناطق برشی در سنگ مستحکم، سازه در اعماق بیشتر از ۵۰ متر واقع باشد. چندین دسته درزه با مصالح پرکننده و دیواره‌های سست.</p>
۲/۵ ۱ ۰/۵ تا ۲ ۱۰ تا ۵ ۱۰ تا ۲۰	<p>ب- سنگ مستحکم باشد.* تنش در محل احداث سازه کم باشد. $\frac{\sigma_c}{\sigma_1} > 200$ تنش متوسط. $10 < \frac{\sigma_c}{\sigma_1} < 200$ تنش زیاد، سنگ بسیار مستحکم. $5 < \frac{\sigma_c}{\sigma_1} < 10$ انفجار خودبخودی سنگ به طور خفیف. $2.5 < \frac{\sigma_c}{\sigma_1} < 5$</p>







	انفجار خودبخودی سنگ به طور شدید. $\frac{\sigma_c}{\sigma_1} < 2.5$
۵ تا ۱۰ ۱۰ تا ۲۰	ج- سنگ‌های روان (که سیلان آنها همراه با افزایش حجم نیست). سیلان و فشار اندک سیلان و فشار زیاد
۵ تا ۱۰ ۱۰ تا ۱۵	د- سنگ‌های آماسی (که سیلان آنها همراه با افزایش حجم است). سیلان و فشار اندک سیلان و فشار زیاد

*در این جدول σ_1 تنش اصلی حداکثر و σ_c مقاومت فشاری تک محوره سنگ بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.

۲-۱-۲- تعیین GSI با استفاده از مشاهدات صحرایی

اساس GSI بر پایه مشاهدات صحرایی پی‌ریزی شده است. در این روش با استفاده از ارزیابی صحرایی و با توجه به شرایط توده سنگ‌های مسیر تونل، توده سنگ از لحاظ وضعیت ظاهری و ساختاری به صورت بلوکی تا خیلی بلوکی و هوازدگی سطوح درزه‌ها مشخص شده و با جدول ۲-۳ مقایسه می‌شود و در نهایت شاخص GSI تعیین می‌شود.

جدول ۲-۳- تعیین GSI با استفاده از بررسی‌های صحرایی [۲۴]

STRUCTURE	SURFACE CONDITIONS				
	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
	DECREASING SURFACE QUALITY →				
 INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
 BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
 VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
 DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
 LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					10
	← DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES				
	N/A	N/A			

۲-۲- کاربرد سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ

مهم‌ترین کاربردهای سیستم‌های رده‌بندی تجربی توده‌سنگ‌ها در زیر آورده شده است:

۲-۲-۱- تخمین نگهدارنده موقت با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی

احداث ایمن و اقتصادی تونل‌ها، حفاری زیرزمینی معدنی و مغارهای نیروگاه‌ها بستگی به عوامل متعددی دارد که یکی از آنها انتخاب صحیح سیستم نگهدارنده می‌باشد به طوری که از پایداری آنها اطمینان کافی حاصل شود. این سیستم‌های نگهدارنده که می‌توانند شامل پیچ‌سنگ‌ها^{۲۸}، کابل‌های مهاری تزریق شده، بتن‌پاشی^{۲۹} و سایر انواع تسلیح سنگ باشد، باید با خصوصیات توده‌سنگ، روش‌های استفاده شده و اجرای صحیح حفاری همخوانی داشته باشد.

پیش‌بینی حائل‌های مورد نیاز برای نگهداری توده‌سنگ‌ها در حفاریات زیرزمینی به دو روش کلی تجربی و تحلیلی صورت می‌گیرد. در روش‌های تجربی طرح نگهداری تونل^{۳۰} بر اساس نتایج حاصل از طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ با ضریب اطمینان نامشخص ولی محافظه‌کارانه پیشنهاد می‌شود. جهت تعیین میزان بار مؤثر بر روی سیستم نگهدارنده نیز از طبقه‌بندی Q و RMR استفاده شده است.

الف- تعیین فشار نگهدارنده و پیش‌بینی حائل موقت با استفاده از سیستم Q

بارتن و همکارانش در سال ۱۹۸۰ اطلاعات بیشتری برای طول پیچ‌سنگ، حداکثر دهانه بدون نگهداری و فشارهای نگهدارنده سقف تهیه کردند. طول پیچ‌سنگ‌ها می‌تواند از عرض فضای زیرزمینی (B) و ضریب اهمیت نگهدارنده^{۳۱} تخمین زده شود.

$$L = \frac{2 + 0.15B}{ESR}$$

حداکثر دهانه بدون نگهداری را می‌توان از رابطه زیر تخمین زد:

²⁸ Rock bolt

²⁹ Shotcrete

³⁰ Support

³¹ Excavation Support Ratio

$$B_{mx} = 2ESRQ^{0.4}$$

مقدار ESR به نحوه استفاده از حفاری زیرزمینی و درجه ایمنی مورد انتظار از سیستم نگهدارنده‌ی نصب شده جهت ایجاد پایداری در حفاری زیرزمینی، بستگی دارد. بارتن و همکارانش مقادیر زیر را پیشنهاد کردند:

جدول ۲-۴- مقادیر ESR بسته به نوع و درجه اهمیت حفاریات زیرزمینی [۸]

ESR	رده فضای زیرزمینی
۳-۵	فضاهای معدنی موقت و نظایر آنها
۲/۵	چاه قائم با مقطع دایره‌ای
۲	چاه قائم با مقطع مستطیلی
۱/۶	فضاهای معدنی دائمی، تونل‌های آبرسانی، به نیروگاه‌های برق آبی (به استثنای تونل‌های تحت فشار پستاک‌ها)، تونل‌های هادی، تونل‌های پیشرو برای حفاریات زیر زمینی بزرگ
۱/۳	اتاق‌های ذخیره، تصفیه خانه‌های زیرزمینی، تونل‌های فرعی راه و راه‌آهن، محفظه‌های تنظیم فشار و تونل‌های دسترسی نیروگاه‌های برق زیرزمینی، تونل‌های اصلی راه و راه‌آهن، حفاریات زیرزمینی دفاعی شهری، محل تقاطع تونل‌ها
۱	نیروگاه‌های هسته‌ای، ایستگاه‌های راه‌آهن، مراکز ورزشی و عمومی و کارخانجات زیرزمینی
۰/۸	

بارتن^{۳۲} و همکارانش در سال ۱۹۹۷ بر اساس مقدار Q و عدد زبری درزه‌ها (J_r) میزان فشار وارد بر سیستم نگهدارنده را بر حسب kg/cm^2 ، را بر اساس فرمول زیر ارائه کرد:

$$P_{roof} = \frac{2}{J_r} \times Q^{\frac{-1}{3}}$$

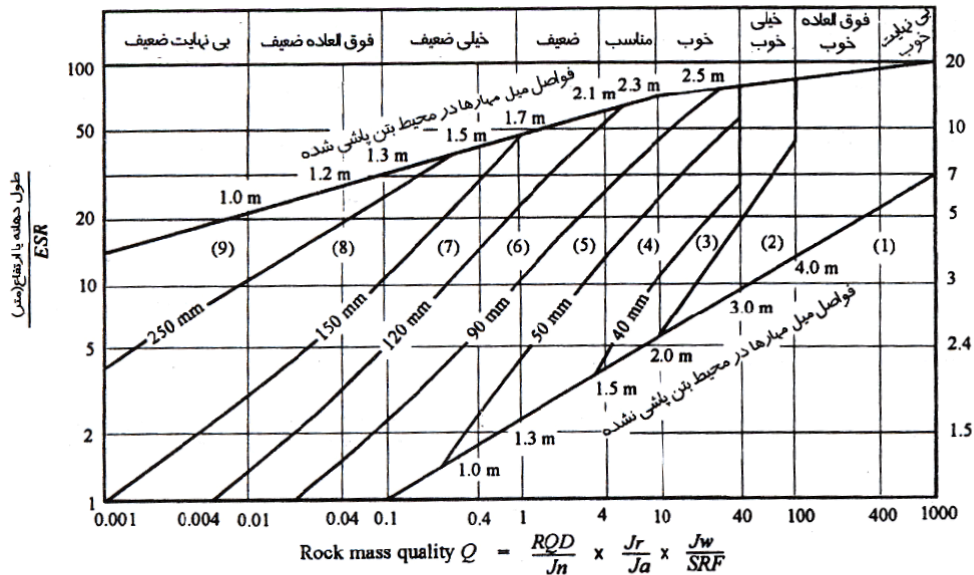
برای برآورد حائل‌های مورد نیاز در سیستم Q می‌توان از شکل ۲-۱ استفاده کرد.

ب- پیش‌بینی حائل موقت بر اساس سیستم RMR

پیش‌بینی حائل موقت برای تونل‌ها در طبقه‌بندی RMR بر اساس گراف تهیه شده توسط بنیادسکی انجام می‌گیرد. این پیش‌بینی بر اساس نعلی‌شکل بودن مقطع تونل، پهنای ۱۰ متری آن و تنش عمودی کمتر از ۲۵ مگاپاسکال (تقریباً معادل ۱۰۰ متر روباره) و روش حفاری سنتی (چال‌زنی و آتش‌کاری) می‌باشد.

بنیادسکی (۱۹۸۹) بر اساس میزان RMR، پهنای تونل (W) بر حسب متر و وزن واحد حجم روباره (γ) بر حسب KN/m^3 ، میزان فشار وارد بر سیستم نگهدارنده را بر حسب KN/m^2 به صورت رابطه زیر ارائه نمود:

$$Pr\ oof = \left(\frac{100 - RMR}{100} \right) W \cdot \gamma$$

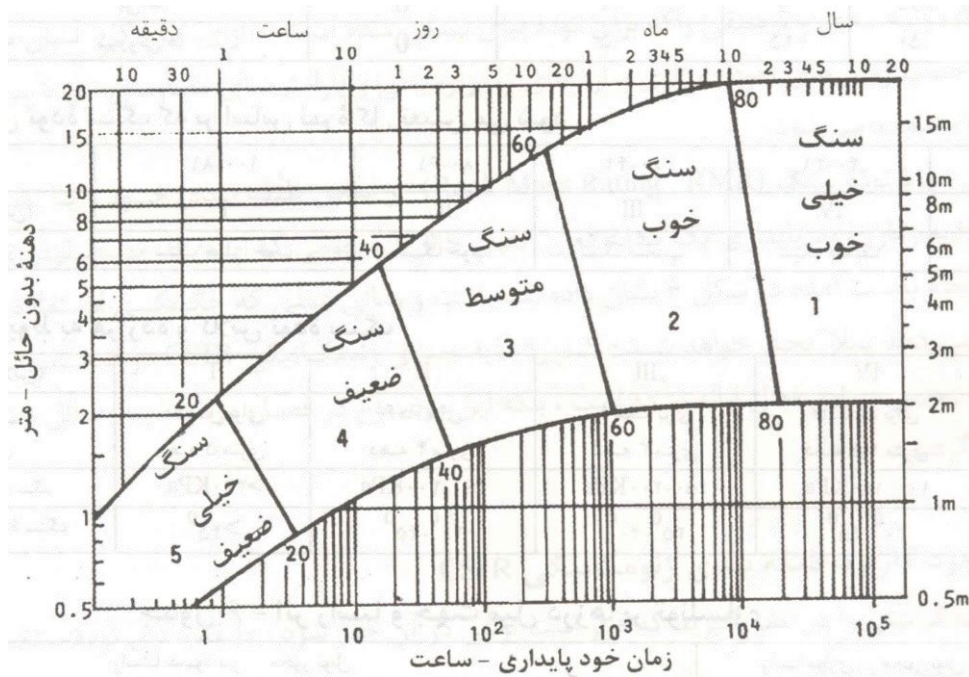


طول مهاری بر حسب متر برای $ESR = 1$

مرتب‌بندی مسلح‌کننده‌ها

- | | |
|--|--|
| (۱) بدون نگهدارنده | (۵) ۹۰ تا ۱۵۰ میلیمتر بتن پاشیده مسلح به ایفای فولادی همراه با میل مهار |
| (۲) مهاربندی نقطه‌ای | (۶) ۹۰ تا ۱۲۰ میلیمتر بتن پاشیده مسلح به ایفای فولادی همراه با میل مهار |
| (۳) مهاربندی سیستماتیک | (۷) ۱۲۰ تا ۱۵۰ میلیمتر بتن پاشیده مسلح به ایفای فولادی همراه با میل مهار |
| (۴) مهاربندی سیستماتیک با ۴۰ تا ۱۰۰ میلیمتر بتن پاشیده مسلح نشده | (۸) بیش از ۱۵۰ میلیمتر بتن پاشیده مسلح به ایفای فولادی همراه با میل مهار |
| | (۹) پوشش بتنی قالب ریزی شده |

شکل ۲-۱- تخمین رده نگهدارنده بر اساس شاخص کیفی تونل زنی [۸]



شکل ۲-۲- زمان پابرجایی در مقابل اندازه دهانه برای رده‌های مختلف توده سنگ در رده بندی ژئومکانیکی [۸]

۲-۲-۲- تعیین مدول تغییر شکل پذیری^{۳۳} با استفاده از سیستم‌های طبقه بندی توده سنگ

[۱۵]

تخمین صحیح مدول تغییر شکل با استفاده از روش‌های تجربی توده سنگ جائیکه انجام آزمایش‌های برجا پرهزینه است، از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. برای مقاطع مختلف، مقادیر مدول تغییر شکل با استفاده از روابط تجربی موجود، به دست آمد. این روابط که حاصل کارهای صحرایی و آزمایش‌های برجا توسط افراد مختلف است، در زیر آورده شده‌اند:

۱- رابطه به دست آمده توسط بنیاوسکی در سال ۱۹۷۸

$$E_M \text{ (GPa)} = 2RMR - 100 \quad RMR > 50$$

۲- رابطه سرافیم و پیرا^{۳۴} در سال ۱۹۸۳

$$E_M \text{ (GPa)} = 10^{(RMR-10)/40} \quad RMR < 50$$

³³ Elastic modulus

³⁴ Serafim and pereira

۳- رابطه نیکلسون^{۳۵} و بنیاوسکی در سال ۱۹۹۰

$$E_M \text{ (GPa)} = E_i/100(0.0028RMR^2 - 0.9\exp(RMR/22.821))$$

که در آن E_i ، مدول الاستیسیته سنگ بکر و برابر ۵۰ GPa است.

۴- میتری^{۳۶} و دیگران در سال ۱۹۹۴ با فرض E_i برابر با ۵۰ گیگا پاسکال رابطه زیر را پیشنهاد دادند:

$$E_M \text{ (GPa)} = E_i(0.5(1-\cos(\pi.RMR/100)))$$

۵- ورمن^{۳۷} با تاکید بر ارتفاع سرباره یا عمق تونل در سالهای ۱۹۹۳ و ۱۹۹۷ رابطه زیر را پیشنهاد

کرد:

که در این رابطه مقدار α بین ۰/۱۶ تا ۰/۳ است.

$$E_m \text{ (GPa)} = 0.3H^\alpha \cdot 10^{(RMR-20)/38} \quad H > 50m$$

۶- رابطه سینگ^{۳۸} (۱۹۹۷) بر اساس تحلیل داده‌های به دست آمده از ۳۵ تونل ایزارنگاری شده:

$$E_d \text{ (GPa)} = H^{0.2} \cdot Q^{0.36} \quad Q < 10$$

۷- بارتن و همکاران (۱۹۹۲ و ۱۹۸۰) و بارتن (۱۹۹۳) با استفاده از سیستم طبقه‌بندی Q

$$E_m \text{ (GPa)} = 25\log Q \quad Q > 10$$

۸- رد^{۳۹} و همکاران در سال ۱۹۹۹

$$E_m \text{ (GPa)} = 0.1(RMR/10)^3$$

۹- دیدریکس و کیسر^{۴۰} (۱۹۹۹) نیز رابطه زیر را عنوان کردند:

$$E_m \text{ (GPa)} = 7(\pm 3) \sqrt{Q'}, \quad Q' = 10((RMR-44)/21)$$

³⁵ Nikelson

³⁶ Mitri

³⁷ Werman

³⁸ Singh

³⁹ Read

⁴⁰ Diederichs & Kaiser

۱۰- هوک^{۴۱} و همکاران (۲۰۰۲)

$$E_m \text{ (GPa)} = (1-D/2) (\sigma_{ci}/100)^{1/2} \cdot 10^{(GSI-10)/40} \quad \sigma_{ci} \leq 100$$

$$E_m \text{ (GPa)} = (1-D/2) \cdot 10^{(GSI-10)/40} \quad \sigma_{ci} > 100$$

σ_{ci} برابر با ۱۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته می شود. D فاکتور به هم ریختگی^{۴۲} است و برای توده سنگ‌های سالم تا کاملاً به هم ریخته از صفر تا ۱ متغیر است که بستگی به روش حفاری و درجه خرابی و رهایی تنش در فضای زیرزمینی دارد. به طوری که با افزایش مقدار D، E_m کمتر می‌شود. به این ترتیب در صورت حفاری تونل با ماشین تونل‌زنی (TBM)، مقدار D به کمترین مقدار خود می‌رسد. شکل ب-۳ جهت تخمین فاکتور به هم ریختگی ارائه شده است.



Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.

D=0

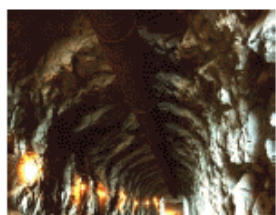


Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass.

D=0

Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.

D=0.5
No Invert



Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.

D=0.8

شکل ۲-۳- تخمین فاکتور به هم ریختگی در تونل‌ها (نرم‌افزار RocLab)

۱۱- بارتن (۲۰۰۲) کوشش کرد تا مقاومت تک محوری سنگ بکر را نیز برای برآورد مقدار E تأثیر

دهد:

⁴¹ Hoek

⁴² Dispersion Factor

$$E_m \text{ (GPa)} = 10Q_c^{1/3} \quad Q < 10$$

که در آن $Q_c = Q (\sigma_c/100)$ و σ_{ci} برابر با ۱۰۰ مگاپاسکال است.

۱۲- کاروالو^{۴۳} در سال ۲۰۰۴

$$E_M \text{ (GPa)} = E_i S^{1/4}, \quad E_i = 50 \text{ GPa}, \quad S = \exp((GSI-100/9))$$

۱۳- سانمز^{۴۴} و دیگران در سال ۲۰۰۴

$$E_M \text{ (GPa)} = E_i (S^a)^{0.4}, \quad E_i = 50 \text{ GPa}, \quad S = \exp((GSI-100/9))$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (\exp(-GSI/15) - \exp(-20/3)), \quad GSI = RMR$$

۱۴- معادله ساده شده هوک و دیدریکس (۲۰۰۶)

$$E_m \text{ (MPa)} = 100000((1-D/2) / (1 + e^{((75+25D-GSI)/11)})) \quad \sigma_{ci} \leq 100$$

۱-۳- ناحیه ساختاری Z₂

با توجه به نتایج به دست آمده، برای طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ بر اساس سیستم RMR

(بیناوسکی ۱۹۸۹) و طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ بر اساس سیستم Q در محدوده ناحیه ساختاری ۲ امتیازهای مربوط به هر پارامتر به ترتیب در جداول ۱-۳ و ۲-۳ آمده است.

جدول ۱-۳- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z₂

امتیاز	ارزش	ردیف
--------	------	------

⁴³ Carvalho

⁴⁴ Sonmez

۱۲	۱۰۰ تا ۲۵۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۲۰	%۹۰- %۱۰۰	مقدار RQD
۲۰	بیشتر از ۲ متر	فاصله بندی درزه ها
۰	بیشتر از ۱۰ میلی متر	شرایط ناپیوستگی
۱۰	نم	وضعیت آب
-۱۰	نامطلوب	جهت درزه ها
۵۲	کلاس ۳ (سنگ متوسط)	جمع امتاز توده سنگ
C=۲۶۰ kPa		چسبندگی توده سنگ بر اساس RMR
φ=۳۱		زاویه اصطکاک توده سنگ بر اساس RMR

جدول ۳-۲- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z₂

R.Q.D=۹۰-۱۰۰	سنگ عالی	اندیس کیفی سنگ
Jn=۱۲	۳ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه ها
Jr=۳	موجدار - زیر	وضعیت سطوح درزه ها
Ja=۳	اندود سیلتی یا رس ماسه ای با نسبت کمی رس	ماده پر کننده درزه ها
Jw=۰/۹	خشک	مقدار آب بین درزه ها
SRF=۱	تنش متوسط	ضریب کاهش تنش
Q=۶/۷۵-۷/۵		سنگ مناسب

۳-۲- ناحیه ساختاری Z₃

با توجه به نتایج به دست آمده، برای طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ بر اساس سیستم RMR

(بیناوسکی ۱۹۸۹) و Q در محدوده ناحیه ساختاری ۳ امتیازهای مربوط به هر پارامتر در جدول ۳-۳ و ۳-۴ ذکر شده است.

جدول ۳-۳- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z₃

امتیاز	ارزش	ردیف
۱۲	۱۰۰ تا ۲۵۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۱۷	%۷۵- %۹۰	مقدار RQD
۱۵	۲ متر	فاصله بندی درزه ها
۰	بیشتر از ۱۰ میلیمتر	شرایط ناپیوستگی
۷-۱۰	نم - مرطوب	وضعیت آب

جهت درزه ها	نامطلوب	-۱۰
جمع امتیاز توده سنگ	کلاس ۳ (سنگ متوسط)	۴۱-۴۴

چسبندگی توده سنگ براساس RMR	C=۲۰۵-۲۲۰ kPa
زاویه اصطکاک توده سنگ براساس RMR	$\phi= 25-27$

جدول ۳-۴- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z₃

اندیس کیفی سنگ	سنگ خوب	R.Q.D=۷۵-۹۰
تعداد دسته درزه ها	۳ دسته درزه اصلی	Jn=۱۲
وضعیت سطوح درزه ها	موجدار نرم	Jr=۲
ماده پرکننده درزه ها	سیلت و رس ماسه ای و گراول	Ja=۳
مقدار آب بین درزه ها	جریان یا فشار متوسط آب	Jw=۰/۶۶
ضریب کاهش تنش	تنش متوسط	SRF=۱
سنگ ضعیف	Q=۲/۷۵-۳/۳	

۳-۳- ناحیه ساختاری Z₄

بر اساس سیستم RMR (بیناوسکی ۱۹۸۹) و Q در محدوده ناحیه ساختاری ۴ امتیازهای مربوط به هر پارامتر طبق جداول ۳-۵ و ۳-۶ می باشد.

جدول ۳-۵- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z₄

امتیاز	ارزش	ردیف
۱۲	۱۰۰-۱۲۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۱۷	۷۵-۹۰%	مقدار RQD
۱۵-۲۰	بیشتر از ۲ متر	فاصله بندی درزه ها
۰	بیشتر از ۱۰ میلی متر	شرایط ناپیوستگی
۷-۱۰	نم تا مرطوب	وضعیت آب
-۱۰	نامطلوب	جهت درزه ها
۴۱-۴۹	کلاس ۳ (سنگ متوسط)	جمع امتیاز توده سنگ

چسبندگی توده سنگ بر اساس RMR	C=۲۰۵-۲۴۵ kPa
------------------------------	---------------

$\phi = 25-30$	زاویه اصطکاک توده سنگ بر اساس RMR
----------------	-----------------------------------

جدول ۳-۶- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z₄

R.Q.D=75-90	سنگ خوب	اندیس کیفی سنگ
J _n =6	۲ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه‌ها
J _r =2	صاف موجدار	وضعیت سطوح درزه‌ها
J _a =3	اندود سیلتی یا رس ماسه‌ای با نسبت کمی رس	ماده پرکننده درزه‌ها
J _w =0/73	جریان یا فشار متوسط آب	مقدار آب بین درزه‌ها
SRF=1	تنش متوسط	ضریب کاهش تنش
Q=6-7/3		سنگ مناسب

۴-۳- ناحیه ساختاری Z₆

بر اساس سیستم Q در این ناحیه طبق جدول شماره ۳-۷ امتیازهای زیر به دست آمد:

جدول ۳-۷- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z₆

R.Q.D=75-90	سنگ عالی	اندیس کیفی سنگ
J _n =12	۳ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه‌ها
J _r =2	صاف موج	وضعیت سطوح درزه‌ها
J _a =3	زون‌ها یا نوار رس ماسه‌ای	ماده پرکننده درزه‌ها
J _w =0/8	جریان زیاد یا فشار بالای آب	مقدار آب بین درزه‌ها
SRF=1	نواحی رسی ضعیف در عمق بیش از ۵۰ متر	ضریب کاهش تنش
Q=3/33-4		سنگ ضعیف

همچنین بر اساس سیستم RMR (بیناوسکی ۱۹۸۹) در محدوده ناحیه ۶ ساختاری، امتیازهای

مربوط به هر پارامتر طبق جدول شماره ۳-۸ می‌باشد.

جدول ۳-۸- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z₆

امتیاز	ارزش	ردیف
۷-۱۲	۶۰ تا ۱۲۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۲۰	%۹۰ - %۱۰۰	مقدار RQD
۱۵	۱۰ متر	فاصله بندی درزه‌ها

۱۰	کمتر از ۵ میلی متر	شرایط ناپیوستگی
۷	مرطوب	وضعیت آب
-۱۰	نامطلوب	جهت درزه‌ها
۴۹-۵۴	کلاس ۳ (سنگ متوسط)	جمع امتیاز توده سنگ

$C=245-270$ kPa	چسبندگی توده سنگ براساس RMR
$\varphi=30-32$	زاویه اصطکاک توده سنگ براساس RMR

۳-۵- ناحیه ساختاری Z_8

بر اساس سیستم RMR (بیناوسکی ۱۹۸۹) و Q در محدوده ناحیه ساختاری ۸، امتیازهای مربوط به هر پارامتر طبق جدول شماره ۳-۹ و ۳-۱۰ می باشد.

جدول ۳-۹- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z_8

امتیاز	ارزش	ردیف
۱۲	۱۲۰ تا ۱۰۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۱۷	۹۰٪ - ۷۵٪	مقدار RQD
۱۵	۲ متر	فاصله بندی درزه‌ها
۲۰	کمتر از ۱ میلی متر	شرایط ناپیوستگی
۱۰-۱۵	نم تا خشک	وضعیت آب
-۵	نسبتاً خوب	جهت درزه‌ها
۶۹-۷۴	کلاس ۲ (سنگ خوب)	جمع امتیاز توده سنگ

$C=245-270$ kPa	چسبندگی توده سنگ براساس RMR
$\varphi=39-42$	زاویه اصطکاک توده سنگ براساس RMR

جدول ۳-۱۰- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z_8

اندیس کیفی سنگ	سنگ خوب	R.Q.D=75-90
تعداد دسته درزه‌ها	۳ دسته درزه اصلی	$J_n=12$
وضعیت سطوح درزه‌ها	نرم مواج	$J_r=2$
ماده پرکننده درزه‌ها	زون‌ها یا نوار رس ماسه‌ای	$J_a=1/5$

Jw=۰/۹	فشار متوسط آب	مقدار آب بین درزه‌ها
SRF=۱/۷۵	تنش متوسط	ضریب کاهش تنش
Q=۴/۳-۵/۱۴		سنگ مناسب

۳-۶- ناحیه ساختاری Z₉

با توجه به نتایج به دست آمده، برای طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ در فصل دوم بر اساس سیستم RMR (بیناوسکی ۱۹۸۹) و Q در محدوده ناحیه ساختاری ۹، امتیازهای هر پارامتر در جداول ۳-۱۱ و ۳-۱۲ ذکر شده است.

جدول ۳-۱۱- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z₉

امتیاز	ارزش	ردیف
۱۲	۱۵۰ تا ۱۰۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۱۷-۲۰	۹۵٪ - ۸۰٪	مقدار RQD
۱۵	۲ متر	فاصله بندی درزه‌ها
۱۰-۲۰	کمتر از ۱ میلی متر تا ۵ میلی متر	شرایط ناپیوستگی
۱۰-۱۵	نم تا خشک	وضعیت آب
-۱۰	نامطلوب	جهت درزه‌ها
۵۴-۷۲	کلاس ۳-۲ (سنگ متوسط تا خوب)	جمع امتیاز توده سنگ

C=۲۷۰-۳۶۰ kPa	چسبندگی توده سنگ بر اساس RMR
φ= ۳۲-۴۱	زاویه اصطکاک توده سنگ بر اساس RMR

جدول ۳-۱۲- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z₉

امتیاز	ارزش	ردیف
R.Q.D=۸۰-۹۵	سنگ خوب	اندیس کیفی سنگ
Jn=۶	۲ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه‌ها
Jr=۲	صاف مواج	وضعیت سطوح درزه‌ها
Ja=۱/۵	زون‌ها یا نوار رس ماسه‌ای تا دیواره هوازده نشده	ماده پرکننده درزه‌ها
Jw=۰/۹	جریان متوسط (میانگین)	مقدار آب بین درزه‌ها
SRF=۱/۷۵	تنش متوسط	ضریب کاهش تنش
Q=۹/۱۴-۱۰/۸۶		سنگ مناسب تا خوب

۳-۹- ناحیه ساختاری Z₁₀

بر اساس سیستم RMR (بیناوسکی ۱۹۸۹) و Q در محدوده ناحیه ساختاری ۱۰، امتیازهای مربوط به هر پارامتر طبق جداول شماره ۳-۱۳ و ۳-۱۴ می‌باشد.

جدول ۳-۱۳- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z₁₀

امتیاز	ارزش	ردیف
۷-۱۲	۷۰ تا ۱۲۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۱۷-۲۰	۹۱٪ - ۸۰٪	مقدار RQD
۱۵	۲ متر	فاصله‌بندی درزه‌ها
۲۰	کمتر از ۱ میلی‌متر	شرایط ناپیوستگی
۱۰	نم	وضعیت آب
-۱۰	نامطلوب	جهت درزه‌ها
۵۹-۶۷	کلاس ۲ و ۳ (سنگ متوسط و خوب)	جمع امتیاز توده‌سنگ

C=۲۹۰-۲۲۵ kPa	چسبندگی توده‌سنگ بر اساس RMR
φ= ۳۴-۳۸	زاویه اصطکاک توده‌سنگ بر اساس RMR

جدول ۳-۱۴- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z₁₀

R.Q.D=۸۰-۹۵	سنگ خوب	اندیس کیفی سنگ
J _n =۹	۳ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه‌ها
J _r =۲	صاف مواج	وضعیت سطوح درزه‌ها
J _a =۱/۵	اندکی هوازده اندودی از ذرات ماسه‌ای	ماده پرکننده درزه‌ها
J _w =۰/۶۶	جریان متوسط	مقدار آب بین درزه‌ها
SRF=۲/۵	نواحی برشی منفرد در سنگ محکم عمق بیش از ۵۰ متر	ضریب کاهش تنش
Q=۳/۱۳-۳/۷۱		سنگ ضعیف

۳-۸- ناحیه ساختاری Z₁₁

طبق نتایج به‌دست آمده برای طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ در فصل دوم، بر اساس سیستم RMR (بیناوسکی ۱۹۸۹) و Q در محدوده ناحیه ساختاری ۱۱، امتیازهای مربوط به هر پارامتر در جدول ۳-۱۵ و ۳-۱۶ نشان داده است.

جدول ۳-۱۵- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z₁₁

امتیاز	ارزش	ردیف
۷-۱۲	۶۰ تا ۱۱۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۱۷	%۷۵-%۸۰	مقدار RQD
۱۵	۲ متر	فاصله‌بندی درزه‌ها
۰	بیشتر از ۵ میلی‌متر	شرایط ناپیوستگی
۰-۴	قطره قطره تا جریان	وضعیت آب
-۵	نسبتاً خوب	جهت درزه‌ها
۳۴-۴۳	کلاس ۴ (سنگ ضعیف)	جمع امتیاز توده‌سنگ

C=۱۷۰-۲۱۵ kPa	چسبندگی توده‌سنگ براساس RMR
$\phi = ۲۲-۲۷$	زاویه اصطکاک توده‌سنگ براساس RMR

جدول ۳-۱۶- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z₁₁

R.Q.D=۷۵-۸۰	سنگ خوب	اندیس کیفی سنگ
J _n =۱۲	۳ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه‌ها
J _r =۲	صاف موج	وضعیت سطوح درزه‌ها
J _a =۳	اندکی هوازده اندودی از ذرات ماسه‌ای	ماده پرکننده درزه‌ها
J _w =۰/۵	جریان متوسط	مقدار آب بین درزه‌ها
SRF=۲/۵	نواحی برشی منفرد در سنگ محکم عمق بیش از ۵۰ متر	ضریب کاهش تنش
	Q=۰/۸۳-۰/۸۸	سنگ خیلی ضعیف

۳-۹- ناحیه ساختاری Z₁₂

بر اساس سیستم RMR (بیناوسکی ۱۹۸۹) و Q در محدوده ناحیه ساختاری ۱۲، امتیازهای مربوط به

هر پارامتر مطابق جداول شماره ۳-۱۷ و ۳-۱۸ می‌باشد.

جدول ۳-۱۷- امتیازدهی سنگ بر اساس روش RMR در زون Z₁₂

امتیاز	ارزش	ردیف
۷-۱۲	۸۰ تا ۱۲۰ MPa	مقاومت فشاری تک محوری
۱۷	%۷۵-%۹۰	مقدار RQD
۱۵	۰/۶ تا ۲ متر	فاصله‌بندی درزه‌ها

۰	>۵ mm	شرایط ناپیوستگی
۷-۱۰	نم تا مرطوب	وضعیت آب
-۵	نسبتاً خوب	جهت درزه‌ها
۴۱-۴۹	کلاس ۳ (سنگ متوسط)	جمع امتیاز توده‌سنگ

$C=20.5-24.5$ kPa	چسبندگی توده‌سنگ براساس RMR
$\phi=26-30$	زاویه اصطکاک توده‌سنگ براساس RMR

جدول ۳-۱۸- امتیازدهی بر اساس روش Q در زون Z_{12}

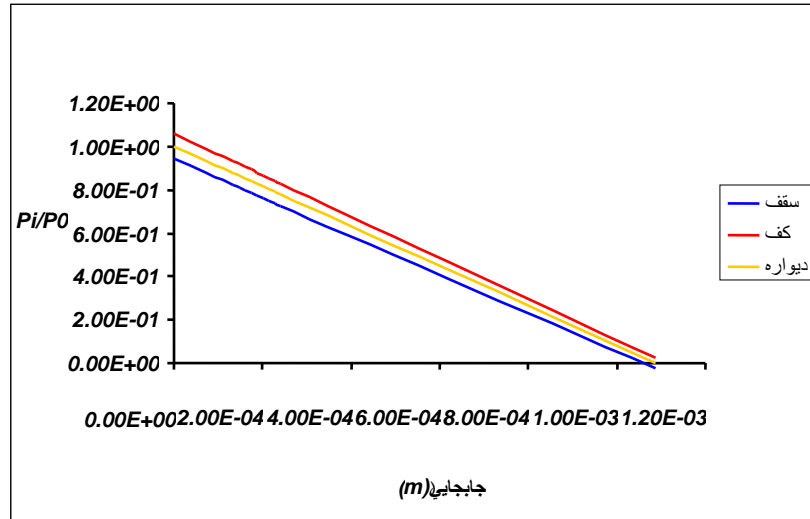
R.Q.D=۷۵-۹۰	سنگ خوب	اندیس کیفی سنگ
$J_n=12$	۳ دسته درزه اصلی	تعداد دسته درزه‌ها
$J_r=2$	زیر مواج	وضعیت سطوح درزه‌ها
$J_a=3$	اندکی از ذرات رس ماسه‌ای	ماده پرکننده درزه‌ها
$J_w=0.66$	جریان زیاد	مقدار آب بین درزه‌ها
$SRF=2/5$	تنش کم	ضریب کاهش تنش
$Q=1/1-1/32$		سنگ ضعیف

۴-۱- تحلیل اندر کنش سنگ - حائل زون Z_2

جدول ۴-۱- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_2

P_i (MPa)	M	D	N	r_e	R	e_{av}	A	U_i (mm)
0.81	0.0064	-0.967	0	4.79	0.59	0	0	0
0.71	0.0064	-0.967	0	4.87	0.56	0	0	0.134
0.70	0.0064	-0.967	0	4.88	0.55	0	0	0.148
0.69	0.0064	-0.967	0	4.89	0.55	0	0	0.161
0.68	0.0064	-0.967	0	4.90	0.55	0	0	0.174
0.67	0.0064	-0.967	0	4.91	0.54	0	0	0.188
0.66	0.0064	-0.967	0	4.92	0.54	0	0	0.201
0.65	0.0064	-0.967	0	4.93	0.54	0	0	0.215

0.64	0.0064	-0.967	0	4.94	0.53	0	0	0.228
0.63	0.0064	-0.967	0	4.94	0.53	0	0	0.241
0	0.0064	-0.967	0	5.84	0.21	0	0	1.09



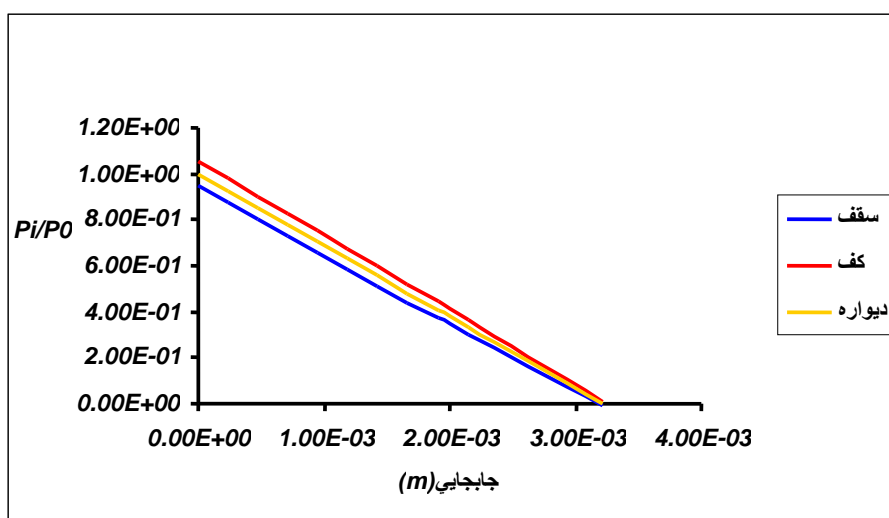
شکل ۴-۱- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_2

۴-۲- تحلیل اندر کنش سنگ - حائل زون Z_3

جدول ۴-۲- مراحل محاسبه تغییر شکل ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_3

P_i (MPa)	M	D	N	r_e	R	e_{av}	A	U_i (mm)
-------------	---	---	---	-------	---	----------	---	------------

1.35	0.0083	-0.941	0	3.81	1.01	0	0	0
1.25	0.0083	-0.941	0	3.88	0.97	0	0	0.238
1.15	0.0083	-0.941	0	3.96	0.93	0	0	0.476
1.05	0.0083	-0.941	0	4.05	0.89	0	0	0.714
0.95	0.0083	-0.941	0	4.14	0.85	0	0	0.952
0.85	0.0083	-0.941	0	4.23	0.81	0	0	1.19
0.75	0.0083	-0.941	0	4.34	0.76	0	0	1.43
0.65	0.0083	-0.941	0	4.46	0.71	0	0	1.67
0.55	0.0083	-0.941	0	4.58	0.66	0	0	1.90
0.45	0.0083	-0.941	0	4.73	0.60	0	0	2.14
0	0.0083	-0.941	0	5.91	0.18	0	0	3.21

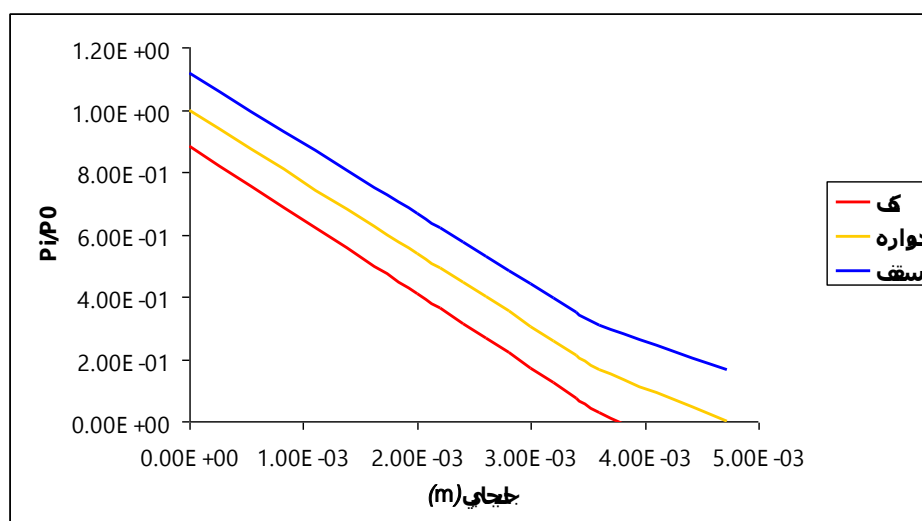


شکل ۴-۲- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_3

۳-۴- تحلیل اندر کنش سنگ - حائل زون Z4

جدول ۳-۴- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z4

P_i (MPa)	M	D	N	r_e	R	e_{av}	A	U_i (mm)
2.16	0.019	-0.88	0	3.03	1.35	0	0	0
1.16	0.019	-0.88	0	3.70	0.99	0	0	2
1.06	0.019	-0.88	0	3.79	0.95	0	0	2.2
0.96	0.019	-0.88	0	3.89	0.91	0	0	2.4
0.86	0.019	-0.88	0	4.00	0.86	0	0	2.6
0.76	0.019	-0.88	0	4.11	0.81	0	0	2.8
0.66	0.019	-0.88	0	4.23	0.76	0	0	3
0.56	0.019	-0.88	0	4.37	0.71	0	0	3.2
0.46	0.019	-0.88	0	4.53	0.64	0	0	3.4
0.36	0.019	-0.88	0	4.70	0.57	0	0	3.6
0	0.019	-0.88	0.124	6.67	-0.05	-1.25E-03	2.71E-03	4.72

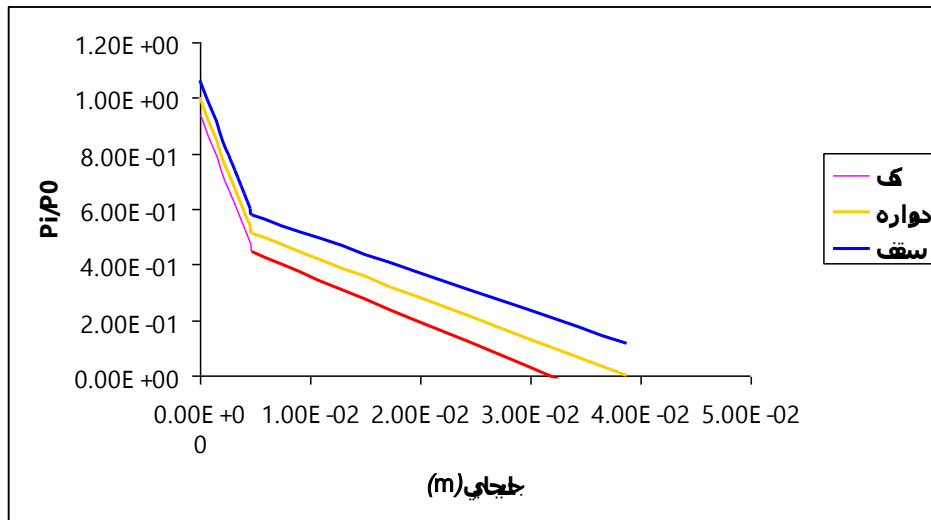


شکل ۴-۳- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z4

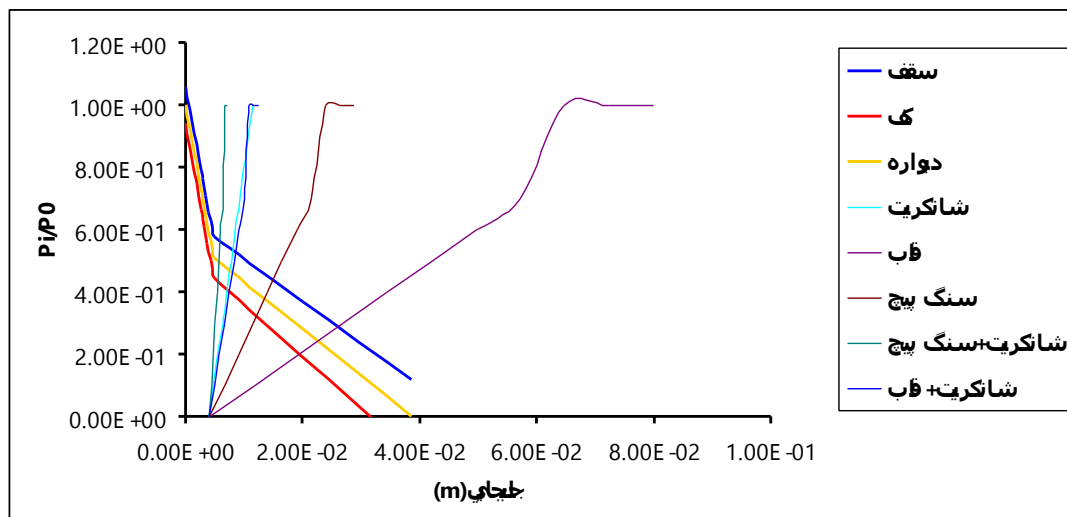
۴-۴- تحلیل اندر کنش سنگ - حائل زون Z6

جدول ۴-۴- مراحل محاسبه تغییر شکل ها به ازای P_i های مختلف در زون Z6

P_i (MPa)	M	D	N	r_e	R	e_{av}	A	U_i (mm)
3.67	0.036	-0.76	0	1.72	2.02	0	0	0
2.67	0.036	-0.76	0	2.09	1.72	0	0	2.66
2.57	0.036	-0.76	0	2.14	1.69	0	0	2.92
2.47	0.036	-0.76	0	2.18	1.66	0	0	3.19
2.37	0.036	-0.76	0	2.23	1.63	0	0	3.45
2.27	0.036	-0.76	0	2.28	1.59	0	0	3.72
2.17	0.036	-0.76	0	2.34	1.56	0	0	3.99
2.07	0.036	-0.76	0	2.39	1.52	0	0	4.25
1.97	0.036	-0.76	0	2.45	1.48	0	0	4.52
1.87	0.036	-0.76	0	2.51	1.45	0	0	4.78
0	0.036	-0.76	0.465	9.32	-0.55	-6.27E-03	1.84E-02	38.7



شکل ۴-۵- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z6

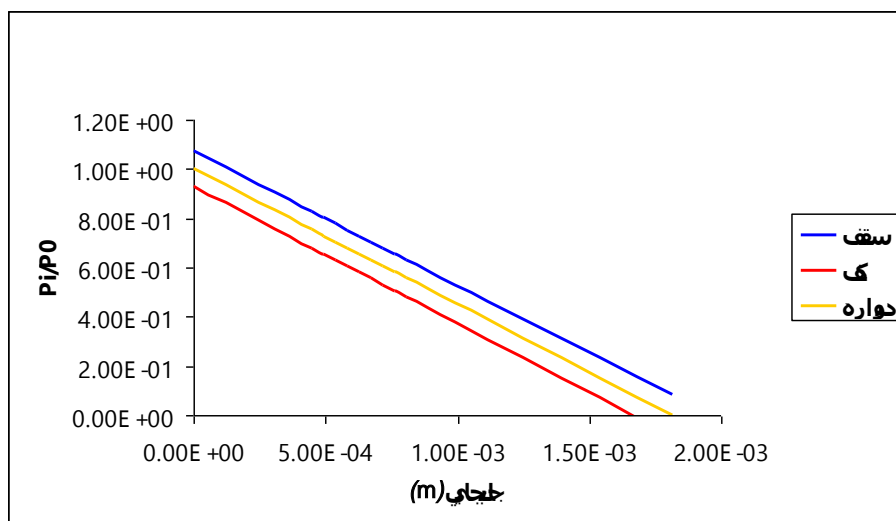


شکل ۴-۶- نمودار اندرکنش تونل و سیستم‌های نگهداری مورد نظر

۴-۵- تحلیل اندرکنش سنگ - حائل زون Z₈

جدول ۴-۵- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z₈

P _i (MPa)	M	D	N	r _e	R	e _{av}	A	U _i (mm)
4.05	0.042131	-0.89806	0	4.23	1.01	0	0	0
3.05	0.042131	-0.89806	0	4.45	9.70	0	0	0.449
2.95	0.042131	-0.89806	0	4.47	9.32	0	0	0.493
2.85	0.042131	-0.89806	0	4.50	8.92	0	0	0.538
2.75	0.042131	-0.89806	0	4.52	8.51	0	0	0.583
2.65	0.042131	-0.89806	0	4.55	8.07	0	0	0.628
2.55	0.042131	-0.89806	0	4.58	7.60	0	0	0.673
2.45	0.042131	-0.89806	0	4.60	7.11	0	0	0.718
2.35	0.042131	-0.89806	0	4.63	6.57	0	0	0.762
2.25	0.042131	-0.89806	0	4.66	5.99	0	0	0.807
0	0.042131	-0.89806	0	5.69	1.78	0	0	1.82



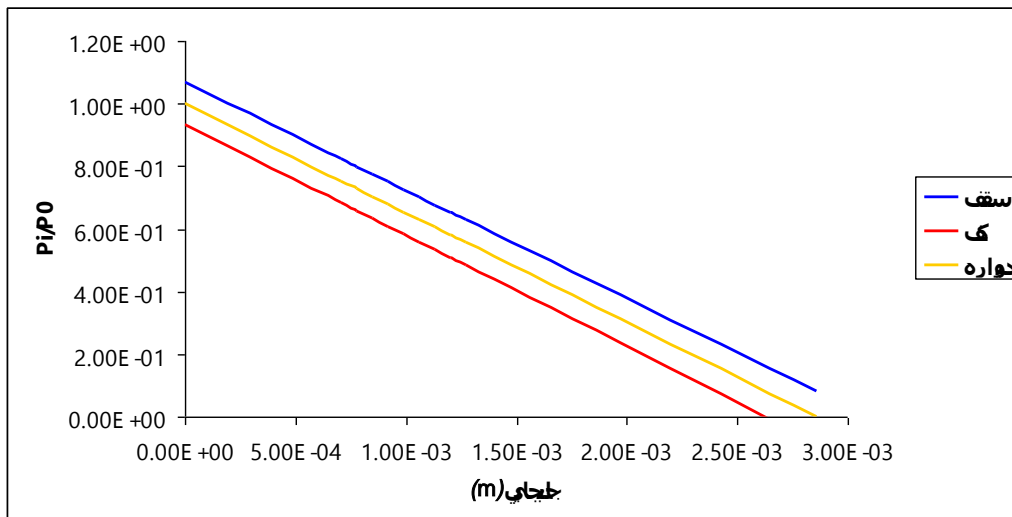
شکل ۴-۷- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z8

۴-۶- تحلیل اندر کنش سنگ - حائل زون Z9

جدول ۴-۶- مراحل محاسبه تغییر شکل ها به ازای P_i های مختلف در زون Z9

P_i (MPa)	M	D	N	r_e	R	e_{av}	A	U_i (mm)
4.05	0.0341	-0.887	0	3.78	0.96	0	0	0
3.05	0.0341	-0.887	0	4.05	0.84	0	0	0.705
2.95	0.0341	-0.887	0	4.08	0.83	0	0	0.776
2.85	0.0341	-0.887	0	4.11	0.82	0	0	0.846
2.75	0.0341	-0.887	0	4.14	0.80	0	0	0.917
2.65	0.0341	-0.887	0	4.17	0.79	0	0	0.987

2.55	0.0341	-0.887	0	4.20	0.77	0	0	1.06
2.45	0.0341	-0.887	0	4.24	0.76	0	0	1.13
2.35	0.0341	-0.887	0	4.27	0.75	0	0	1.2
2.25	0.0341	-0.8872	0	4.31	0.73	0	0	1.27
0	0.0341	-0.887	0	5.77	0.21	0	0	2.86

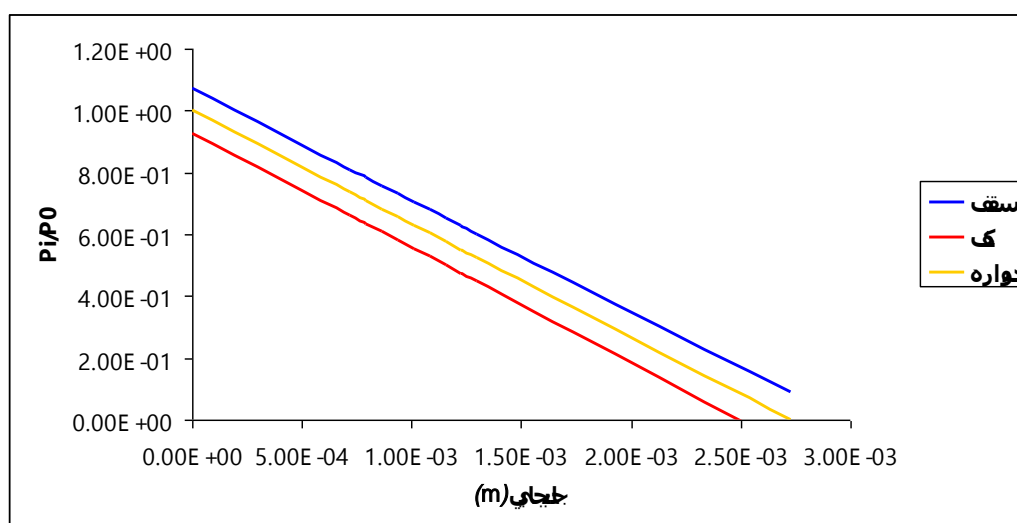


شکل ۴-۸- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_9

۴-۷- تحلیل اندر کنش سنگ - حائل زون Z_{10}

جدول ۴-۷- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z_{10}

P_i (MPa)	M	D	N	r_e	R	e_{av}	A	U_i (mm)
3.78	0.041	-0.872	0	3.65	1.01	0	0	0
2.78	0.041	-0.872	0	3.94	0.87	0	0	0.722
2.68	0.041	-0.872	0	3.98	0.86	0	0	0.794
2.58	0.041	-0.872	0	4.01	0.84	0	0	0.866
2.48	0.041	-0.872	0	4.05	0.83	0	0	0.938
2.38	0.041	-0.872	0	4.08	0.81	0	0	1.01
2.28	0.041	-0.872	0	4.12	0.79	0	0	1.08
2.18	0.041	-0.872	0	4.16	0.79	0	0	1.15
2.08	0.041	-0.872	0	4.20	0.76	0	0	1.23
1.98	0.041	-0.872	0	4.24	0.74	0	0	1.30
0	0.041	-0.872	0	5.76	0.21	0	0	2.73

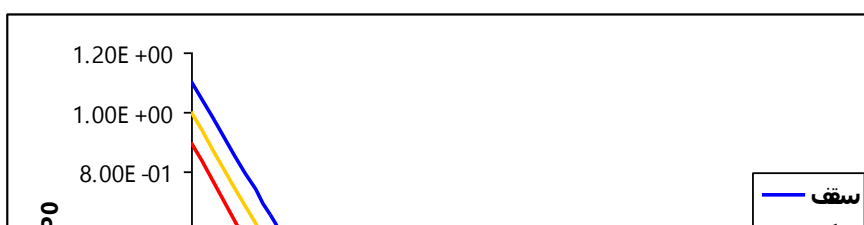


شکل ۴-۹- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z₁₀

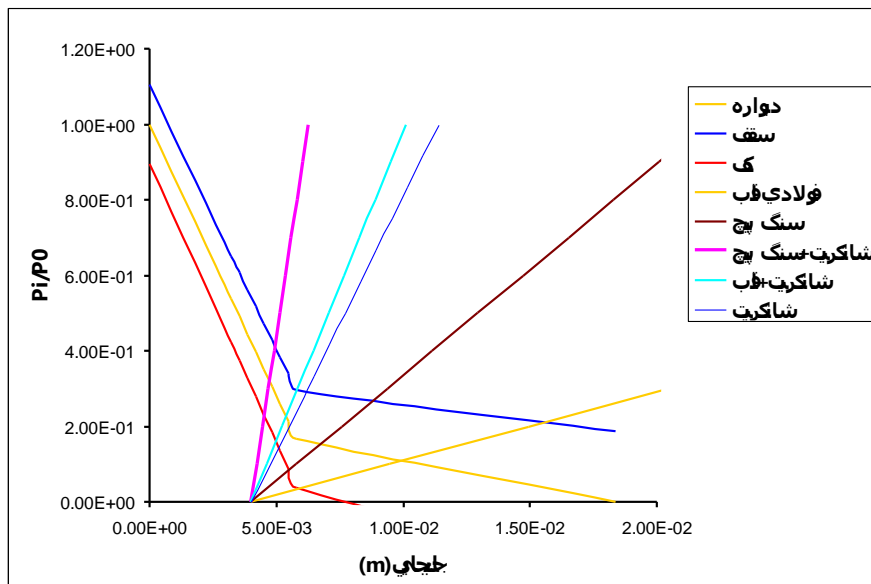
۴-۸- تحلیل اندر کنش سنگ - حائل زون Z₁₁

جدول ۴-۸- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z₁₁

P _i (MPa)	M	D	N	r _e	R	e _{av}	A	U _i (mm)
2.16	0.023	-0.81	0	1.94	1.96	0	0	0
1.16	0.023	-0.81	0	2.67	1.44	0	0	3.21
1.06	0.023	-0.81	0	2.78	1.38	0	0	3.53
0.96	0.023	-0.81	0	2.89	1.31	0	0	3.85
0.86	0.023	-0.81	0	3.02	1.24	0	0	4.18
0.76	0.023	-0.81	0	3.16	1.17	0	0	4.50
0.66	0.023	-0.81	0	3.31	1.09	0	0	4.82
0.56	0.023	-0.81	0	3.49	1.01	0	0	5.14
0.46	0.023	-0.81	0	3.69	0.91	0	0	5.46
0.36	0.023	-0.81	0	3.93	0.81	0	0	5.78
0	0.023	-0.81	0.359	8.43	-0.42	-3.52E-03	9.22E-03	18.4



شکل ۴-۱۰- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z11

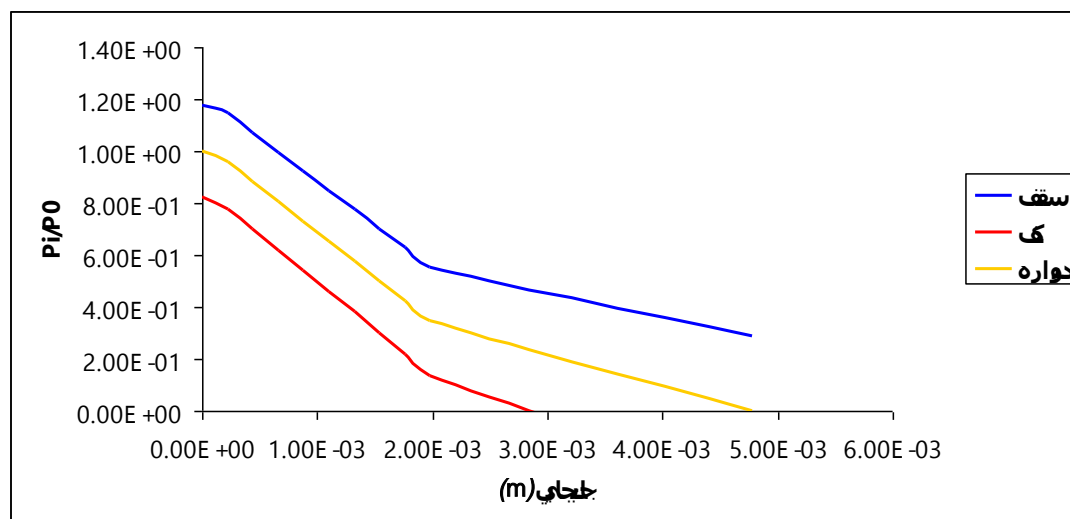


شکل ۴-۱۱- نمودار اندرکنش تونل و سیستم‌های نگهداری مورد نظر

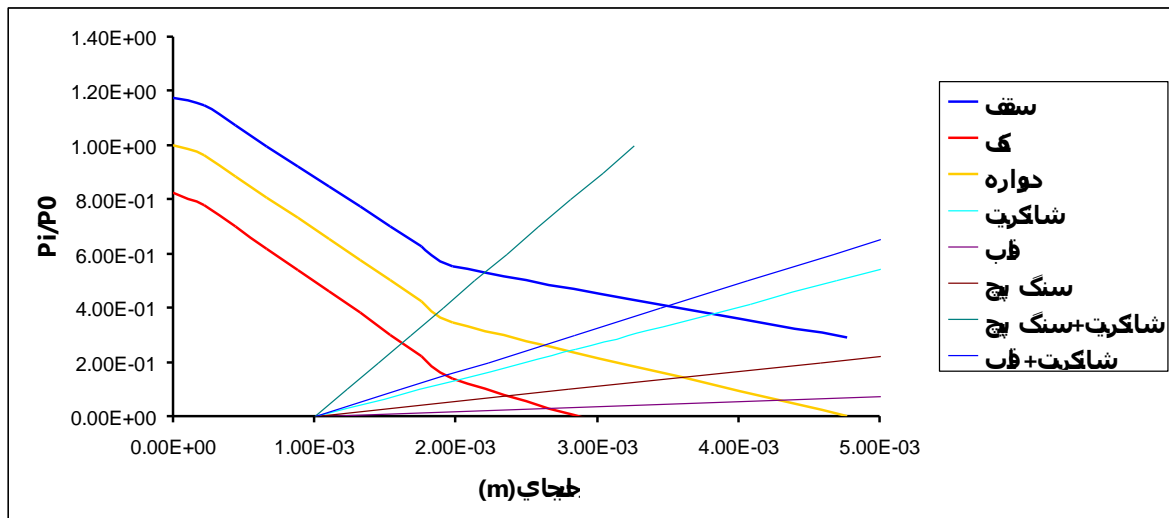
۹-۴- تحلیل اندر کنش سنگ - حائل زون Z₁₂

جدول ۹-۴- مراحل محاسبه تغییر شکل‌ها به ازای P_i های مختلف در زون Z₁₂

P _i (MPa)	M	D	N	r _e	R	e _{av}	A	U _i (mm)
3.78	0.041	-0.87	0	2.28	1.01	0	0	0
2.78	0.041	-0.87	0	2.34	0.87	0	0	0.22
2.68	0.041	-0.87	0	2.47	0.86	0	0	0.44
2.58	0.041	-0.87	0	2.58	0.84	0	0	0.66
2.48	0.041	-0.87	0	2.69	0.83	0	0	0.881
2.38	0.041	-0.87	0	2.82	0.81	0	0	1.10
2.28	0.041	-0.87	0	2.97	0.79	0	0	1.32
2.18	0.041	-0.87	0	3.13	0.78	0	0	1.54
2.08	0.041	-0.87	0	3.31	0.76	0	0	1.76
1.98	0.041	-0.87	0	3.53	0.74	0	0	1.98
0	0.041	-0.87	0.244	7.43	0.21	-1.09E-03	2.56E-03	4.77

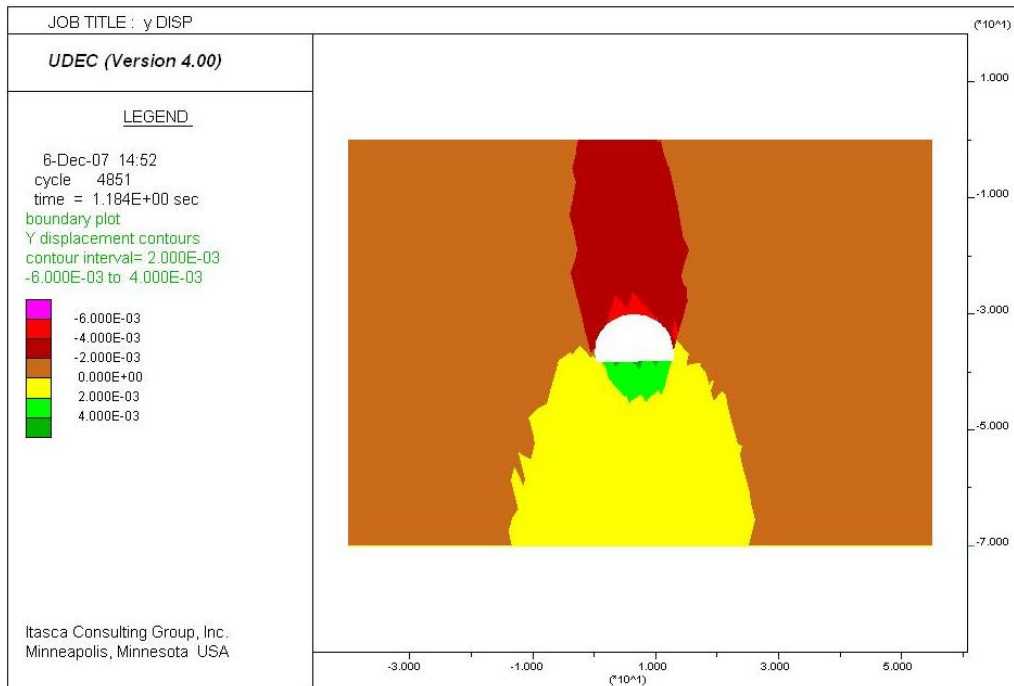


شکل ۴-۱۲- نمودار تغییر شکل تونل در زون Z_{12}

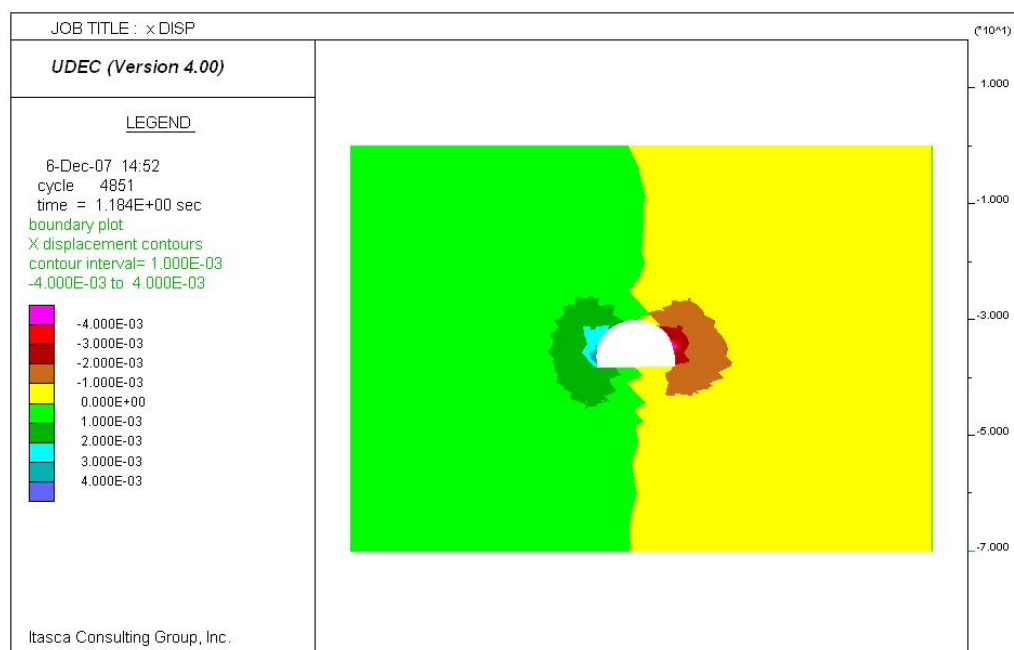


شکل ۴-۱۳- نمودار اندرکنش تونل و سیستم‌های نگهداری مورد نظر

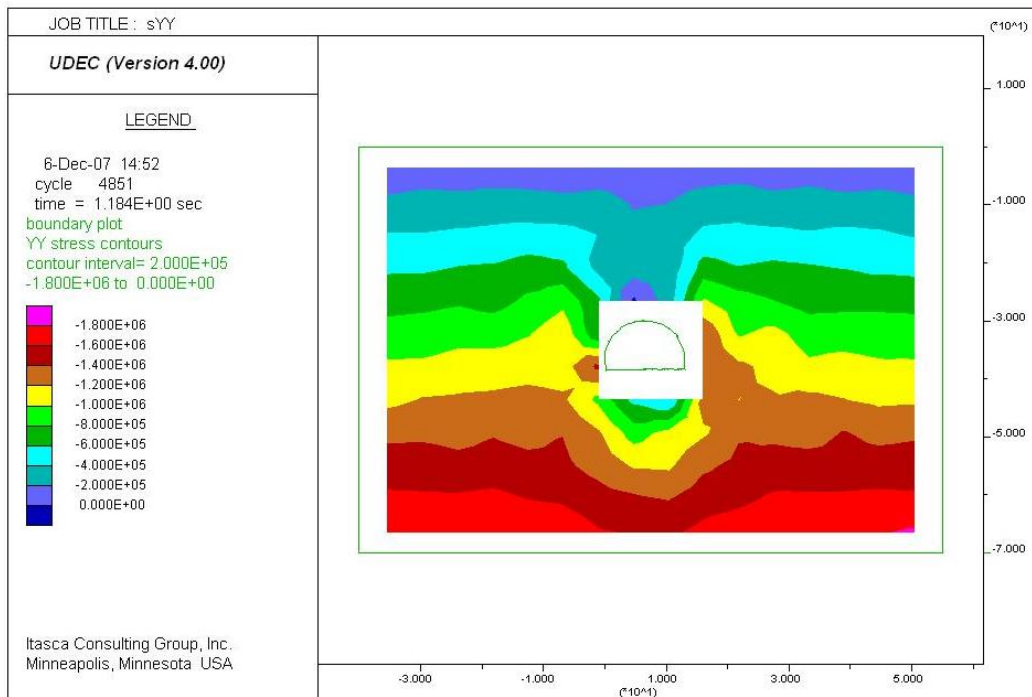
۵-۱- ناحیه ساختاری Z₂



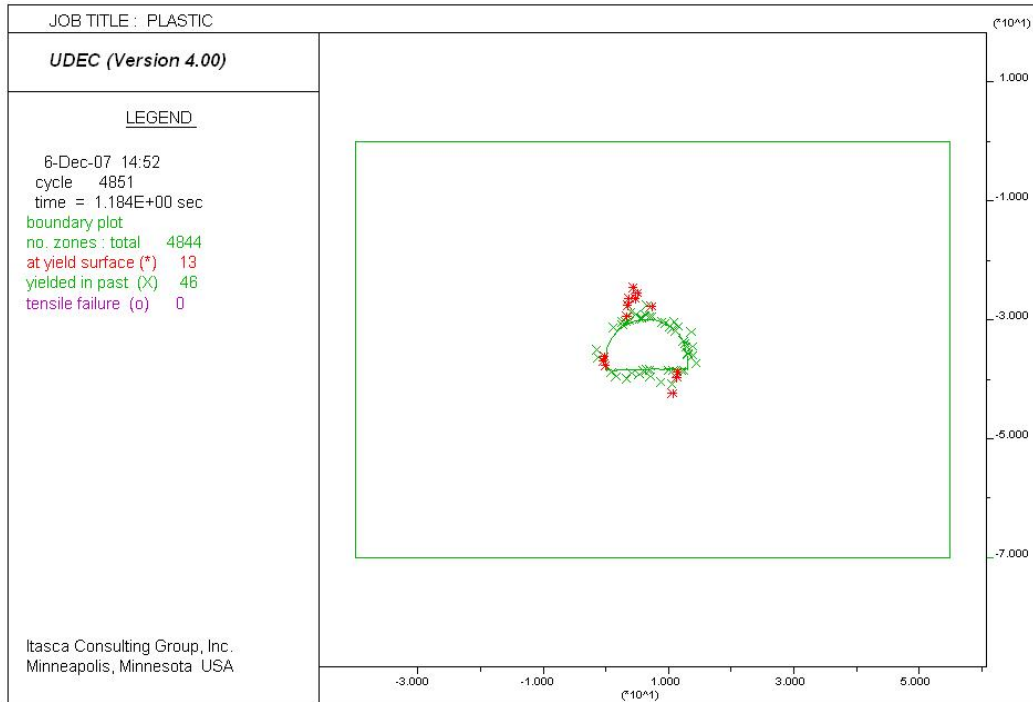
شکل ۵-۱- کنتور جابجائی قائم در زون Z₂ پس از نصب شاتکریت



شکل ۵-۲- کنتور جابجائی افقی در زون Z₂ پس از نصب شاتکریت

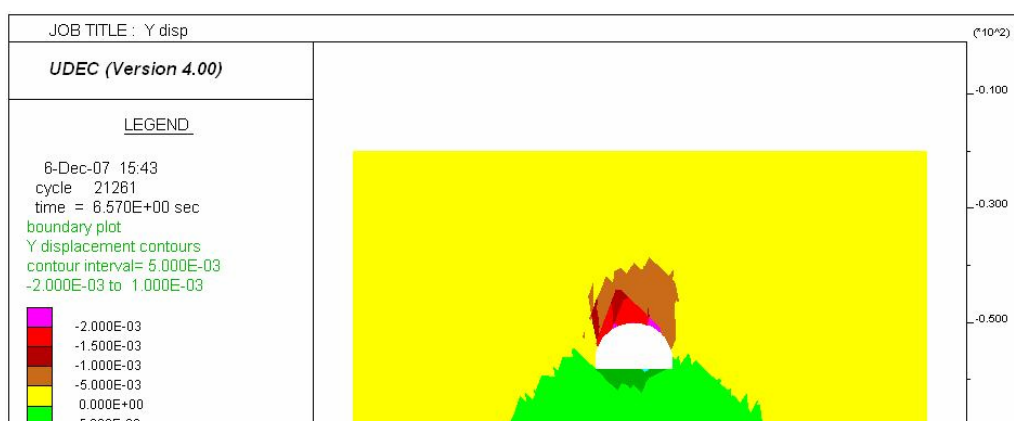


شکل ۵-۳- کنتور تنش متوسط در زون Z2 پس از نصب شاتکریت

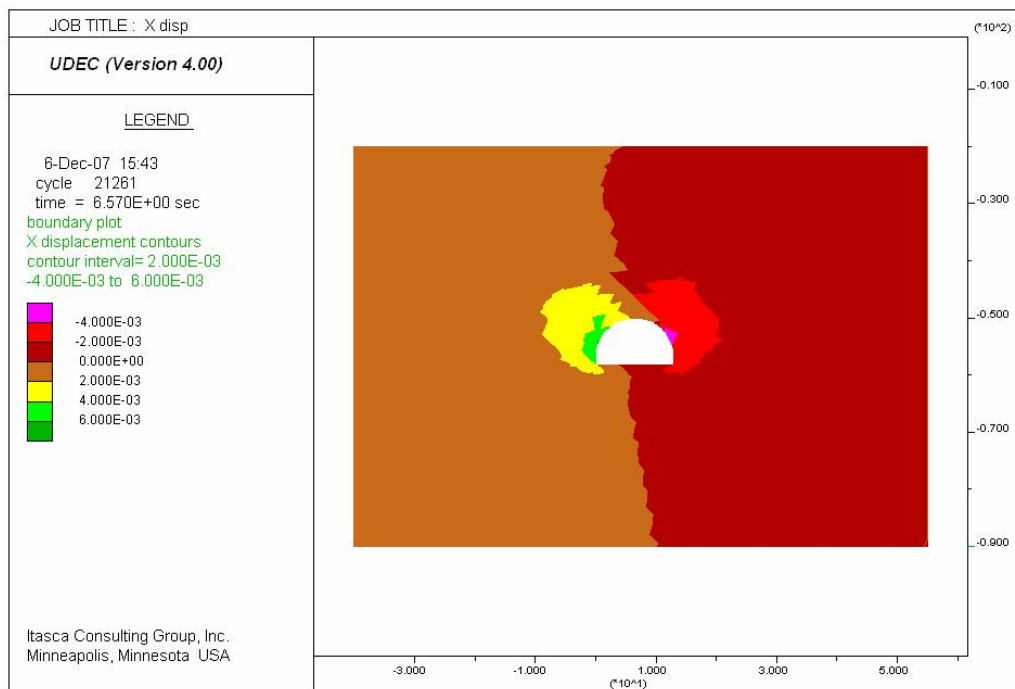


شکل ۵-۴- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z2 پس از نصب شاتکریت

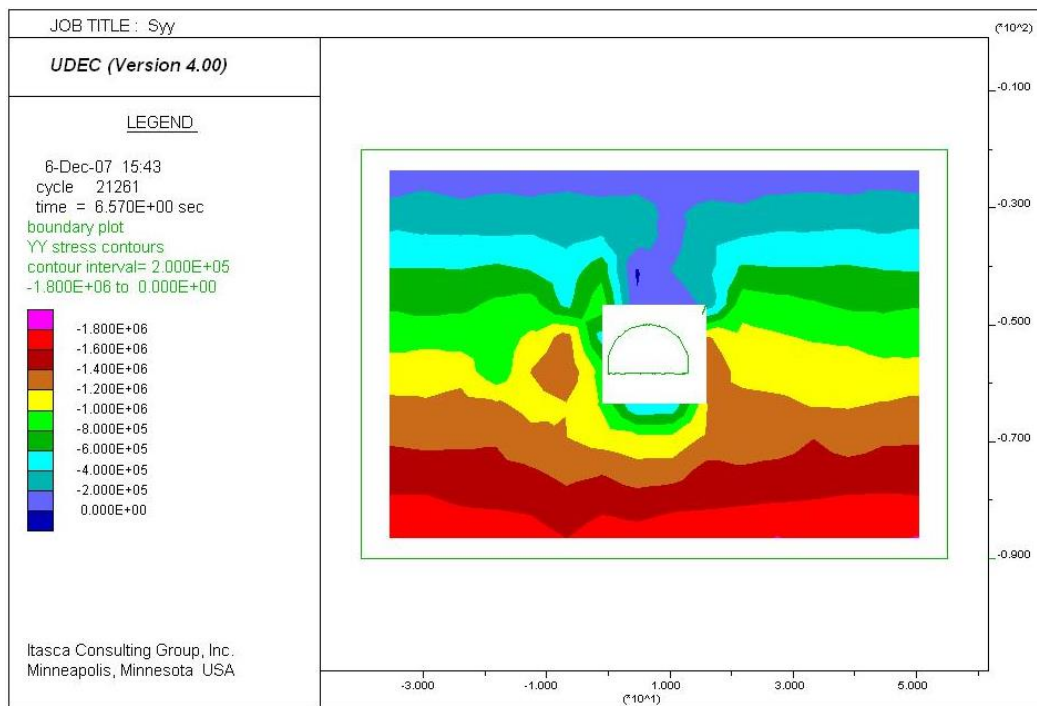
۵-۲- ناحیه ساختاری Z3



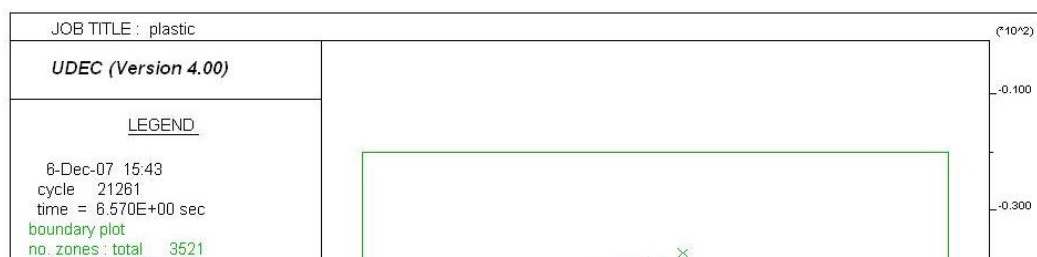
شکل ۵-۵- کنتور جابجائی قائم در زون Z₃ پس از نصب شاتکریت



شکل ۵-۶- کنتور جابجائی افقی در زون Z3 پس از نصب شاتکریت

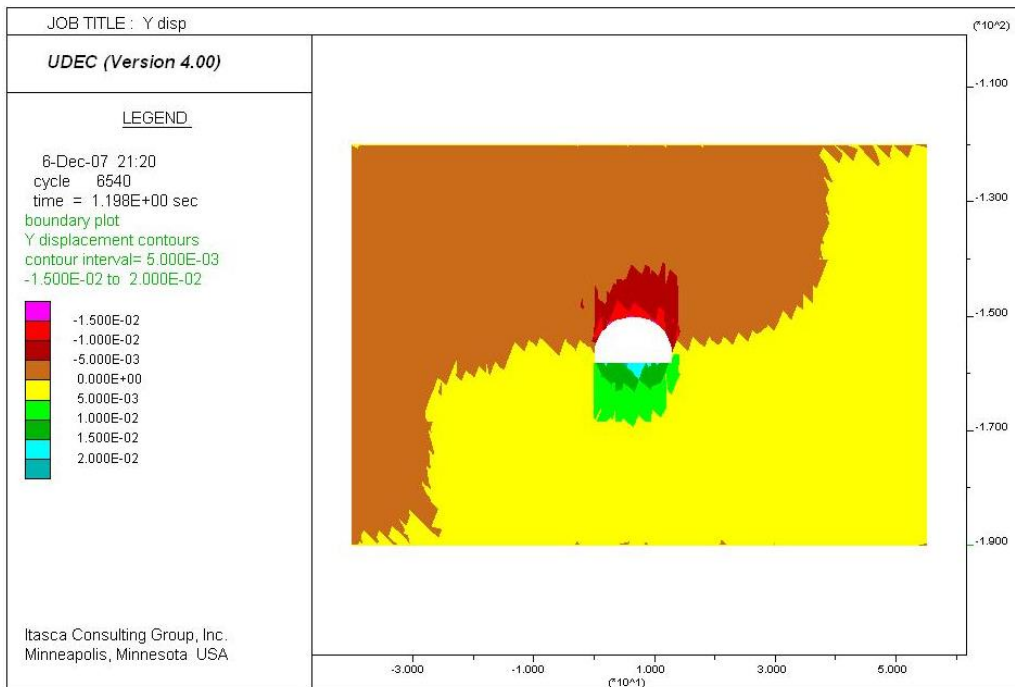


شکل ۵-۷- کنتور تنش متوسط در زون Z3 پس از نصب شاتکریت

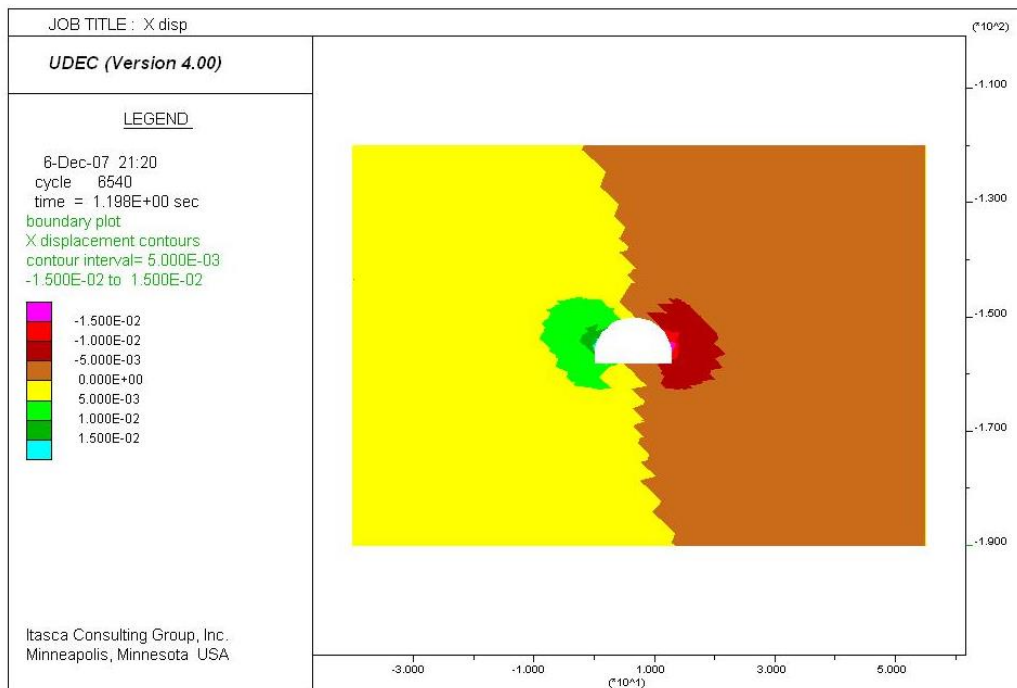


شکل ۵-۸- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z3 پس از نصب شاتکریت

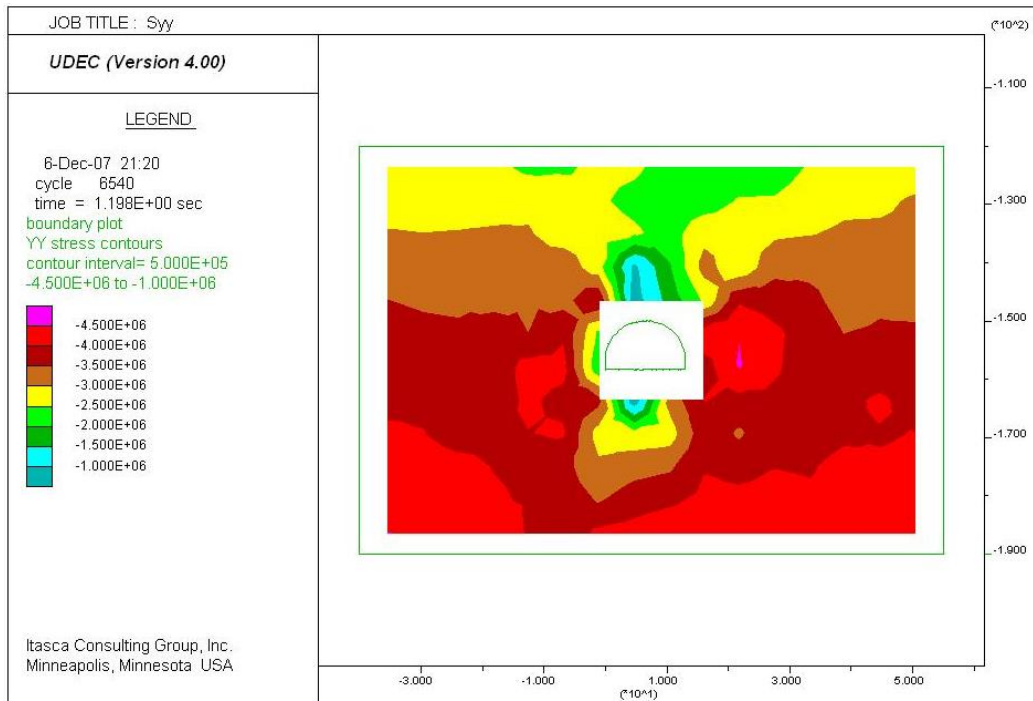
۵-۳- ناحیه ساختاری Z4



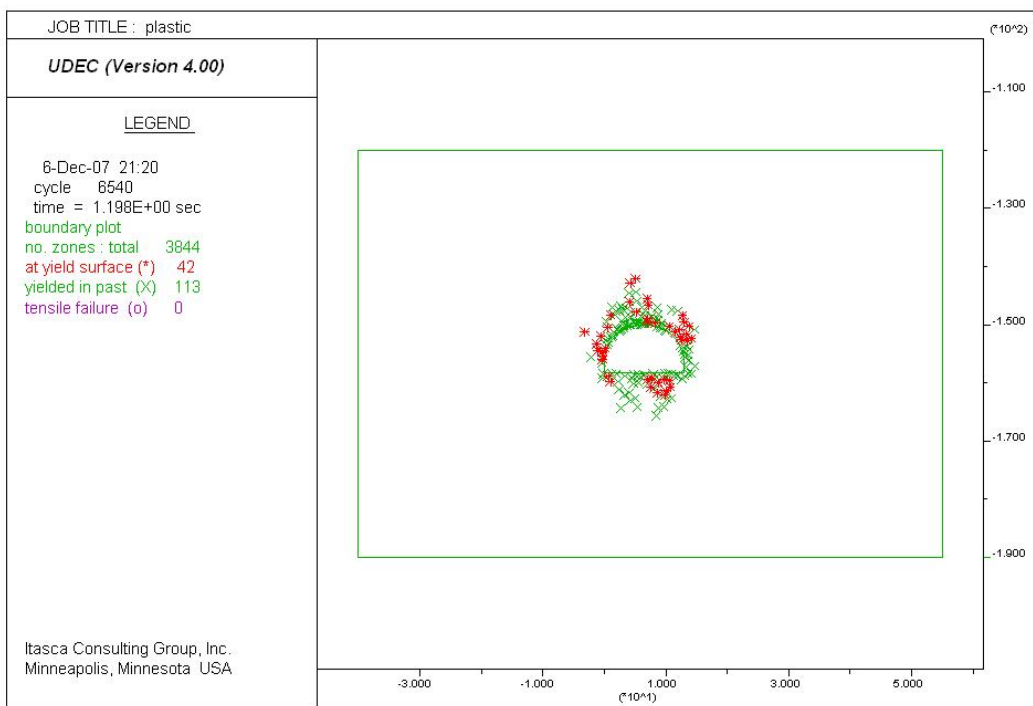
شکل ۵-۹- کنتور جابجائی قائم در زون Z4 پس از نصب شاتکریت+ پیچسنگ



شکل ۵-۱۰- کنتور جابجائی افقی در زون Z4 پس از نصب شاتکریت+ پیچسنگ

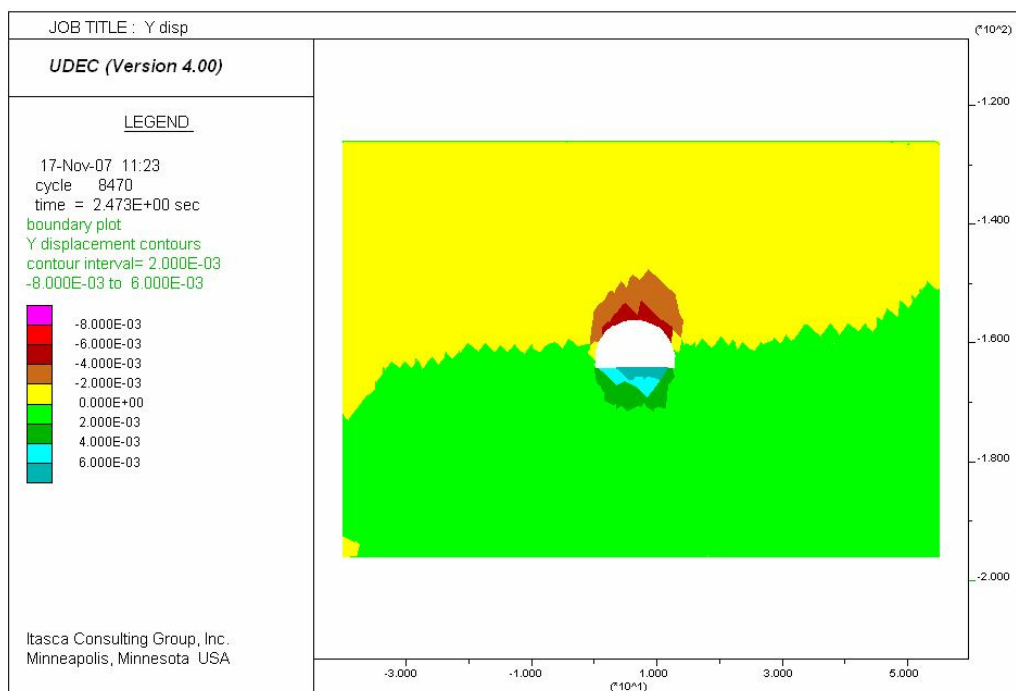


شکل ۵-۱۱- کنتور تنش متوسط در زون Z4 پس از نصب شاتکریت+ پیچسنگ

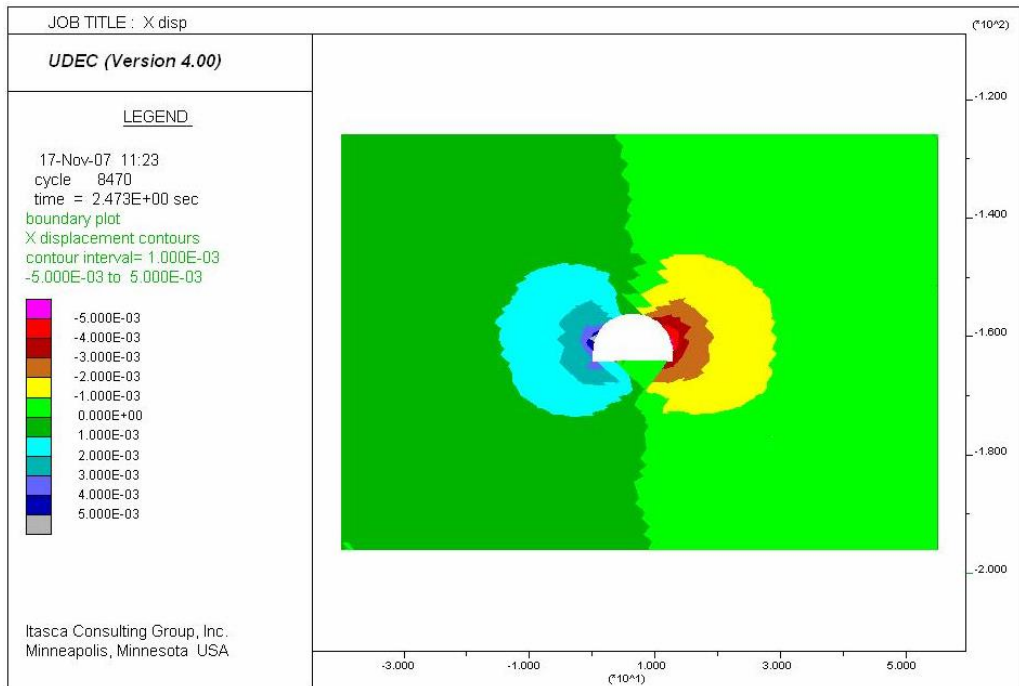


شکل ۵-۱۲ - تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z4 پس از نصب شاتکریت + پیچ‌سنگ

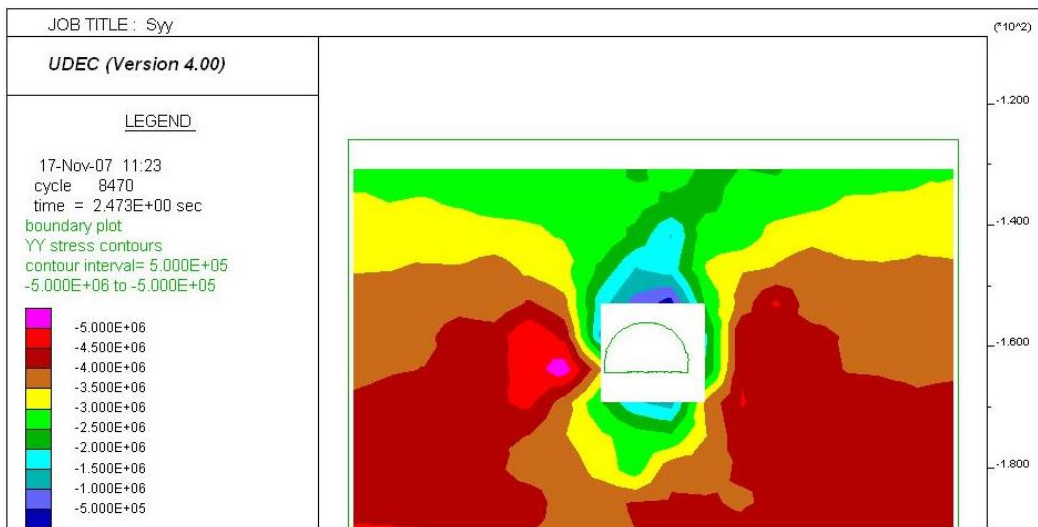
۵-۴ - ناحیه ساختاری Z6



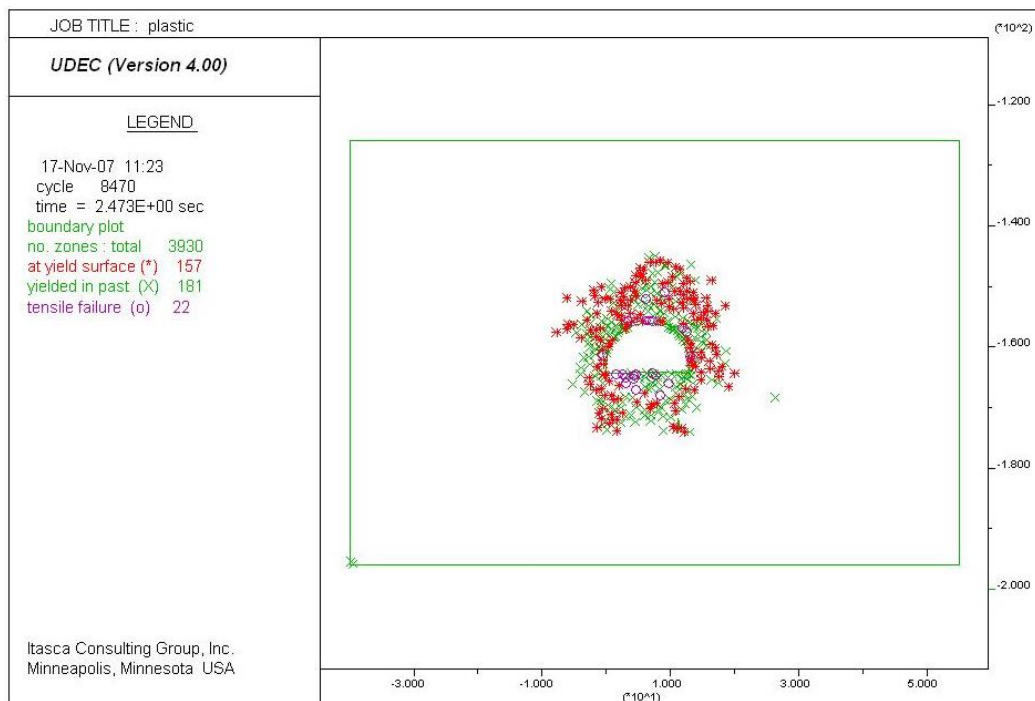
شکل ۵-۱۳- کنتور جابجائی قائم در زون Z6 پس از نصب شاتکریت+ پیچ‌سنگ



شکل ۵-۱۴- کنتور جابجائی افقی در زون Z6 پس از نصب شاتکریت+ پیچ‌سنگ

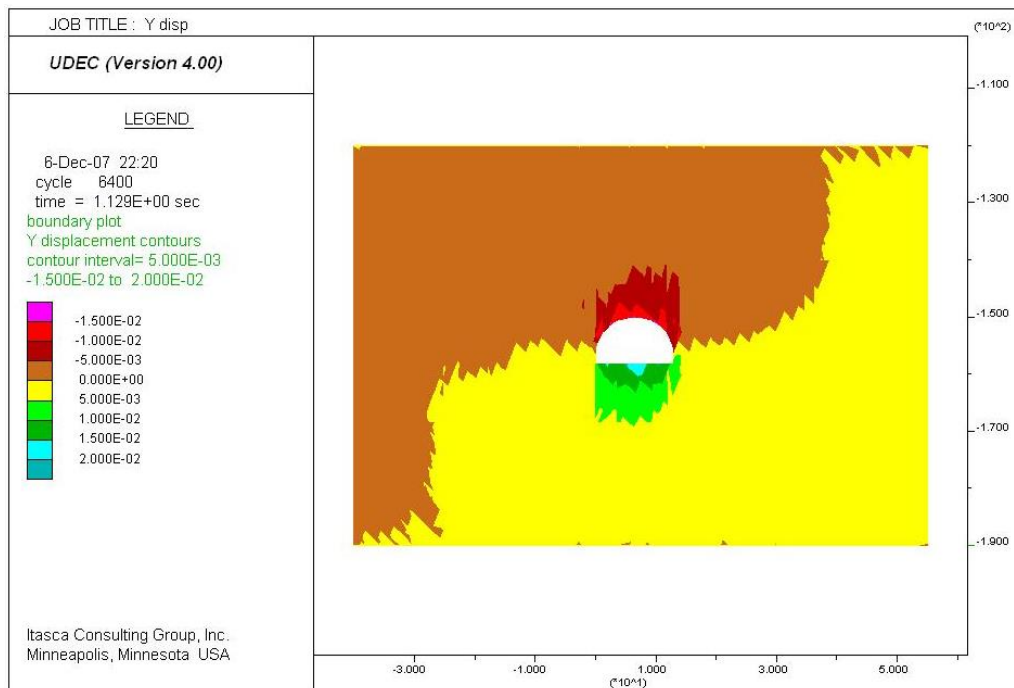


شکل ۵-۱۵- کنتور تنش متوسط در زون Z₆ پس از نصب شاتکریت + پیچ‌سنگ

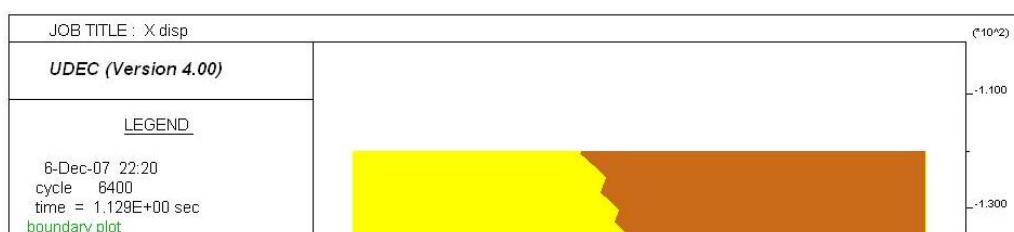


شکل ۵-۱۶- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z₆ پس از نصب شاتکریت + پیچ‌سنگ

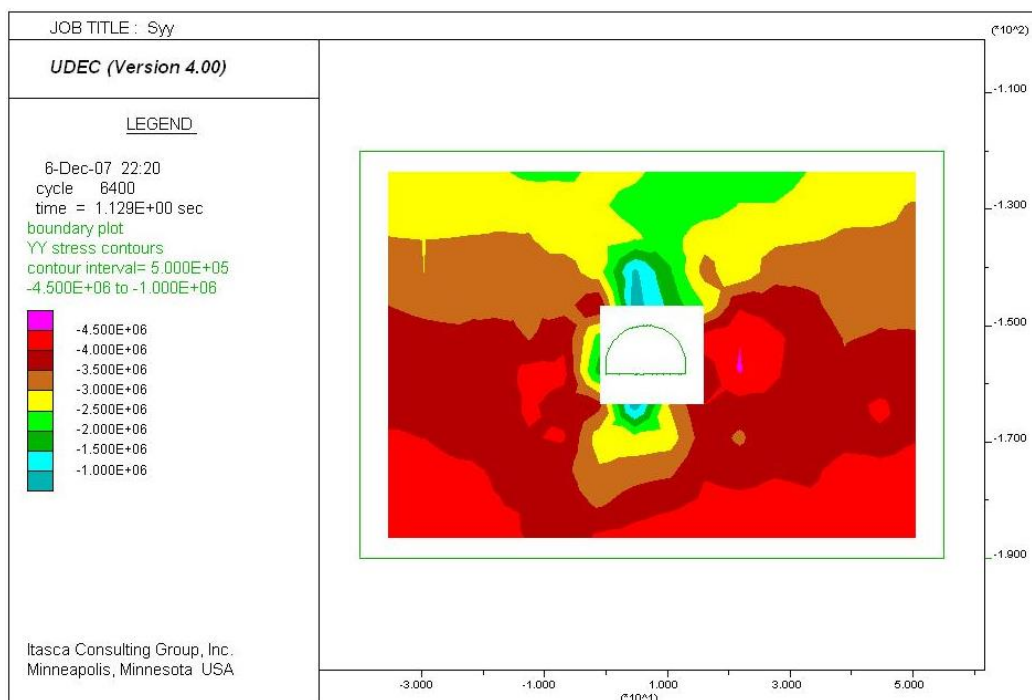
۵-۵- ناحیه ساختاری Z₈



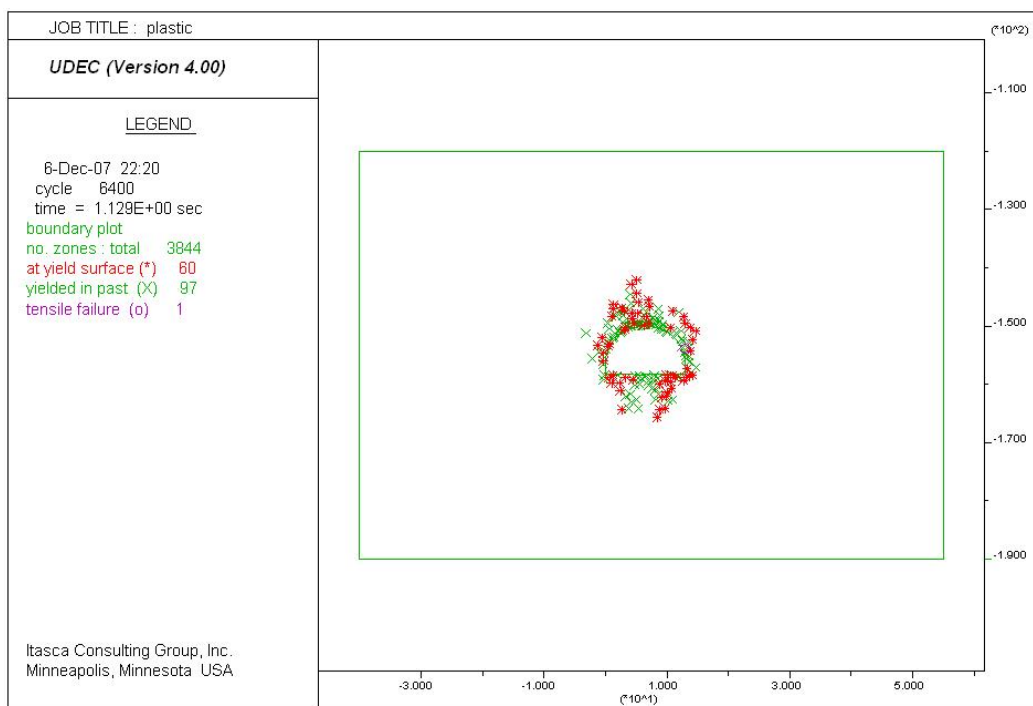
شکل ۵-۱۷- کنتور جابجایی قائم در زون Z₈ پس از نصب شاتکریت



شکل ۵-۱۸- کنتور جابجائی افقی در زون Z8 پس از نصب شاتکریت

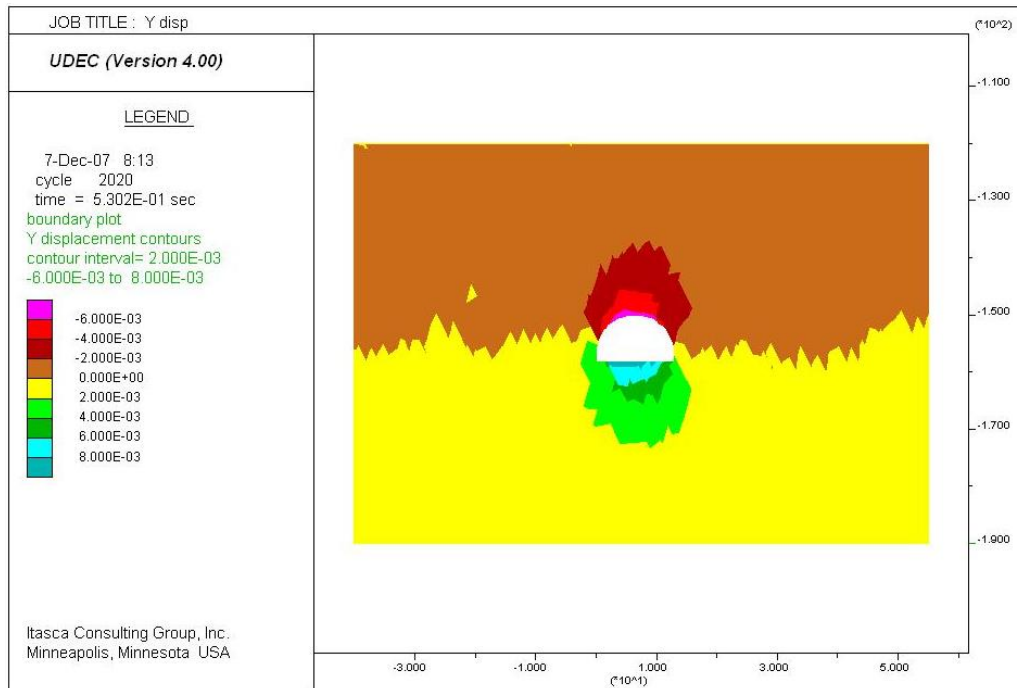


شکل ۵-۱۹- کنتور تنش متوسط در زون Z_8 پس از نصب شاکریت

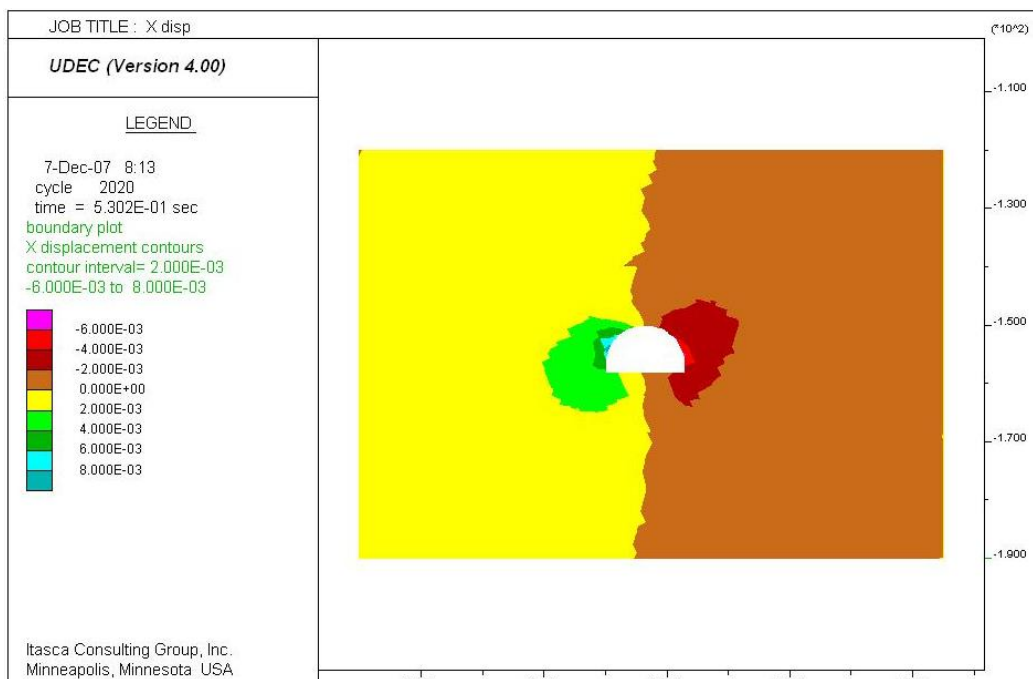


شکل ۵-۲۰- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z8 پس از نصب شاتکریت

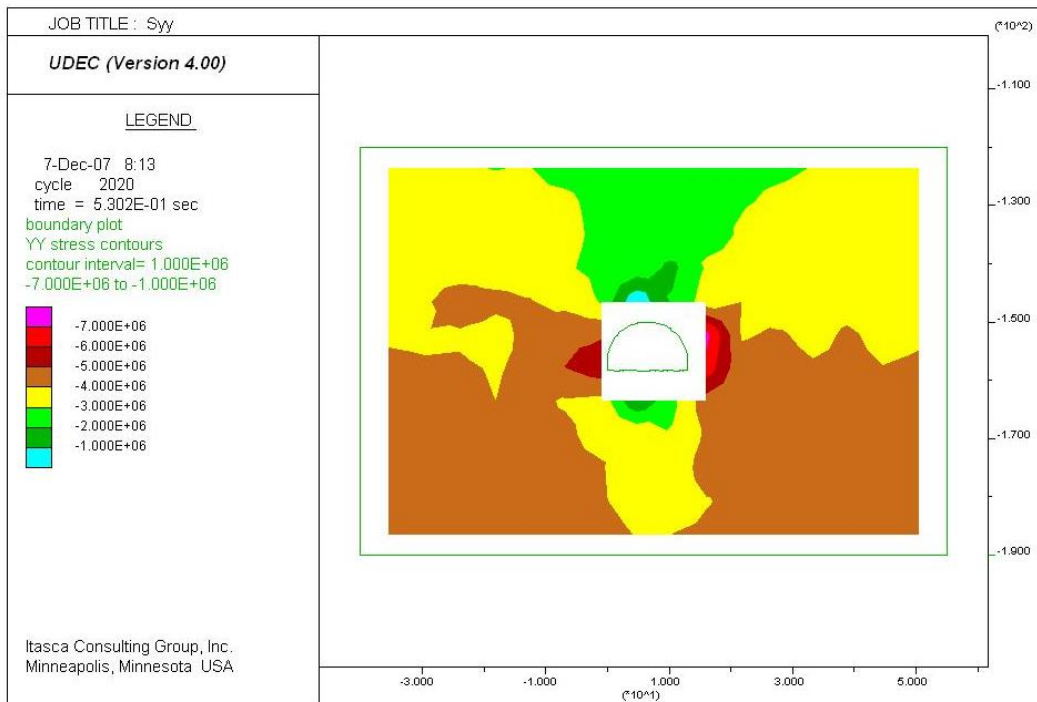
۵-۶- ناحیه ساختاری و Z



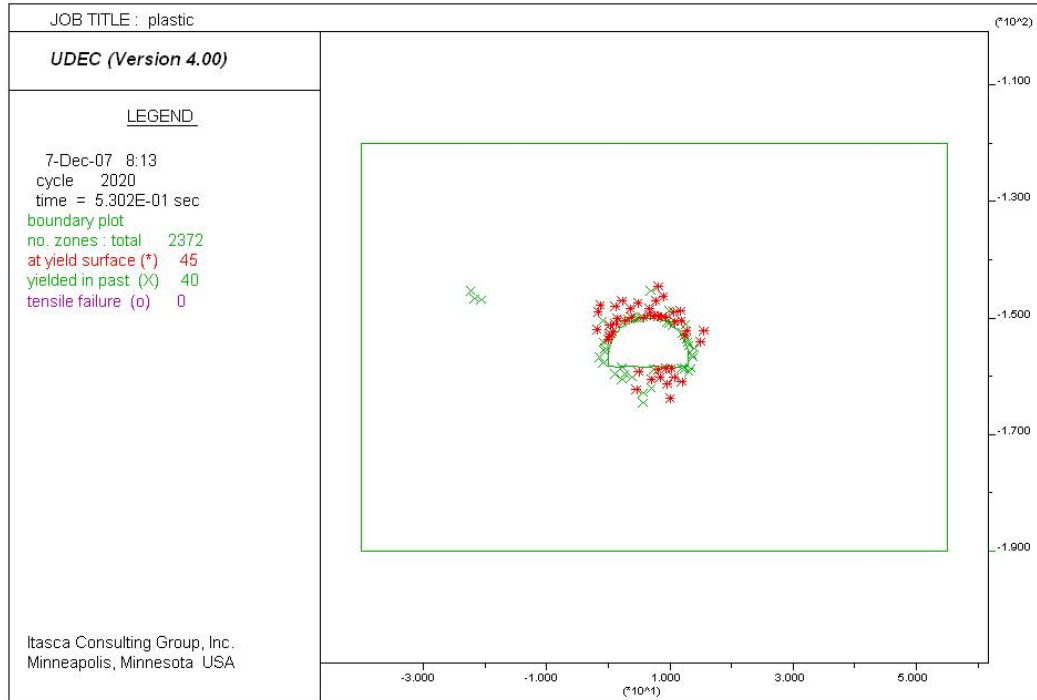
شکل ۵-۲۱- کنترل جابجایی قائم در زون Z9 پس از نصب شاتکریت



شکل ۵-۲۲- کنتور جابجائی افقی در زون Z پس از نصب شاتکریت

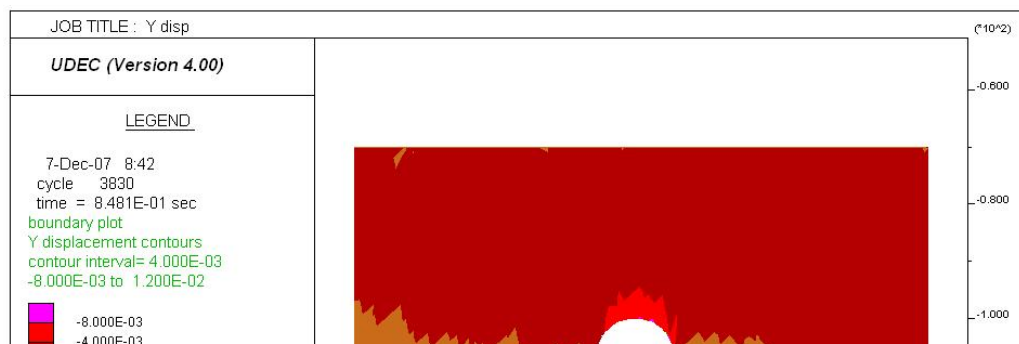


شکل ۵-۲۳- کنتور تنش متوسط در زون Z پس از نصب شاتکریت

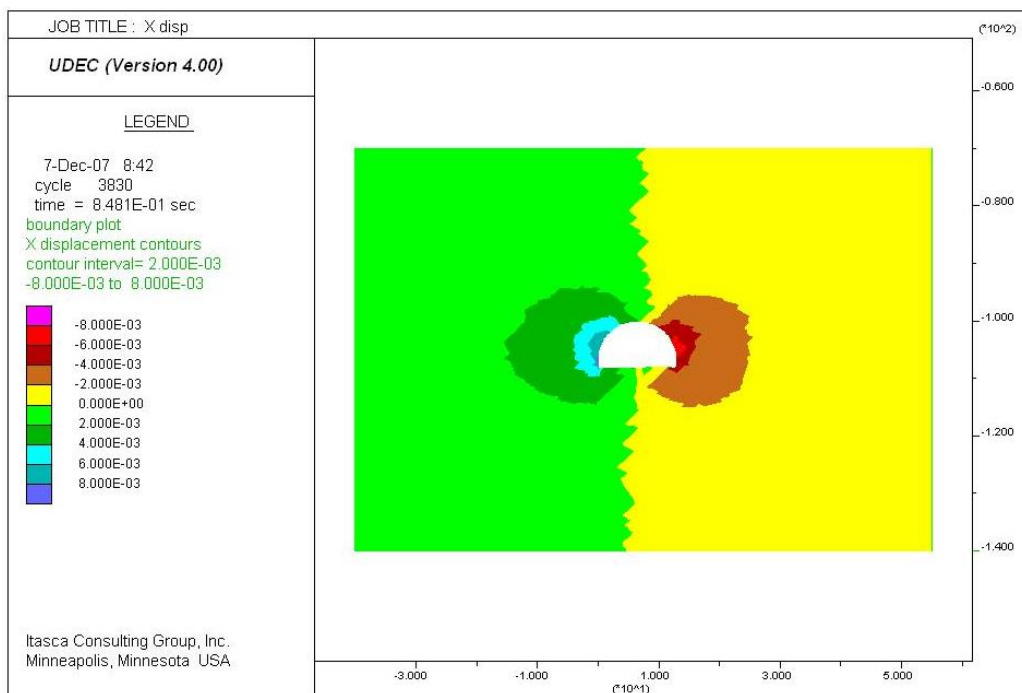


شکل ۵-۲۴- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z9 پس از نصب شاتکریت

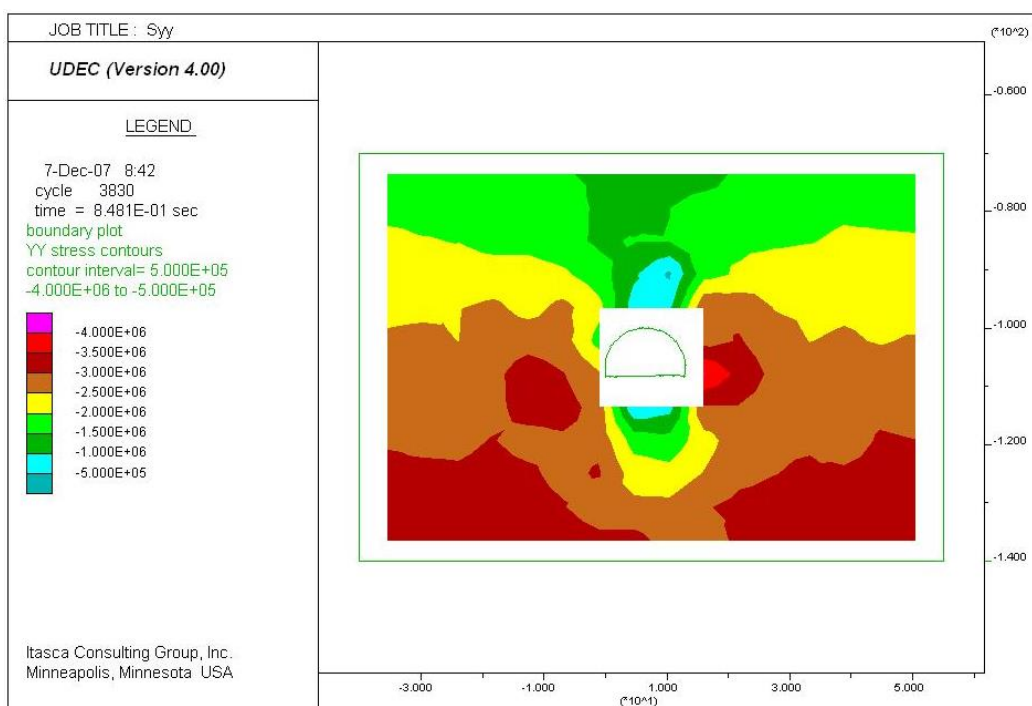
۵-۷- ناحیه ساختاری Z10



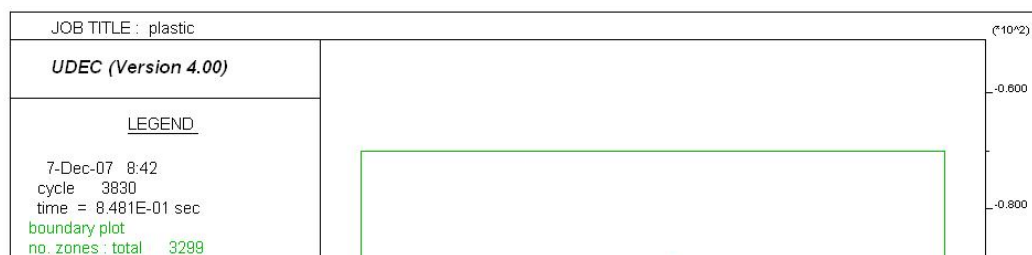
شکل ۵-۲۵- کنتور جابجائی قائم در زون Z10 پس از نصب شاتکریت



شکل ۵-۲۶- کنتور جابجائی افقی در زون Z10 پس از نصب شاتکریت

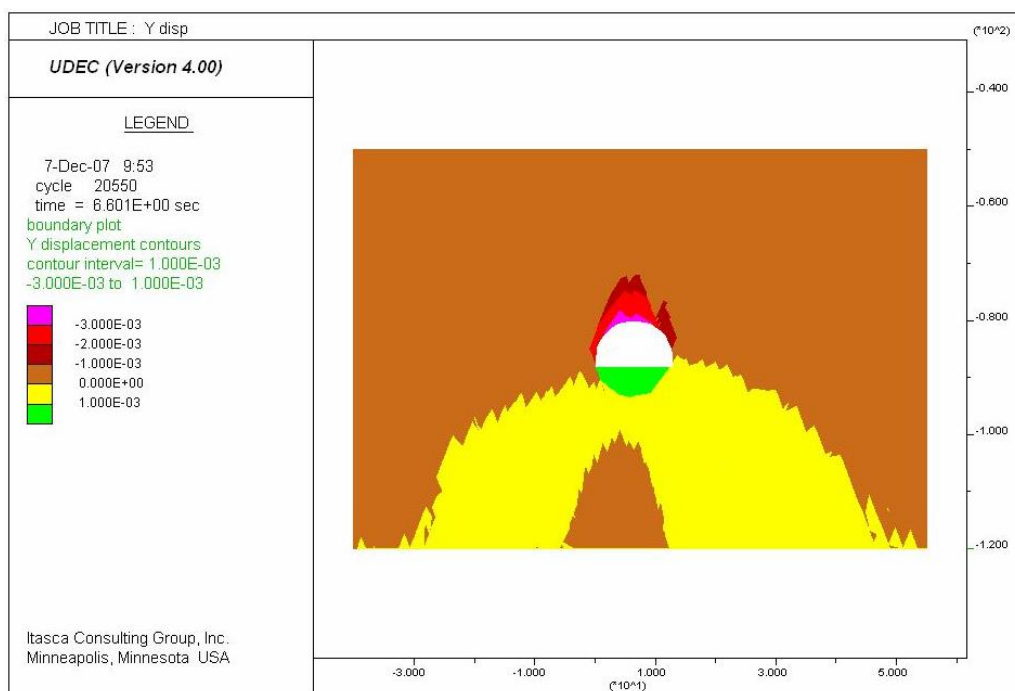


شکل ۵-۲۷- کنتور تنش متوسط در زون Z10 پس از نصب شاتکریت

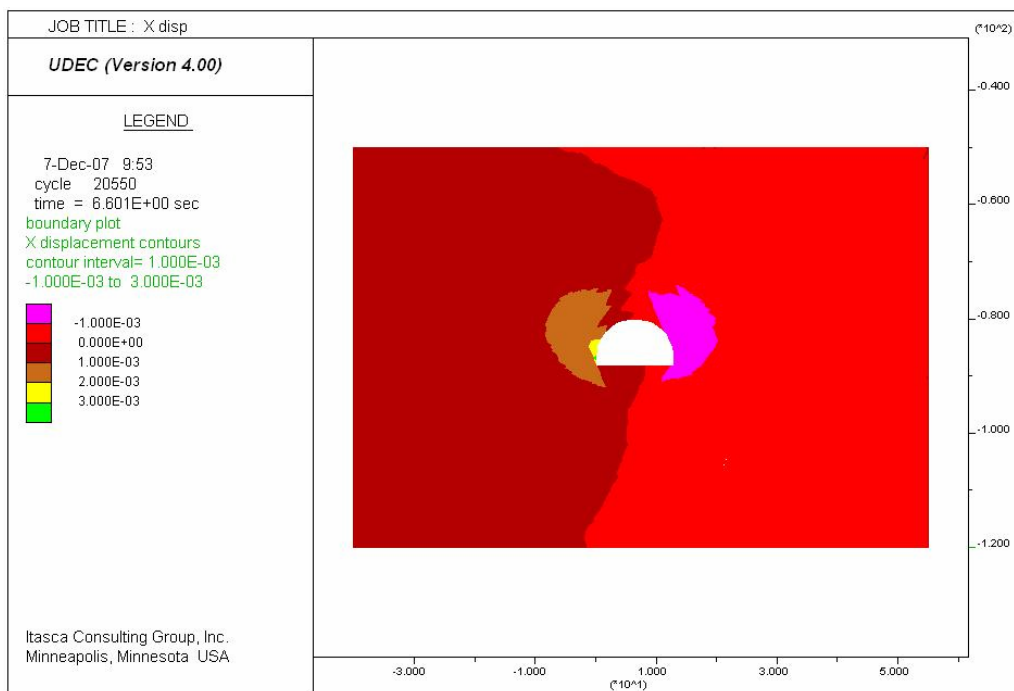


شکل ۵-۲۸- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z10 پس از نصب شاکریت

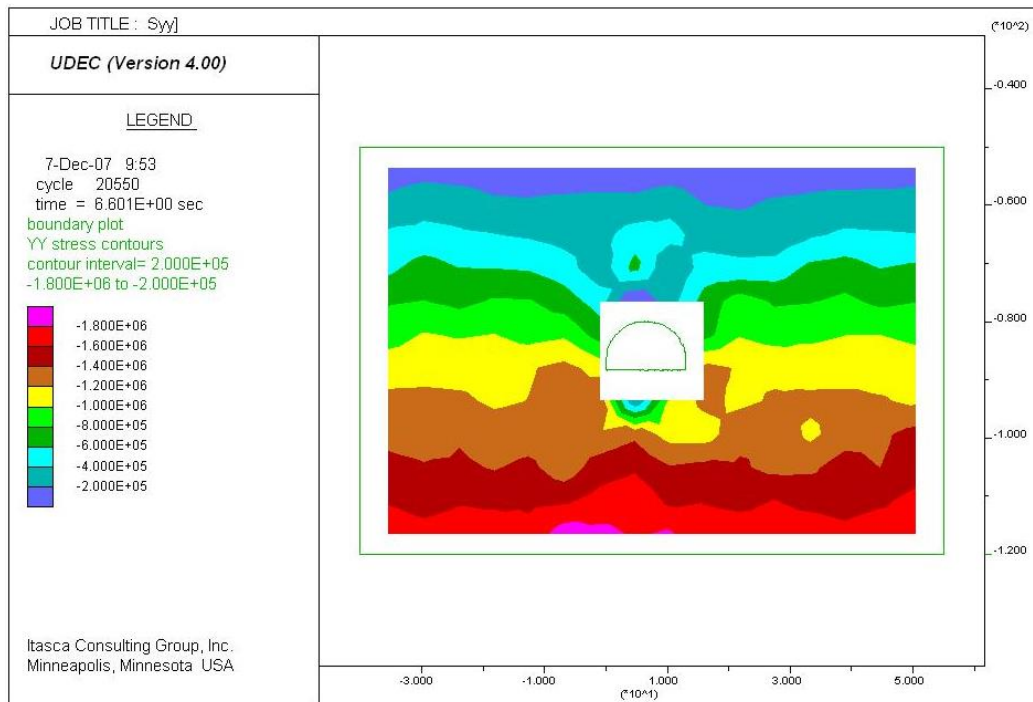
۵-۸- ناحیه ساختاری Z11



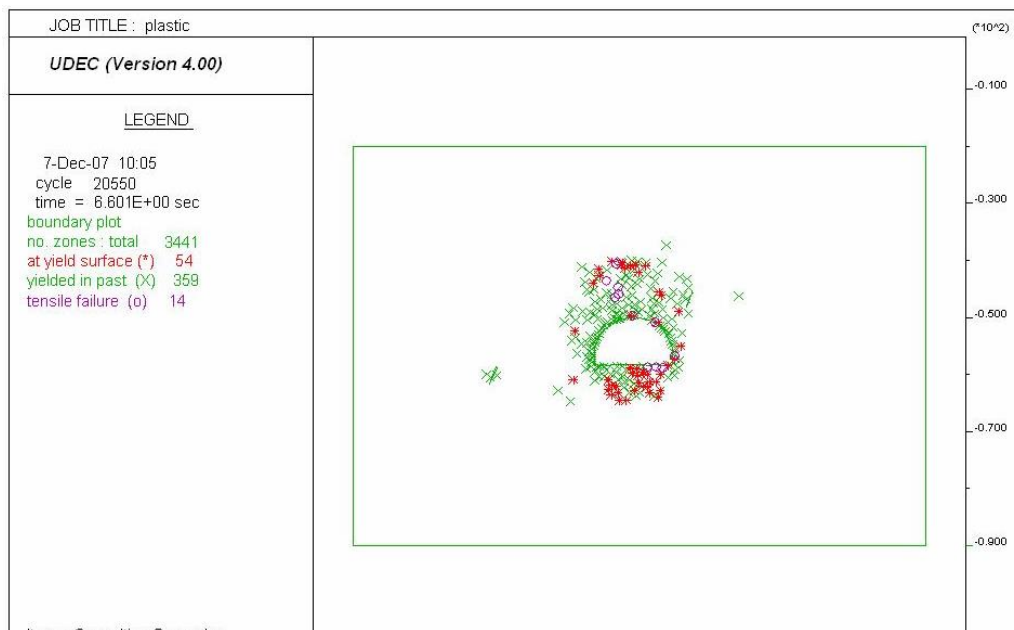
شکل ۵-۲۹- کنتور جابجائی قائم در زون Z11 پس از نصب شاتکریت+پیچ‌سنگ



شکل ۵-۳۰- کنتور جابجائی افقی در زون Z₁₁ پس از نصب شاتکریت + پیچ‌سنگ

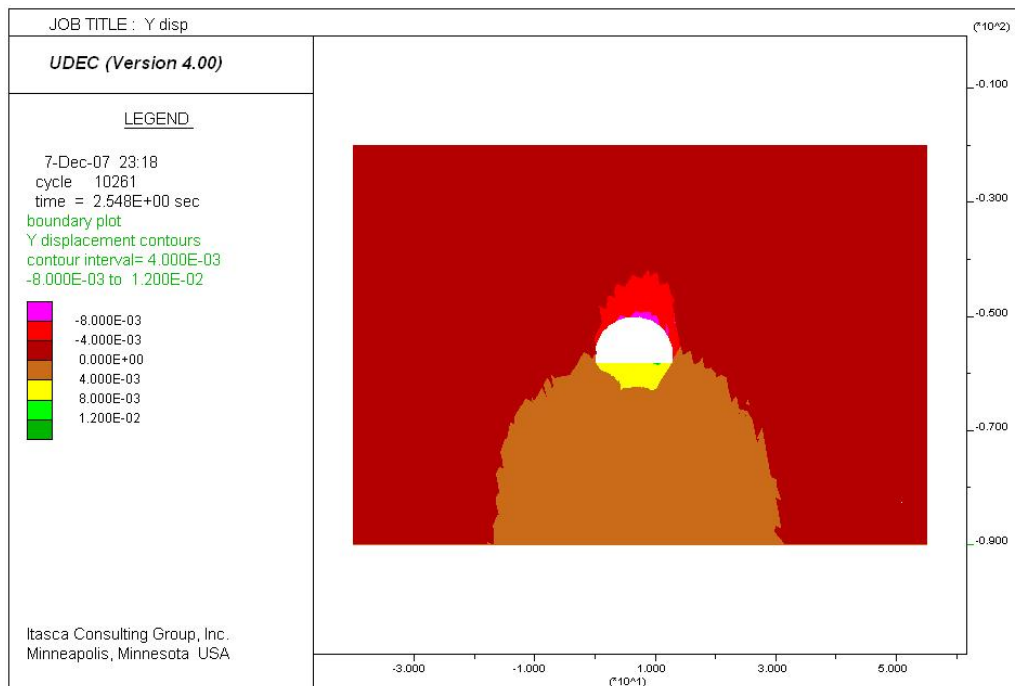


شکل ۵-۳۱- کنتور تنش متوسط در زون Z₁₁ پس از نصب شاتکریت + پیچ‌سنگ

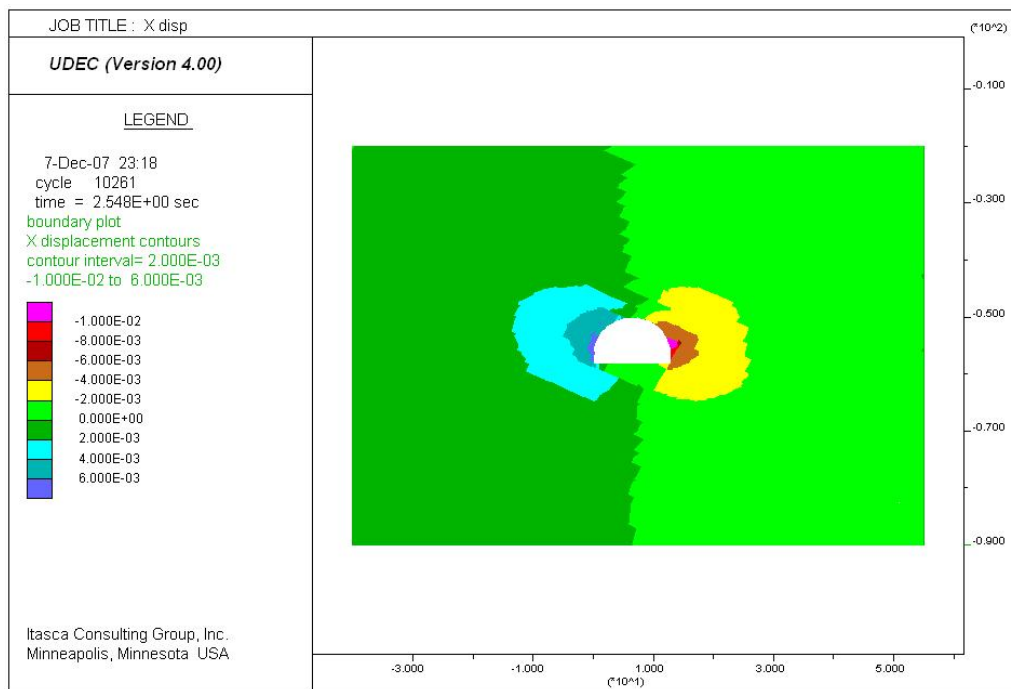


شکل ۵-۳۲- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z11 پس از نصب شاتکریت + پیچ‌سنگ

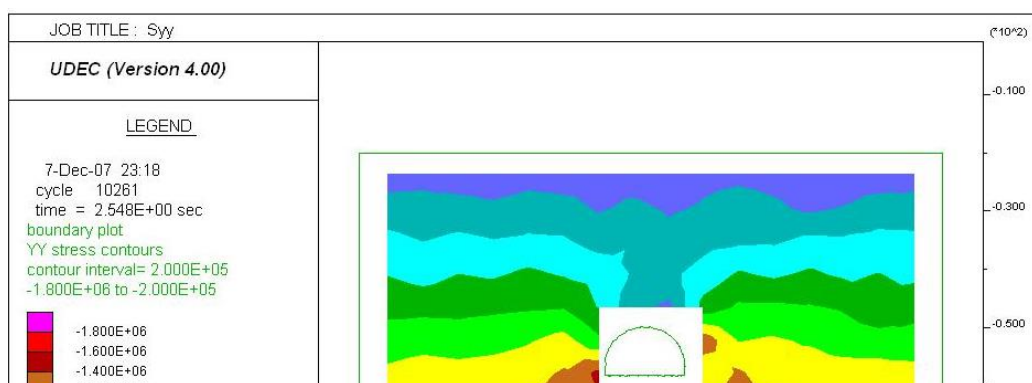
۵-۹- ناحیه ساختاری Z12



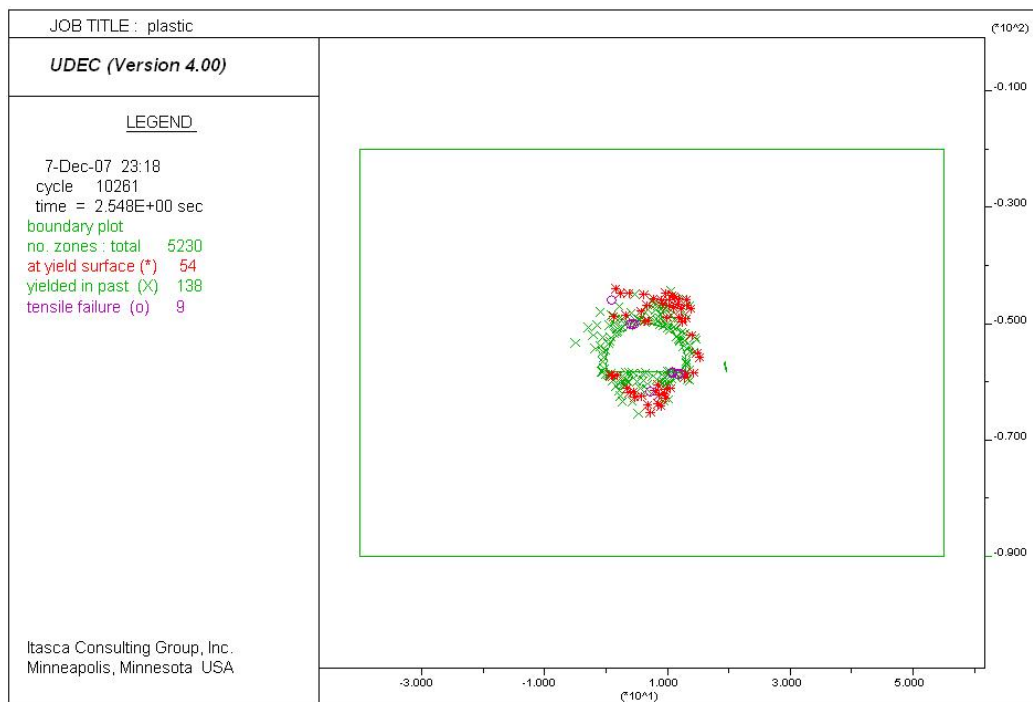
شکل ۵-۳۳- کنتور جابجائی قائم در زون Z12 پس از نصب شاتکریت + پیچسنگ



شکل ۵-۳۴- کنتور جابجائی افقی در زون Z12 پس از نصب شاتکریت + پیچسنگ



شکل ۵-۳۵- کنتور تنش متوسط در زون Z_{12} پس از نصب شاکریت + پیچسنگ



شکل ۵-۳۶- تشکیل نقاط پلاستیک اطراف تونل در زون Z12 پس از نصب شاتکریت+ پیچسنگ

منابع و مأخذ

- ۱- آقاباتی، ع. ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- ۲- اجل لوئیان، ر. و داوودی، س. ۱۳۸۲. رده‌بندی توده‌سنگ، دانشگاه اصفهان.
- ۳- اورعی، س. ک. ۱۳۸۴. نگهداری در معادن، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- ۴- بازیار، م. ح. و صالح زاده، ح. ۱۳۷۴. آزمایش‌های مکانیک خاک، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- ۵- پور مهدی، س. ۱۳۸۴. طراحی سیستم نگهداری تونل در تشکیلات مارنی: مطالعه موردی: تونل انتقال آب بابلک (سد مخزنی البرز)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- ۶- ترابی، س. ر. ۱۳۸۱. مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- ۷- توکلی، ب. ۱۳۷۵. مبانی زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه پیام نور.
- ۸- جلالی، س. م. ا. ۱۳۸۱. مروری بر مسائل مکانیک سنگ، انتشارات دانشگاه صنایع و معادن.
- ۹- خزائی، ا. ۱۳۷۸. زمین‌شناسی عمومی و مهندسی، انتشارات فرناز.
- ۱۰- درویش‌زاده، ع. ۱۳۶۴. زمین‌شناسی ایران، انتشارات دانشگاه تهران.
- ۱۱- زندی، ع. ۱۳۴۹. واحد آب، اطلس هیدروژئولوژی جنوب البرز، مرحله دوم، اداره کل آب‌های زیرزمینی.

- ۱۲- صالحی، م. ۱۳۷۹. بررسی زمین‌شناسی مهندسی سد سلمان فارسی با تأکید بر کارست آن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان.
- ۱۳- صداقت، م. ۱۳۷۲. زمین و منابع آب (آب‌های زیرزمینی)، انتشارات دانشگاه پیام نور.
- ۱۴- عکس هوایی ۴۰۰۰۰: ۱ باغ بهادران، ۱۳۷۴. سازمان نقشه‌برداری کشور.
- ۱۵- علیان، و. ۱۳۸۶. ارزیابی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی توده‌سنگ‌های مسیر تونل گردنه رخ و بررسی پایداری شیب دهانه خروجی آن (جاده اصفهان شهرکرد)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان.
- ۱۶- علیزاده، ا. ۱۳۷۹. اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا مشهد.
- ۱۷- غفوری، م. ۱۳۸۳. زمین‌شناسی مهندسی، جزوه درسی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۱۸- فهیمی فر، ا. و روشن، ح. ۱۳۸۲. آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- ۱۹- قاضی فرد، ا. و نعیم امامی، س. ۱۳۸۰. مبانی زمین‌شناسی مهندسی، انتشارات جهاد دانشگاهی اصفهان.
- ۲۰- ک. بایرون و ا. آریگلو، ترجمه: همتیان، جمال، ۱۳۷۶. طراحی سیستم نگهداری در معادن، انتشارات موسسه نشر جهاد وابسته به جهاد دانشگاهی.
- ۲۱- کلانتری، ب. ۱۳۷۹. مهندسی سازه‌های خاکی، انتشارات دانشگاه هرمزگان.
- ۲۲- کلانتری، ن. ۱۳۷۷. هیدروژئولوژی صحرائی، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۲۳- مدنی، ح. ۱۳۷۹. تونل‌سازی جلد سوم، تحلیل پایداری، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- ۲۴- مدنی، ح. ۱۳۸۱. تونل‌سازی جلد چهارم، طراحی و اجرای سیستم نگهداری، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

- ۲۵- معظمی، م. ۱۳۸۲. اصول و طراحی نگهداری در تونل‌ها، تألیف: فین. ژاک. انتشارات دانشگاه صنایع و معادن.
- ۲۶- معماریان، ح. ۱۳۷۶. زمین‌شناسی برای مهندسين، دانشگاه تهران.
- ۲۷- معماریان، ح. ۱۳۷۴. زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، دانشگاه تهران.
- ۲۸- موسویان، س. ب. ۱۳۸۴. طراحی سیستم نگهداری موقت تونل قطار شهری اصفهان، با استفاده از رده‌بندی توده‌سنگ، دانشگاه یزد.
- ۲۹- مهندسين مشاور برآیند. ۱۳۸۳. گزارش زمین‌شناسی پروژه تونل گردنه رخ.
- ۳۰- مهندسين مشاور برآیند. ۱۳۸۵. مطالعات مرحله دوم تونل گردنه رخ.
- ۳۱- نقشه زمین‌شناسی ریز لنگان. ۱۳۷۸. سازمان زمین‌شناسی کشور.
- ۳۲- وی. اس. وتوکوری و ک. کاتسویاما. ترجمه: فاروق حسینی، محمد. ۱۳۷۹. درآمدی بر مکانیک سنگ، انتشارات نشر کتاب دانشگاهی مرکز خدمات فرهنگی سالکان.
- ۳۳- هراتی، م. ر. ۱۳۷۴. طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها در ارتباط با طراحی فضاهای زیرزمینی، شرکت انتشارات فنی ایران.
- ۳۴- هوک و براون، ترجمه: فهیمی‌فر، احمد. ۱۳۷۶. سازه‌های زیرزمینی در سنگ، انتشارات آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری.
- ۳۵- یار احمدی، ع. ۱۳۷۴. کاربرد کامپیوتر در معادن، جزوه درسی دانشگاه یزد.
- 36- Chang, Y., "Tunnel Support with Shotcret in Weak Rock", 1994.
- 37- Daemen, J. J. k. Problems in Tunnel Support Mechanics. Underground Space, vol 1, 1977.
- 38- Frederich, S. Standard Handbook for Civil Engineers, Third Edition, West Palm Beach, FL, 1983.
- 39- Hoek, E. Kaiser, P. K- Bawden, W. F., Support of Underground Excavation in Hard Rocks, 1995.
- 40- Hoek, E., Brown, E. T., Underground Excavation in Rock, IMM, London, 1982.
- 41- Itasca Consulting group, UDEC Version 4.00, User manual, 2004.

- 42- Ladanyi, B. Use of the Long-Term Strength Concept in the Determination of Ground Pressure on Tunnel Linings. Proc. 3rd Congr., International Society Rock Mechanic., Denver, vol 28, 1974.
- 43- Sinha, s. Underground Structures: Design & Instrumentation, Elsevier Publication, 1989.
- 44- User's Guide, Rock mass strength analysis using the Hoek-Brown failure criterion, 2002.