

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

موضوع:

## تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری اولیه در تونل انتقال آب خدنگستان فریدونشهر

گردآورنده : روح اله جاودان

اساتید راهنما :

دکتر سید رحمان ترابی

دکتر فرهنگ سرشکی

استاد مشاور: مهندس فرامرز غلامی

پاییز ۱۳۸۶

سلاسل

## تشکر و قدردانی :

سپاس یزدان پاک را که قلم را آفرید و به آن سوگند یاد فرمود. حق تعالی را بسی شکر گذاریم که توفیقمان داد تا در وادی بزرگترین معرفت بشری (علم)، گامی هرچند ناچیز برداریم و در این مسیر از محضر انسانهایی عارف و عاشق پیشه فیض بریم که تمامی زندگی خویش را عاشقانه صرف علم نموده اند.

بر خود لازم می دانم از زحمات اساتید بزرگوام جناب آقایان دکتر سید رحمان ترابی و دکتر فرهنگ سرشکی که مسولیت راهنمایی پایان نامه را بر عهده داشتند، تقدیر و تشکر بنمایم.

از جناب آقای مهندس فرامرز غلامی استاد مشاور صنعتی اینجانب که در نهایت تواضع هدایت کننده اینجانب در جهت جمع آوری اطلاعات و تدوین پایان نامه بودند، سپاس گذارم.

از جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی که در امر مدلسازی و نحوه استفاده از روش عددی با کمال صبر و متانت مرا راهنمایی نمودند، نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

در پایان از تمامی اساتید محترم دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود، بویژه جناب آقای دکتر کاکایی و جناب آقای دکتر عطایی که با حمایت های همه جانبه خویش موجبات دلگرمی بیشتر برای ادامه کار را فراهم نمودند و همچنین زحمت داوری پایان نامه اینجانب را بر عهده گرفتند، تشکر و قدردانی می نمایم.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

و همسر مهربانم

## چکیده:

رودخانه زاینده رود به عنوان یکی از مهمترین رودخانه‌های قسمت خشک مرکز ایران، هرچه بیشتر نیاز به افزایش آورد سالیانه دارد. لذا پس از آوردهای تونل‌های اول و دوم کوه‌رنگ، اقدام به حفر تونل سوم کوه‌رنگ، تونل انتقال آب چشمه لنگان و بالاخره تونل انتقال آب چشمه خدنگستان جهت افزایش آورد سالیانه شده است.

مجموعه خط انتقال خدنگستان شامل پنج قطعه تونل به طول مجموعاً "۹۶۰۰ متر و دو قطعه ناوکانال با طول ۲۵۵۰ متر می باشد. شکل مقطع تونل نعل اسبی با ارتفاع ۵ متر و عرض ۵ متر در کف در نظر گرفته شده است.

تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری اولیه تونل به کمک روشهای تجربی (روش RMR و Q)، روش تحلیلی (تحلیل اندرکنش سنگ - سیستم نگهداری) و روش عددی (استفاده از نرم افزار UDEC 4.0) در این پایان نامه صورت گرفته است. بر اساس نتایج، ترکیبی از شاتکریت با ضخامت‌های متغیر (بین ۵ تا ۱۷/۵ سانتیمتر) برای قسمت‌های مختلف تونل و پیچ سنگ‌هایی به طول ۳ متر و قطر ۲۵ میلیمتر با فاصله داری ۱/۵ متری برای نگهداری موقت تونل در نظر گرفته شده و در نهایت ضرایب ایمنی برای این سیستم نگهداری محاسبه شده است.

تحلیل پایداری - سیستم نگهداری - نرم افزار UDEC

فصل اول: کلیات .....	۱
۱-۱- مقدمه .....	۲
۱-۲- ویژگیهای تونل انتقال آب خدنگستان .....	۴
۱-۲-۱- مشخصات تونل انتقال آب خدنگستان .....	۶
۱-۲-۲- مشخصات ناو کانالهای انتقال خدنگستان .....	۶
۱-۲-۳- محل و موقعیت و جغرافیایی .....	۸
۱-۲-۴- راههای دسترسی .....	۹
۱-۲-۵- مشخصات بند انحرافی خدنگستان .....	۱۰
۱-۲-۶- حفاری در تونل انتقال آب خدنگستان .....	۱۲
۱-۳- مروری بر کارهای انجام شده .....	۱۲
۱-۴- اهداف تحقیق و سازماندهی پایان نامه .....	۱۲
فصل دوم: زمین شناسی مهندسی و بخش بندی مسیر تونل انتقال آب خدنگستان ...	۱۴
۱-۲- مقدمه .....	۱۵
۱-۲-۲- زمین شناسی عمومی منطقه .....	۱۵
۱-۲-۳- زمین شناسی ساختمانی منطقه اجرای پروژه .....	۱۸
۱-۲-۴- هیدروژئولوژی .....	۱۹
۱-۲-۵- میزان نفوذ پذیری واحدهای مختلف سنگی .....	۱۹
۱-۲-۵-۱- واحدهای نفوذپذیر .....	۲۰
۱-۲-۵-۲- واحدهای با نفوذپذیری کم .....	۲۰
۱-۲-۵-۳- واحدهای نفوذناپذیر .....	۲۰
۱-۲-۶- چشمه خدنگستان .....	۲۱

۲۱	۷-۲- زمین شناسی مهندسی مخزن و ورودی تونل
۲۴	۸-۲- زمین شناسی مهندسی مسیر خط انتقال خدنگستان
۲۴	۱-۸-۲- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۰+۰۰۰ الی ۰+۱۹۰ (پهنه A)
۲۵	۲-۸-۲- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۰+۱۹۰ الی ۱+۷۹۰ (پهنه B)
۲۶	۳-۸-۲- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۱+۷۹۰ الی ۲+۶۴۵ (پهنه C)
۲۷	۴-۸-۲- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۲+۶۴۵ الی ۳+۸۱۰ (پهنه D)
۲۸	۵-۸-۲- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۳+۸۱۰ الی ۶+۵۸۰ (پهنه E)
۲۹	۶-۸-۲- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۶+۵۸۰ الی ۶+۷۰۰ (پهنه F)
۲۹	۷-۸-۲- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۶+۷۵۰ الی ۸+۴۶۰ (پهنه G)
۳۰	۸-۸-۲- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۸+۴۶۰ الی ۹+۱۷۰ (پهنه H)
۳۱	۹-۸-۲- زمین شناسی مهندسی از کیلومتر ۹+۱۷۰ الی ۱۱+۲۶۰ (پهنه I)
۳۲	فصل سوم : وضعیت درزه ها و آزمایشهای انجام شده روی نمونه ها
۳۳	۱-۳- مقدمه
۳۳	۲-۳- وضعیت درزه ها در سینه کارها ( مقاطع عمود بر محور تونل )
۳۷	۳-۱- گمانه های حفر شده در مسیر تونل
۳۷	۵-۳- آزمایشات لوژان
۳۸	۵-۳- آزمایشات آزمایشگاهی
۳۸	۳-۱-۵- اندازه گیری خصوصیات فیزیکی
۴۰	۳-۲-۵- اندازه گیری مدول یانگ
۴۰	۳-۵-۳- اندازه گیری ضریب پواسون
۴۰	۳-۵-۴- تورم آزاد و فشار تورمی
۴۱	۳-۵-۵- شاخص دوام

- ۴۲ ..... ۳-۵-۶- مقاومت فشاری تک محوری
- ۴۳ ..... ۳-۵-۷- آزمایش سه محوری
- ۴۳ ..... ۳-۵-۸- آزمایش برش در امتداد درزه ها

## فصل چهارم : پارامترهای ژئومکانیکی مسیر تونل و برآورد سیستم نگهداری موقت بر

اساس طبقه بندی توده سنگ ..... ۴۴

۴-۱- مقدمه ..... ۴۵

۴-۲- رده بندی مهندسی با روش پیشنهادی بنیادسکی (RMR) ..... ۴۵

۴-۳- روش طبقه بندی براساس شاخص کیفی ( Q ) ..... ۴۶

۴-۴- برآورد پارامترهای ژئومکانیکی با روش RMR ..... ۴۷

۴-۵- سیستم های نگهداری اولیه ..... ۵۱

۴-۵-۱- بتن پاشی (شاتکریت) Shotcrete ..... ۵۱

۴-۵-۲- شبکه تور فولادی Wire Mesh ..... ۵۲

۴-۵-۳- پیچ سنگ (راک بولت) Rock Bolt ..... ۵۳

۴-۵-۴- قاب فولادی Rib Frame ..... ۵۴

۴-۶- برآورد سیستم نگهداری اولیه بر اساس روشهای تجربی ..... ۵۵

۴-۶-۱- روش RMR - بنیادسکی ..... ۵۵

۴-۶-۲- روش Q برای تعیین سیستم نگهداری اولیه ..... ۵۶

## فصل پنجم : برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس تحلیل اندرکنش سنگ - سیستم

نگهداری ..... ۵۸

۵-۱- مقدمه ..... ۵۹

۵-۲- فرضیات اساسی در رسم منحنی مشخصه زمین ..... ۵۹



۶۱	۳-۵- مراحل رسم منحنی مشخصه زمین .....
۶۳	۴-۵- منحنی مشخصه سیستم نگهداری .....
۶۴	۵-۴-۱- محاسبه تغییر شکل اولیه قبل از نصب سیستم نگهداری .....
۶۵	۵-۴-۲- سیستم نگهداری موجود برای شاتکریت .....
۶۵	۵-۴-۳- سیستم نگهداری برای پیچ سنگ تزریقی .....
۶۶	۵-۴-۴- سیستم نگهداری ترکیبی .....
۶۷	۵-۵- تحلیل منحنی عکس العمل سیستم نگهداری بر روی منحنی مشخصه زمین .....
۶۹	<b>فصل ششم: برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس روش های عددی .....</b>
۷۰	۶-۱- مقدمه .....
۷۰	۶-۲- روشهای عددی .....
۷۱	۶-۲-۱- روش عناصر محدود (FEM) .....
۷۲	۶-۲-۲- روش عناصر مرزی (BEM) .....
۷۲	۶-۲-۳- روش های تفاوت محدود (FDM) و عناصر مجزا (DEM) .....
۷۳	۶-۳- نرم افزار UDEC .....
۷۴	۶-۳-۱- تعیین پارامترهای ورودی نرم افزار .....
۷۶	۶-۳-۲- خصوصیات هندسی مدل .....
۷۷	۶-۳-۳- مدل رفتاری توده سنگ و ناپیوستگی ها .....
۷۹	۶-۳-۴- معیارهای تحلیل و طراحی سیستم نگهدارنده اولیه .....
۸۰	۶-۴- روش تعیین منحنی های اندرکنش توده سنگ .....
۸۲	۶-۴-۱- تعیین منحنی اندرکنش توده سنگ (GRC) قسمت های مختلف تونل .....
۸۶	۶-۵- تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت تونل انتقال آب خدنگستان .....
۸۸	۶-۵-۱- مراحل مدلسازی و تحلیل تنش در مقطع حداکثر روباره .....

۶-۵-۲- تشریح عناصر بکار رفته به عنوان سیستم نگهداری تونل انتقال آب .....	۹۵
۶-۵-۳- خلاصه نتایج مدلسازی پس از نصب سیستم نگهداری برای قسمت های مختلف مسیر تونل	
انتقال آب .....	۹۶
۶-۵-۴- محاسبه ضرایب ایمنی برای عناصر بکار رفته در سیستم نگهدارنده .....	۱۰۵
فصل هفتم : نتیجه گیری و پیشنهادات .....	۱۰۷
۷-۱- نتیجه گیری .....	۱۰۸
۷-۲- پیشنهادات .....	۱۱۱
فهرست منابع .....	۱۱۲
پیوست ها .....	۱۱۶

## فصل اول: کلیات

شکل ۱-۱- نمای کلی طرح افزایش آب قابل انتقال چشمه لنگان ..... ۹

شکل ۱-۲- نقشه راههای دسترسی به منطقه مورد مطالعه ..... ۱۱

## فصل دوم: زمین شناسی مهندسی و بخش بندی مسیر تونل انتقال آب خدنگستان

شکل ۱-۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه تقسیمات ایران از نظر اشتوکلین و روتنر و پهنه

بندی زون سنندج - سیرجان در این ناحیه ..... ۱۷

شکل ۲-۲- مشخصات ریز ناپیوستگی ها در ورودی قطعه اول تونل در جناح راست ..... ۲۳

## فصل چهارم: پارامترهای ژئومکانیکی مسیر تونل و برآورد سیستم نگهداری موقت بر

## اساس طبقه بندی توده سنگ

شکل ۱-۴- تخمین سیستم نگهداری موقت به کمک روش Q ..... ۵۷

## فصل پنجم: برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس تحلیل اندرکنش سنگ - سیستم

## نگهداری

شکل ۱-۵- منحنی مشخصه سیستم نگهداری ..... ۶۳

شکل ۲-۵- منحنی سیستم نگهداری و زمین برای توده سنگ های مقطع حداکثر روباره ..... ۶۸

## فصل ششم: برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس روش های عددی

شکل ۱-۶- محیط نرم افزار Roclab ..... ۷۵

شکل ۲-۶- وضعیت مرزها در اطراف مدل ..... ۷۶

شکل ۳-۶- وضعیت دسته درزه ها و لایه بندی در مدل ..... ۷۶

شکل ۴-۶- نمونه ای از مش بندی مورد استفاده در مدل ..... ۷۷

شکل ۵-۶- الگوی جابجایی در سقف و کف تونل در حال پیشروی ..... ۷۹

- شکل ۶-۶- منحنی عکس العمل زمین (GRC) همراه با منحنی مشخصه سیستم نگهداری ..... ۸۰
- شکل ۶-۷- مدل مورد نظر برای رسم منحنی GRC بوسیله نرم افزار UDEC ..... ۸۱
- شکل ۶-۸- منحنی GRC تاج تونل برای توده سنگهای قسمت ورودی تونل (Part 1) ..... ۸۳
- شکل ۶-۹- منحنی GRC دیواره تونل برای توده سنگهای قسمت ورودی تونل (Part 1) ..... ۸۳
- شکل ۶-۱۰- منحنی GRC تاج تونل برای توده سنگهای قسمت حداکثر روباره (Part 3) ..... ۸۴
- شکل ۶-۱۱- منحنی GRC دیواره تونل برای توده سنگهای قسمت حداکثر روباره (Part 3) ..... ۸۴
- شکل ۶-۱۲- منحنی GRC تاج تونل برای توده سنگهای قسمت خروجی تونل (Part 23) ..... ۸۵
- شکل ۶-۱۳- منحنی GRC دیواره تونل برای توده سنگهای قسمت خروجی تونل (Part 23) .... ۸۵
- شکل ۶-۱۴- وضعیت مرزها در مدل ..... ۸۸
- شکل ۶-۱۵- محیط نرم افزار UDEC 4.0 همراه با مدل ساخته شده و مقطع تونل ..... ۸۹
- شکل ۶-۱۶- نیروهای نامتعادل کننده در حل مدل مقطع حداکثر روباره ..... ۹۰
- شکل ۶-۱۷- نمودار همگرایی سقف و کف تونل برای مقطع حداکثر روباره ..... ۹۱
- شکل ۶-۱۸- نمودار جابجایی افقی دیواره تونل به سمت داخل برای مقطع حداکثر روباره ..... ۹۱
- شکل ۶-۱۹- بردارهای جابجایی در نقاط اطراف تونل در مقطع حداکثر روباره ..... ۹۲
- شکل ۶-۲۰- نقاط پلاستیک اطراف تونل همراه با سطوح تسلیم و شکست کششی قبل از نصب سیستم نگهداری در مقطع حداکثر روباره ..... ۹۲
- شکل ۶-۲۱- نمودار تراز جابجایی قائم اطراف تونل قبل از نصب سیستم نگهداری در مقطع حداکثر روباره ..... ۹۳
- شکل ۶-۲۲- نمودار تراز جابجایی افقی اطراف تونل قبل از نصب سیستم نگهداری در مقطع حداکثر روباره ..... ۹۳
- شکل ۶-۲۳- نمودار تراز تنش های قائم  $S_{yy}$  قبل از نصب سیستم نگهداری در مقطع حداکثر روباره ..... ۹۴

- شکل ۶-۲۴- نمونه ای از سیستم نگهداری مدل شده در نرم افزار UDEC 4.0 ..... ۹۶
- شکل ۶-۲۵- جابجایی قائم در سقف تونل در مقطع حداکثر روباره پس از نصب سیستم نگهداری. ۹۸
- شکل ۶-۲۶- جابجایی افقی در دیواره تونل در مقطع حداکثر روباره پس از نصب سیستم نگهداری. ۹۹
- شکل ۶-۲۷- نقاط پلاستیک اطراف تونل پس از نصب سیستم نگهداری در مقطع حداکثر روباره .. ۹۹
- شکل ۶-۲۸- نمودار تراز جابجایی قائم در مقطع حداکثر روباره پس از نصب سیستم نگهداری .. ۱۰۰
- شکل ۶-۲۹- نمودار تراز جابجایی افقی در مقطع حداکثر روباره پس از نصب سیستم نگهداری . ۱۰۰
- شکل ۶-۳۰- نیروهای محوری وارد بر پیچ سنگ های مقطع حداکثر روباره ..... ۱۰۱
- شکل ۶-۳۱- نیروی برشی وارد بر پیچ سنگ های مقطع حداکثر روباره ..... ۱۰۳
- شکل ۶-۳۲- نیروهای محوری وارد بر لایه شاتکریت در مقطع حداکثر روباره ..... ۱۰۳
- شکل ۶-۳۳- نیروی برشی وارد بر لایه شاتکریت در مقطع حداکثر روباره ..... ۱۰۴
- شکل ۶-۳۴- لنگر خمشی وارد بر لایه شاتکریت در مقطع حداکثر روباره ..... ۱۰۴

## فصل اول: کلیات

- جدول ۱-۱- فهرست برخی از تونل‌های انتقال آب و نیروگاهی ایران ( تا سال ۱۳۸۴) ..... ۳
- جدول ۱-۲- مشخصات چشمه های گستره طرح ..... ۵
- جدول ۱-۳- مشخصات قطعات مختلف مسیر خط انتقال آب خدنگستان به چشمه لنگان ..... ۷

## فصل سوم : وضعیت درزه ها و آزمایشهای انجام شده روی نمونه ها

- جدول ۳-۱- مشخصات دسته درزه های اصلی در قسمت های مختلف مسیر تونل ..... ۳۴
- جدول ۳-۲- مشخصات گمانه های حفر شده در طول مسیر ..... ۳۷
- جدول ۳-۳- نتایج آزمایشات خصوصیات فیزیکی بر روی مغزه های اخذ شده از گمانه ها ..... ۳۹
- جدول ۳-۴- نتایج آزمایش فشار تورمی ..... ۴۰
- جدول ۳-۵- نتایج آزمایش شاخص دوام ..... ۴۱
- جدول ۳-۶- نتایج بدست آمده از آزمایشات مقاومت فشاری تک محوری ..... ۴۲
- جدول ۳-۷- نتایج آزمایشات سه محوری ..... ۴۳
- جدول ۳-۸- نتایج آزمایشات برش مستقیم روی درزه ها ..... ۴۳

## فصل چهارم : پارامترهای ژئومکانیکی مسیر تونل و برآورد سیستم نگهداری موقت بر

## اساس طبقه بندی توده سنگ

- جدول ۴-۱- مقدار شاخص کیفی سنگ برای قسمتهای مختلف مسیر تونل خدنگستان ..... ۴۹
- جدول ۴-۲- پارامترهای ژئومکانیکی در مسیر تونل خدنگستان ..... ۵۰
- جدول ۴-۳- تعیین سیستم نگهداری بر اساس شاخص کیفی سنگ Q ..... ۵۸

## فصل پنجم : برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس تحلیل اندرکنش سنگ - سیستم

## نگهداری

جدول ۵-۱- اطلاعات مورد نیاز برای رسم منحنی اندرکنش توده سنگ در مقطع حداکثر روباره .. ۶۷

### فصل ششم: برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس روش های عددی

جدول ۶-۱- میزان حداکثر جابجایی ها در سقف و دیواره تونل قبل از نصب سیستم نگهداری برای ۲۳

قسمت مسیر تونل انتقال آب ..... ۸۷

جدول ۶-۲- میزان جابجایی قائم در سقف و افقی در دیواره تونل قبل از نصب سیستم نگهداری در

قسمت های مختلف مسیر تونل انتقال آب ..... ۹۷

جدول ۶-۳- خروجی مستقیم نرم افزار در ارتباط با نیروهای وارد شده ..... ۱۰۲

جدول ۶-۴- محاسبه ضرایب ایمنی برای عناصر بکار رفته در سیستم نگهدارنده ..... ۱۰۶

فصل اول

# کلیات



## ۱-۱ مقدمه

به طور کلی تونل‌ها با توجه به اهداف حفر آنها به سه دسته اصلی تونل‌های عبور و مرور، تونل‌های انتقال و تونل‌های معدنی تقسیم می‌شوند، تونل انتقال آب، جزء تونل‌های انتقال می‌باشد که به دو بخش مجاری زیر زمینی تحت فشار و مجاری زیرزمینی جریانهای آزاد تقسیم می‌گردد.

اقلیم خشک ایران باعث شده تا از دیرباز مساله آب به عنوان امری حیاتی بخشی از توان برنامه ریزی و اجرایی کشور را به خود اختصاص دهد.

همگام با رشد کشور، نیاز به آب نیز در صنعت کشاورزی و بهداشت رشد روز افزون یافته است. کافی نبودن آبهای سطحی باعث شده تا در نواحی مختلف تلاش برای یافتن منابع دیگری جهت تهیه آب آغاز گردد. حفر چاه، قنات و انحراف آب چشمه ها به مناطق مورد نیاز تسهیلاتی در این زمینه می‌باشد که با انتقال آب از حوضه ای به حوضه دیگر امروزه وارد مرحله جدیدتری شده است.

در این میان نقش تونل‌ها، در تامین آب مناطق کم آب روشن می‌شود. این تونلها جهت انتقال حجم مشخص از آب رودخانه‌ها و یا مخازن آب سد، مورد استفاده قرار می‌گیرند و دبی و سرعت در آن، از مهمترین مشخصه های هیدرولیکی آنهاست.

در همین راستا پروژه‌های متعدد انتقال آب به طرق مختلف و بخصوص با استفاده از تونل‌های انتقال آب در دست برنامه ریزی و یا اجرا میباشد که تونل‌های انتقال آب چشمه لنگان و خدنگستان از جمله این تونل‌ها می باشد. در جدول (۱-۱) لیست تونل‌های انحراف، انتقال آب و نیروگاهی کشور که تا سال ۸۴ در مرحله طراحی، اجرا و یا بهره برداری می‌باشد به همراه برخی ویژگیهای آنها آمده است.

جدول ۱-۱- فهرست برخی از تونل‌های انتقال آب و نیروگاهی ایران (تا سال ۱۳۸۴) [۴].

عنوان	موقعیت جغرافیایی	طول (متر)	قطر تمام شده (متر)	روش حفاری	توضیحات
کوه‌رنگ (۲)	چهار محال	۲۸۱۷	۲/۸	مکانیزه - انفجاری	بهره برداری
کوه‌رنگ (۳)	چهار محال	۲۳۳۹۰	۴/۲	مکانیزه - انفجاری	اجرا
گاوشان	کردستان	۲۰۱۸۰	۴/۳	مکانیزه - انفجاری	اجرا
چشمه لنگان	اصفهان	۱۳۷۶۵	۳/۲	مکانیزه - انفجاری	اجرا
آبرسانی کرمان	کرمان	۶۳۵۰۰	۳	مکانیزه - انفجاری	طراحی
دز به قمرود	لرستان - اصفهان	۴۷۲۴۸	۳/۸	مکانیزه	اجرا
دشت عباس	ایلام	۶۰۹۷	۵/۵	مکانیزه - انفجاری	بهره برداری
ماربران	چهار محال	۱۰۳۶۰	۳	مکانیزه - انفجاری	بهره برداری
سد کوثر	خوزستان	۷۴۹۳	۳/۸ - ۱۱	انفجاری	اجرا
آبرسانی قوچک	تهران	۵۱۵۱	۳/۷	مکانیزه - انفجاری	بهره برداری
کارون (۳)	خوزستان	۱۳۲۲۰	۳/۵ - ۱۴/۳	انفجاری	بهره برداری
کرج به تهران	تهران	۲۸۹۸۰	۳/۹	مکانیزه	اجرا
نوسود	کرمانشاه	۴۹۰۰۰	۶	مکانیزه - انفجاری	طراحی
سولکان (پسته)	کرمان	۵۲۰۰۰	-	-	طراحی
لواسان	تهران	۶۳۵۰	۳/۶	مکانیزه - انفجاری	بهره برداری
سراب داریاب	لرستان	۱۱۰۰	-	-	بهره برداری
چشمه روزیه	سمنان	۳۳۰۰	۳/۲	-	اجرا
قشلاق	سنندج	۵۰۰۰	-	-	اجرا
سبز کوه	چهار محال	۸۴۰۰	-	-	طراحی
آبرسانی بوشهر	بوشهر	۱۱۰۰	۱/۸	انفجاری	طراحی
روانسر	کرمانشاه	۵۵۰۰۰	-	-	طراحی
سد نساء	کرمان	۱۲۴۶	۶	-	اجرا

## ۱-۲- ویژگیهای تونل انتقال آب خدنگستان

حوضه آبریز زاینده رود به عنوان یکی از مناطق کم آب، ولی پرمصرف همواره چشم به حوضه های پرآب اطراف مانند حوضه آبریز کارون و دز داشته تا با استفاده از آنها بخشی از کمبود آب را در محدوده مرکزی ایران جبران نماید.

مجموعه خط انتقال آب خدنگستان (شامل تونل و ناو کانال) نیز به همین علت در برنامه های مطالعاتی سازمان آب منطقه ای اصفهان قرار گرفته تا بخشی از سرشاخه های دز تحت عنوان رودخانه وهرگان را توسط یک خط انتقال حدود ۱۱۲۶۶ متری به سد چشمه لنگان و از آنجا توسط تونل های مربوطه به حوضه زاینده رود منتقل نماید. آب قابل انتقال عبارت است از: چندین چشمه فصلی و چشمه خدنگستان، به انضمام حجم عظیمی از آبهای سطحی که انتظار می رود آورد سالیانه معادل ۶۰ میلیون متر مکعب داشته باشد. در جدول (۱-۲) مشخصات چشمه های گستره طرح آورده شده است. رودخانه زاینده رود به عنوان تنها رودخانه قسمت خشک مرکز ایران هر چه بیشتر نیاز به افزایش آورد سالیانه دارد. لذا پس از آوردهای تونل های اول و دوم کوهرنگ، اقدام به حفر تونل سوم کوهرنگ، تونل انتقال آب چشمه لنگان و بالاخره تونل انتقال آب چشمه خدنگستان، جهت افزایش آورد سالیانه شده است [۵].

جدول ۲-۱- مشخصات چشمه‌های گستره طرح [۵]

ردیف	نام چشمه	موقعیت	ارتفاع (m)	نوع آبدهی	میزان آبدهی (Lit/Sec)	نوع چشمه
۱	خندگستان	جنوب دره خندگستان	۲۴۳۸/۵	دائمی	۲۰۰-۵۰۰۰	کارستی - کنتاکی
۲	چشمه‌های حاج موسی	جنوب دره ملیکان	۳۱۶۰-۳۲۰۰	فصلی	۱-۱۰۰	کارستی
۳	چشمه لنگان	شمال کوه چشمه لنگان	۲۴۱۸	دائمی	۳۰-۲۰۰۰	کارستی - کنتاکی
۴	چشمه سرده	دره شرقی چشمه سرده	۲۵۹۰	دائمی	۳-۱۰	نشتی
۵	گاوگیر	جنوب آبادی مازه ابول	۲۵۱۰	فصلی	۰/۵-۴	نشتی
۶	جائریاگا	جنوب غربی آبادی خرسناک	۲۶۱۰	فصلی	۰/۵-۳	نشتی
۷	کهریز	جنوب غربی آبادی خرسناک	۲۶۴۰	دائمی	۱۰-۴۰	نشتی
۸	گنگ	جنوب دره قیله	۳۰۴۰	دائمی	۱۰-۱۵	کارستی - کنتاکی
۹	چشمه‌های دره قیله	دره خرسناک	۲۴۷۰-۲۴۹۰	فصلی	۱-۱۰	کنتاکی
۱۰	چشمه‌های دره پیر علی	دره پیر علی	۲۹۶۰-۳۱۶۰	فصلی	۱-۱۵	نشتی و کنتاکی
۱۱	چشمه‌های دره شاهون	جنوب دادرگان	۲۹۵۰-۲۹۸۰	دائمی	۱۰-۴۰	کنتاکی

## ۱-۲-۱- مشخصات تونل انتقال آب خدنگستان

طول تونل	۹۶۰۰ متر
تعداد قطعات	۵ قطعه
رقوم ورودی اصلی تونل	۲۴۳۱/۵ متر
رقوم خروجی اصلی تونل (- چشمه لنگان )	۲۴۱۶/۵
بیشترین میزان روباره	۳۳۰ متر
سیستم انتقال	ثقلی
نوع جریان	آزاد
شکل مقطع	نعل اسبی
قطر هیدرولیکی	۳ متر
شیب هیدرولیکی تونل	۱ در هزار

## ۱-۲-۲- مشخصات ناو کانالهای انتقال خدنگستان

طول کانال	۲۵۵۰ متر
تعداد قطعات	۲ قطعه
عرض کف و عمق	۲/۳-۴ متر و ۲/۵ متر عمق
شیب دیواره	۹۰ درجه
شیب کف	۰/۵ در هزار

در جدول (۱-۳) مشخصات قطعات مختلف مسیر خط انتقال آب خدنگستان به چشمه لنگان

آورده شده است [۵].

جدول ۱-۳- مشخصات قطعات مختلف مسیر خط انتقال آب خدنگستان به چشمه لنگان [۵]

نام قطعه	ابتدای قطعه	انتهای قطعه	طول قطعه (متر)	نوع خط انتقال	بیشترین روباره، متر	قطر داخلی (متر)	شیب کف
AB	دره خدنگستان	دره غربی چشمه سرده	۱۷۹۰	تونل	۳۴۰	۳	۱ در هزار
BC	دره غربی چشمه سرده	دره شرقی چشمه سرده	۱۲۵۰ (۸۵۵)	ناو کانال (تونل)	- (۶۰)	۲/۵×۲/۳	۰/۵ در هزار
CD	دره شرقی چشمه سرده	دره گاو گیر	۲۲۸۶	تونل	۲۴۰	۳	۱ در هزار
DE	دره گاو گیر	دره خرسانک	۱۲۷۱	تونل	۱۱۰	۳	۱ در هزار
EF	دره خرسانک	دره پیر علی	۲۱۱۰	تونل	۱۲۰	۳	۱ در هزار
FG	دره پیر علی	دره گاو مرده	۲۰۷۱	تونل	۸۰	۳	۱ در هزار
GH	دره گاو مرده	چشمه لنگان	۱۳۰۰ (۸۸۲)	ناو کانال (تونل)	- (۳۵)	۲/۵×۴	۰/۵ در هزار

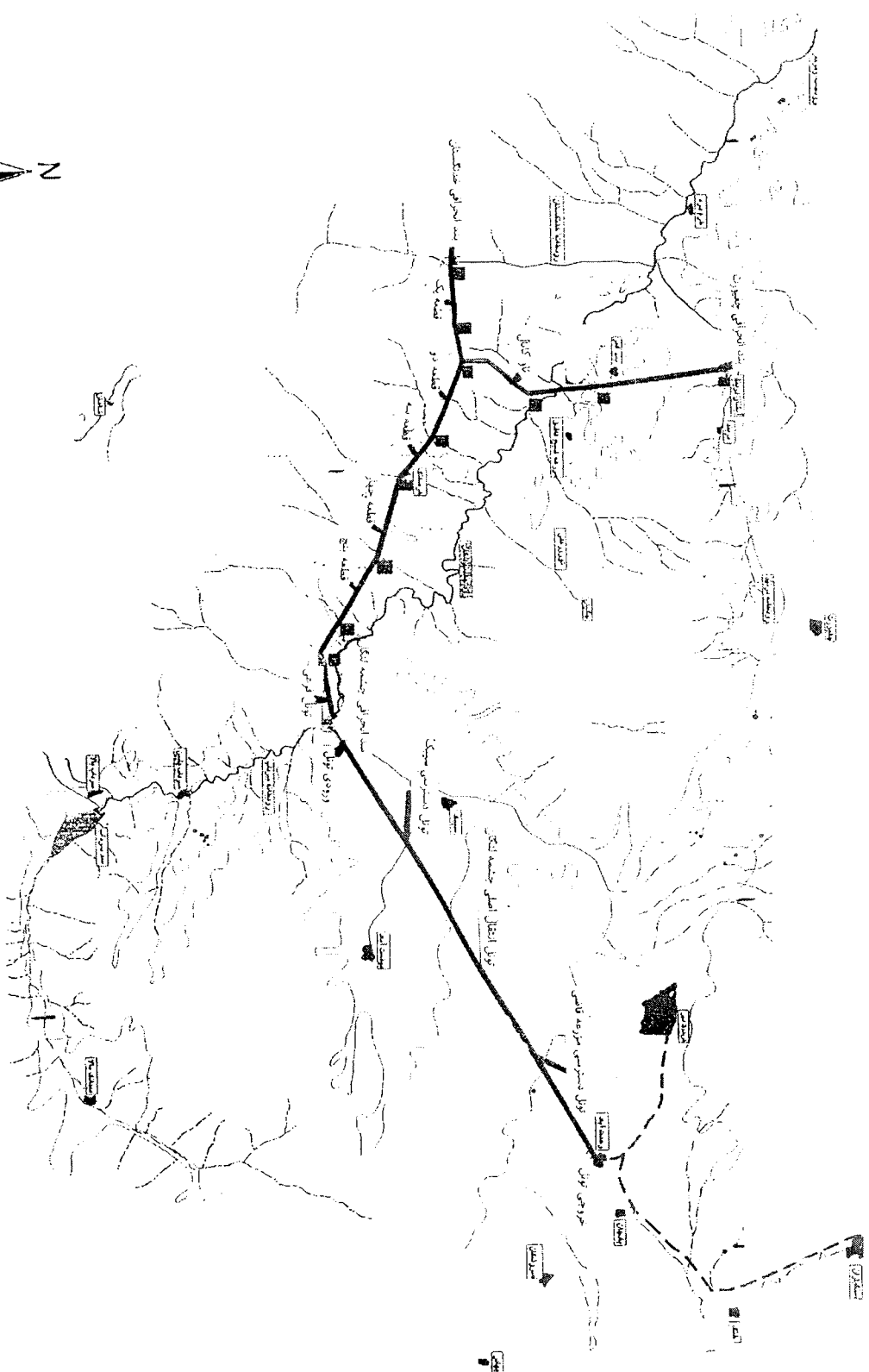
مقطع تونل به صورت نعل اسبی ( در زمان حفاری ) با ارتفاع ۵ متر و عرض ۵ متر در کف تونل در نظر گرفته شده است. تونل با دیواره های صاف به یک سقف قوسی که قطعه ای از پوسته استوانه ای به شعاع ۲/۵ متری باشد، متصل میگردد.

### ۱-۲-۳- محل و موقعیت جغرافیایی

گستره مورد مطالعه درحد فاصل طولهای  $50^{\circ}$  تا  $49^{\circ}$  و شرقی و عرضهای  $32^{\circ}50'$  تا  $55^{\circ}32'$  شمالی در فاصله حدود ۲۰۰ کیلومتری غرب شهرستان اصفهان و ۲۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان فریدونشهر قرار گرفته است. نزدیکترین هسته جمعیتی منطقه شهرستان فریدونشهر و نزدیک ترین روستا به آن روستای سبک می باشد. آبهای دائمی موجود در حوضه شامل چشمه خدنگستان، چشمه سرده و چشمه لنگان می باشد که همگی پس از طی مسیر به سمت شمال به رودخانه موسوم به چشمه لنگان که از سرشاخه های رودخانه دز محسوب میشود، می ریزند. تعداد زیادی چشمه های موقت و همچنین حجم زیادی از آب روان ناشی از بارندگی و ذوب برف نیز در طی فصول بهار و پاییز در منطقه به چشم می خورد. پوشش گیاهی منطقه بیشتر از گیاهان علفی بوده و درختان، منحصر به دره های آبدار می باشند.

متوسط میزان بارندگی حدود ۷۶۰ میلیمتر در سال و اغلب بصورت برف می باشد. میانگین درجه حرارت حدود  $3^{\circ}$  سانتیگراد بالای صفر و متوسط دوره یخبندان حدود ۱۵۰ روز تخمین زده شده است [۵].

نمای کلی طرح افزایش آب قابل انتقال چشمه لنگان به همراه موقعیت تونلها و روستاها و هسته های جمعیتی اطراف آن در شکل ۱-۱ آمده است. همانگونه که مشاهده می شود، تونل انتقال آب خدنگستان شامل پنج قطعه تونل، آب را از بند انحرافی خدنگستان به سد انحرافی چشمه لنگان منتقل می کند، تا از آنجا توسط تونل اصلی چشمه لنگان به سمت حوزه زاینده رود هدایت گردد [۵].



شکل ۱-۱- نمای کلی طرح افزایش آب قابل انتقال چشمه ننگان [۵]



#### ۴-۲-۱ راههای دسترسی

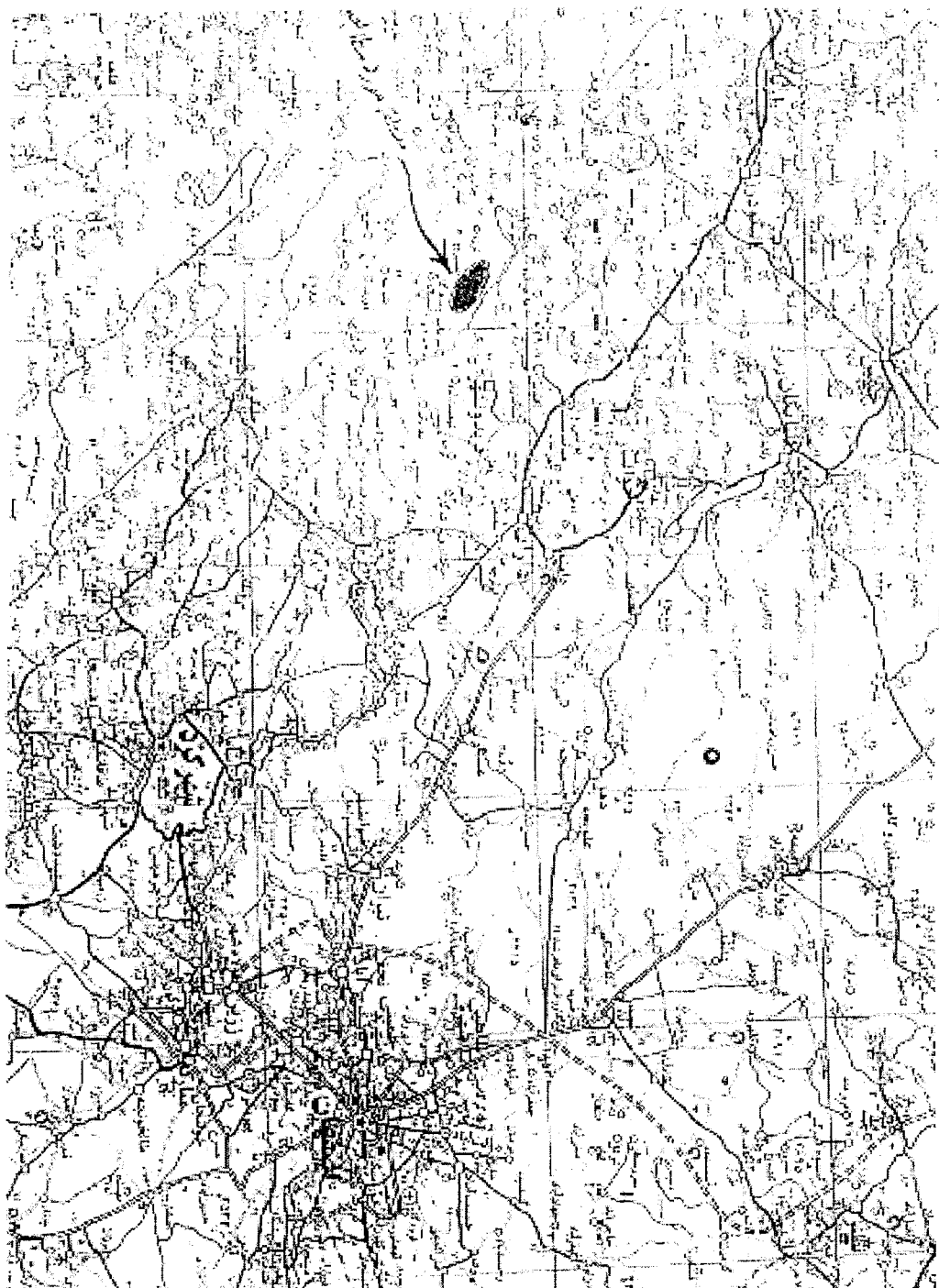
دسترسی به محل پروژه از طریق جاده اصفهان - فریدون شهر - سبک به طول تقریبی ۱۸۰ کیلومتر و از آنجا تا محل چشمه لنگان به صورت جاده خاکی به طول تقریبی ۵ کیلومتر و از آن به بعد بصورت یک جاده عشایری جیب رو به طول حدود ۱۵ کیلومتر تا دره میلیگان - در شمال محل بند و ورودی تونل - امکان پذیر است.

شکل (۲-۱) نقشه راههای دسترسی به منطقه مورد مطالعه را نشان میدهد [۵].

#### ۵-۲-۱- مشخصات بند انحرافی خدنگستان

بند خدنگستان به منظور انحراف و هدایت آبهای جاری در این دره، به سمت ورودی تونل طراحی شده است. مشخصات اصلی این بند عبارت است از [۵]:

نوع بند	بتنی
ارتفاع از سطح فعلی زمین	۴/۵ متر
طول تاج سرریز	۱۵ متر
عرض تاج در ناحیه غیر سرریز	۱/۵ متر
رقوم تاج	۲۴۳۵/۸ متر از سطح دریا
رقوم تاج سرریز	۲۴۳۴ متر از سطح دریا
رقوم بستر رودخانه	۲۴۲۹/۵ متر از سطح دریا



شکل ۱-۲- نقشه راههای دسترسی به منطقه مورد مطالعه [۵]

## ۱-۲-۶- حفاری در تونل انتقال آب خدنگستان

برای حفر تونل انتقال آب خدنگستان که تا اردیبهشت ۱۳۸۶ پیشروی آن حدود ۷۰۰ متر بوده است، از روش چالزنی و انفجار استفاده شده است. چالزنی بوسیله جامبو دریل انجام گرفته و چال هایی با قطر ۴۵ تا ۵۱ میلیمتر بوسیله آن زده می شود. دینامیت به همراه چاشنی های تاخیری و آنی خرج انفجاری را تشکیل می دهند [۵].

## ۱-۳- مروری بر کارهای انجام شده

تحقیقات و مطالعات صورت گرفته جهت جمع آوری اطلاعات زمین شناسی و ژئوتکنیکی منطقه، از سال ۱۳۸۰ آغاز شده است. کارفرمای پروژه، سازمان آب منطقه ای اصفهان بوده و شرکت مشاور که اقدام به انجام مطالعات، جمع آوری اطلاعات و تهیه گزارشات زمین شناسی و ژئوتکنیکی منطقه و در نهایت طراحی پروژه نموده است، شرکت مهندسین مشاور زاینداب می باشد. تجهیز کارگاه و آماده سازی تونل انتقال آب به همراه احداث جاده های دسترسی برای آغاز حفاری تونل، از سال ۱۳۸۵ آغاز شده و طبق قرارداد ۵ ساله پیمانکار (موسسه بیت المقدس سپاه) امید است تا سال ۱۳۹۰ پایان پذیرد.

## ۱-۴- اهداف تحقیق و سازماندهی پایان نامه

در این تحقیق هدف، نشان دادن نحوه تخمین سیستم نگهداری موقت تونلها توسط روشهای تجربی، روش های تحلیلی و نشان دادن کاربرد روشهای عددی و نرم افزار <sup>1</sup> UDEC در تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل ها می باشد که با داشتن اطلاعات زمین شناسی و ژئومکانیکی مسیر تونل انتقال آب خدنگستان، به آنالیز پایداری و طراحی سیستم نگهداری اولیه قسمت های مختلف این تونل ختم می شود.

---

<sup>1</sup> Universal Distinct Element code

پایان نامه حاضر مبتنی بر ۷ فصل می باشد. مابقی فصول این پایان نامه به شرحی که در ادامه آمده است، سازماندهی شده است:

فصل دوم تحت عنوان زمین شناسی مهندسی و بخش بندی مسیر تونل انتقال آب خدنگستان می باشد که در آن مسیر تونل از نظر زمین شناسی به ۹ بخش تقسیم شده و ساختارهای زمین شناسی و زمین شناسی مهندسی محدوده پروژه در این ۹ بخش بررسی شده است.

فصل سوم تحت عنوان وضعیت درزه ها و آزمایشات انجام شده روی نمونه ها می باشد که در آن جداول مربوط به ویژگی های درزه ها در طول مسیر تونل ارائه شده و نتیجه آزمایشهای آزمایشگاهی، صحرایی و ژئوتکنیکی انجام شده روی مغزه ها آورده شده است.

فصل چهارم تحت عنوان پارامترهای ژئومکانیکی مسیر تونل و برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس طبقه بندی توده سنگ می باشد که در آن ابتدا بر اساس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، سنگهای مسیر تونل به ۲۳ قسمت تقسیم شده و سپس سنگهای مسیر با توجه به پارامترهای ژئومکانیکی هر قسمت و بر اساس روشهای طبقه بندی توده سنگ (RMR و Q) رده بندی می شود و در نهایت پس از بررسی انواع سیستم نگهداری موقت تونلها، بر اساس این رده بندی، سیستم نگهداری موقت مناسب برای هر قسمت ارائه خواهد شد.

در فصل پنجم برآورد سیستم نگهداری موقت، به کمک روش تحلیلی برای تونل انتقال آب صورت گرفته، و منحنی عکس العمل زمین و سیستم نگهداری بوسیله این روش رسم شده است.

فصل ششم تحت عنوان برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس روش های عددی می باشد که در ابتدای این فصل پس از بررسی کلیاتی در مورد روشهای عددی برای تحلیل تنش در تونلها، به تشریح نرم افزار UDEC و نحوه مدلسازی با آن پرداخته و در مورد پارامترهای ورودی این نرم افزار و نحوه تعیین برخی از این پارامترها توسط نرم افزار RocLab بحث می شود و سپس برای مسیر تونل تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری می شود.

در نهایت فصل هفتم این پایان نامه، به نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات اختصاص یافته است.

## فصل دوم

زمین شناسی مهندسی

و بخش بندی مسیر

تونل انتقال آب خدنگستان

خط انتقال آب خدنگستان به چشمه لنگان بصورت مجموعه ای از تونل و ناو کانال طراحی شده که مجموعاً در حدود ۱۲۱۵۰ متر ( ۹۶۰۰ متر تونل و ۲۵۵۰ متر کانال ) طول دارد.

بدلیل طول زیاد این خط انتقال بررسی ویژگیهای زمین شناسی مسیر تونل، وضعیت ناپیوستگی های موجود ( شیب و امتداد و خصوصیات دیگر درزه ها ) و همچنین بررسی های ژئومکانیکی مسیر تونل بصورت واحد صورت نگرفته است. بدین معنی که مسیر حدود ۱۲ کیلومتری تونل به چند پهنه و منطقه ساختاری تقسیم شده است و در این نواحی، مطالعات زمین شناسی و ژئومکانیکی جداگانه ای انجام گرفته است. بر همین اساس در این فصل ابتدا به بررسی زمین شناسی عمومی کلی منطقه، زمین شناسی ساختمانی، هیدرولوژی و برآورد میزان نفوذپذیری در واحدهای مختلف سنگی پرداخته و سپس مسیر به ۹ پهنه تقسیم شده و هر پهنه به صورت جداگانه بحث و بررسی می شود.

## ۲-۲- زمین شناسی عمومی منطقه

از دیدگاه زمین شناسی ناحیه ای، گستره مورد مطالعه در لبه جنوب غربی پهنه سنندج - سیرجان در نزدیکی راندگی اصلی زاگرس واقع شده است. پهنه سنندج - سیرجان بصورت نواری با پهنای ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر به موازات روند عمومی کوهزاد زاگرس در بین پهنه های ایران مرکزی در شمال شرق و زاگرس مرتفع در جنوب غرب واقع شده است. شرایط زمین شناسی این پهنه نشان میدهد که دردوران گذشته این زون یکی از فعالترین و ناآرامترین نواحی ایران بوده است. وجود ماگماتیسم و متامورفیسم در دورانهای مختلف شاهد خوبی برای این ادعا است.

از نظر چینه شناسی نیز همانطور که گفته شد این پهنه در اثر عملکرد فازهای مختلف دستخوش تغییرات فراوانی گشته و غالباً دگرگون شده است. در عین حال تعدادی از واحدهای

دگرگون نشده نیز در ناحیه دیده میشود. گسترش جغرافیایی، تنوع لیتولوژیک و وجود پدیده های ساختاری مختلف در پهنه سندنچ - سیرجان باعث تفکیک آن به سه زیر پهنه اصلی شده است:

- زیر پهنه داخلی مزوزوئیک: در این بخش اسلیت های تریاس - ژوراسیک و توده های گوانیتوئیدی حضوری گسترده دارند.

- زیر پهنه بلندیهای دیرین میانی: که ویژگی آن فراوانی سنگهای دگرگونه پرکامبرین و پالئوزوئیک زیرین می باشد.

زیر پهنه کناره ای یا حاشیه ای: با ویژگی ادامه رسوبگذاری از ژوراسیک به کرتاسه. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه در زیر پهنه کناره ای واقع شده، به شرح بیشتری از آن می پردازیم:

زیر پهنه کناره ای مزوزوئیک با پهنای متوسط ۱۰ تا ۱۲ کیلومتر و حد اکثر ۵۰ کیلومتر در بین زیر پهنه بلندیهای دیرین میانی در شمال شرق و رشته رادیولاریتی در جنوب غرب قرار گرفته است.

بیش از ۹۰ درصد برونزدهای سنگی موجود در این پهنه از سنگهای ژوراسیک تا کرتاسه تشکیل شده اند. این رسوبات شامل مجموعه ای از سنگ آهک و ماسه سنگ، ماسه سنگ، شیل، توف، و کنگلومرا هستند که معمولاً سطح هوازده قرمز رنگ دارند. بر روی این سکانس نیز آهک های نازک تا متوسط لایه با میان لایه های مارن قرار گرفته اند. فسیلهای موجود در این رسوبات سن دقیقی را نشان نمی دهند ولی از مجموعه آنها میتوان سن ژوراسیک پایانی - کرتاسه آغازین را به این نهشته ها نسبت داد [۵].





## ۲-۳- زمین شناسی ساختمانی منطقه اجرای پروژه

گستره مورد مطالعه در لبه جنوب شرقی پهنه سنندج - سیرجان و در حقیقت در حاشیه زمین درز یا راندگی اصلی زاگرس قرار گرفته است. به عبارت دیگر منطقه اجرای پروژه در پهنه زمین درز زاگرس در محدوده شکسته و خرد شده آن واقع شده است. به همین دلیل در دوره های مختلف زمین شناسی و بویژه از کرتاسه به بعد تنشهای وارد بر منطقه دگربرختی های ساختاری فراوانی را باعث شده است.

همانطور که عنوان شد دینامیسم تشکیل ساختارهای تکتونیکی و تغییرات مربوط به آنها را بایستی با کوهزایی زاگرس که ناشی از حرکت همگرای خرد قاره های ایران و عربستان و فروانش و متعاقب آن، برخورد آن دو دانست. بنابراین از آنجایی که تنشهای ناشی از این فرایند دارای امتداد شمالی - جنوبی تا شمال شرق - جنوب غربی است، بنابراین ساختمانهای ایجادشده نیز عمدتاً امتدادی شرقی غربی تا شمال شرق - جنوب غربی دارند. رفتار سنگهای ترد و شکل پذیر در مقابل تنشهای تفاوت اساسی دارند. سنگهای ترد پس از رسیدن تنش به حد گسیختگی، با یک شکست ناگهانی دچار جابجایی میشوند، در حالیکه در سنگهای شکل پذیر تغییر شکل توده و جریان مواد از جایی به جای دیگر، کرنش مورد نظر را تامین میکند. در نتیجه اشکال برجا مانده از تغییرات ساختاری در مناطق ترد معمولاً بصورت شکستگی های مشخص از نوع گسل و در مناطق شکل پذیر بصورت پهنه های برشی و یا تغییرات کوچک مقیاس مانند تورق ( FOLIATION ) و حرکت جزئی در بین لایه ها بصورت ریز گسله ( MICRO FAULT ) و یا ریز چین است.

با توجه به اینکه نهشته های موجود در ناحیه غالباً از جنس آهک های رسی - مازنی شکل پذیر بوده و سنی در حدود ژوراسیک تا کرتاسه بالا - یعنی زمانیکه نزدیک به شروع حرکات همگرایی - دارند، بیشتر تغییرات ساختاری بوجود آمده در ناحیه از نوع شکل پذیر ( DUCTILE ) بوده و کل منطقه بصورت یک پهنه تغییر شکل یافته و خرد شده دیده میشود. در این بین بخشهایی از ناحیه، دستخوش تغییرات شدیدتری شده و نواحی خردشده تری را بوجود آورده است. عوارض

ساختمانی موجود در منطقه را بطور کلی در سه بخش چین خوردگی ها، گسلها، و ریز ناپیوستگی ها می توان مورد بررسی قرار داد [۵].

## ۲-۴- هیدروژئولوژی

منطقه مورد مطالعه را از نظر هیدروژئولوژی می توان به دو بخش اصلی تقسیم نمود : منطقه آبدار و آهکی با سفره های آب نسبتاً وسیع و حجم قابل ملاحظه آب، و منطقه کم آب با نفوذ پذیری پایین که جنس اغلب سنگهای آن آهک مارنی - رسی است. سنگهای آهکی فسیلدار و متبلور در بخشهای جنوبی منطقه ( ارتفاعات شاهان کوه ) به علت شکستگی های فراوان دارای آبگذری قابل توجهی هستند و بخشهای شمالی ناحیه بر خلاف قسمت های جنوبی آن بیشتر از آهک ها مارنی - رسی تشکیل شده که در برخی از قسمت ها پوشش نسبتاً کم ضخامتی از آبرفت روی آنها را پوشانده است. هر چند تشکیلات سنگی منطقه از نظر تکتونیکی دارای شکستگی ها و خرد شدگی های فراوانی است لیکن به علت وجود رس در ترکیب اغلب آنها، میزان نفوذناپذیری تا حد قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. در عین حال در برخی از قسمتها به علت افزایش انحلال میزان نفوذناپذیری اندکی افزایش یافته است، اما به علت وجود بخشهای رس دار در این نهشته ها، هیچگاه سفره آب زیرزمینی با حجم قابل ملاحظه تشکیل نمیشود. سنگهای آهکی در بخشهای جنوبی منطقه با نفوذ پذیری بالا نقش مخزن ذخیره آب را برای چشمه خدنگستان و چشمه لنگان بازی میکند [۵].

## ۲-۵- میزان نفوذ پذیری واحدهای مختلف سنگی [۵]

با توجه به واحدهای سنگ - چینه ای که در مطالعات زمین شناسی طرح افزایش آب قابل انتقال چشمه لنگان تفکیک شده، واحدهای مزبور را از نظر نفوذپذیری می توان به سه دسته اصلی تقسیم کرد:

## ۲-۵-۱- واحدهای نفوذپذیر

سنگهای آهکی واحد  $JK^{LM3}$  که در بخشهای جنوبی منطقه رخنمون یافته اند، بیشترین حجم نهشته های نفوذپذیر را به خود اختصاص داده اند. این سنگها در حقیقت نقش مخزن ذخیره آب را برای چشمه های خدنگستان و لنگان بازی میکنند. درجه خلوص سنگهای آهکی و فراوانی بارش، بویژه بصورت برف، باعث تشدید پدیده کارست و در نتیجه پرشدن آب چشمه های مزبور گردیده است. از دیگر نهشته های نفوذپذیر منطقه میتوان به واحدهای متعلق به عهد حاضر اشاره نمود :

واحدهای کنگلومرایی  $Q^{II}$ : پادگانه های آبرفتی قدیمی،  $Q^{T2}$ : پادگانه های جوان،  $Q^{CT}$ : خاکهای برجای درشت دانه،  $Q^F$ : مخروط افکنه ها و  $Q^S$ : واریزها

## ۲-۵-۲- واحدهای با نفوذپذیری کم

واحد آهک - آهک مارنی  $JK^{LM4}$  بواسطه کمتر بودن میزان رس در ترکیب نهشته ها و وجود باندهای آهکی خالص تر در طول رخنمون نسبت به تشکیلات مارنی - رسی دارای نفوذپذیری بالاتری است. چشمه های فصلی موقت و کم آبی در بخشهای مختلف واحد، بویژه دامنه دره های خدنگستان و چشمه سرده دیده میشود. رسوبات کنگلومرایی پادگانه های آبرفتی قدیمی  $Q^{T1}$  در بخشهای نسبتا سیمانیته و نهشته های برجای ریزدانه  $Q^{FR}$ ، نیز از جمله بخشهای دارای نفوذپذیری کم هستند.

## ۲-۳-۵- واحدهای نفوذناپذیر

بالا رفتن میزان رس در سنگهای کربناته باعث کاهش قابلیت انحلال و در نتیجه کم شدن میزان نفوذ پذیری در آنها میگردد. واحدهای شیلی آهکی  $JK^{LSH1}$ ، آهک - آهک مارنی  $JK^{LM2}$  و مارنی - شیل آهکی  $JK^{ML5}$  بدلیل غلبه بخشهای مارنی - رسی عمدتا "نفوذ ناپذیرند. بنابراین چشمه های کمتری در این بخشها دیده میشود. بخشی از چشمه های موجود در این نواحی در مرز بین رسوبات عهد حاضر و بخشهای نفوذناپذیر زیرین، تشکیل شده اند.

## ۲-۶- چشمه خدنگستان

چشمه خدنگستان در منتهی الیه غرب گسترده مورد مطالعه و در شمال دره میلگان واقع شده است. خروج آب در دیواره آبشار خدنگستان در رقوم ارتفاعی ۲۴۳۸/۵ متر از چند دهانه که تقریباً بر روی یک شکستگی تکتونیکی با امتداد شرقی - غربی قرار گرفته اند رخ داده است. سنگ مخزن چشمه را سنگهای آهکی کارستی واقع در ارتفاعات جنوبی منطقه تشکیل داده و ظهور چشمه در این محل، در اثر کنتاکت گسله واحدهای آهکی کارستی با آهکهای رس دار  $JK^{lm}_4$  اتفاق افتاده است. میزان آبدهی چشمه در فصول مختلف سال بین ۰/۲ تا ۵ متر مکعب اندازه گیری شده است [۵].

## ۲-۷- زمین شناسی مهندسی مخزن و ورودی تونل

از آنجایی که بند خدنگستان از نوع انحرافی بوده و صرفاً نقش دیواره ای جهت انحراف آب از دره خدنگستان به داخل قطعه اول تونل را ایفا میکند، بنابراین دارای مخزن بسیار کوچکی است و بررسی و ملاحظات مهندسی مخازن سدهای بزرگ را نمی طلبد. مشخصات دریاچه عبارت است از :

حداکثر طول	حدود ۲۰ متر
حداکثر عرض	حدود ۳۰ متر
حداکثر ارتفاع آب	حدود ۴/۵ متر
حجم تقریبی	حدود ۱۰۰۰ متر مکعب

مقطع تونل به صورت نعل اسبی است. ارتفاع تونل ۵ متر و عرض آن نیز در کف تونل ۵ متر در نظر گرفته شده است. تونل با دیواره های صاف به یک سقف قوسی که قطعه ای از پوسته استوانه-ای به شعاع ۲/۵ متر می باشد، متصل میگردد. ورودی تونل در انتهای مخزن و در مختصات جغرافیایی طول ۳۹۷۹۰۳/۰۵ و عرض ۳۶۳۹۶۵۵/۲۲ قرار گرفته است.

بررسی ریز ناپیوستگی ها و دسته درزه های اصلی در ناحیه ورودی تونل به علت خردشدگی تکتونیکی زیاد و هوازدهی فیزیکی، از نظر آماری امر دشواری است. با این وجود تعداد ۱۰۹ درزه به صورت اتفاقی از منطقه ورودی تونل برداشت شده است که مشخصات آنها به شرح ذیل است:

دسته اول : حدود ۲۰ درصد از کل ناپیوستگی های محدوده را بر گرفته است. ناپیوستگی های این دسته اغلب از نوع تورق است، ولی تعدادی درزه نیز با همین مشخصات دیده می شود.

شیب میانگین آنها حدود ۷۹ درجه به سمت N ۱۹۰ می باشد. تداوم ریز ناپیوستگیها کمتر از ۱ متر و فواصل تکرار در درزه ها ۶۰ سانتیمتر می باشد. سطح درزه ها صاف و نرم و سطح برگواره ها موج و نرم است. ولی در هر دو نوع، دیواره به شدت هوازده بوده و بازشدگی اندک آنها ( کمتر از ۳ میلیمتر ) توسط رس و لای ضعیف پر شده است.

دسته دوم: با شیب و امتداد به ترتیب ۷۹ درجه و N ۴۲ حدود ۱۸ درصد از کل برداشت ها را به خود اختصاص داده است. ناپیوستگی ها از نوع درزه بوده و دارای تداوم حدود ۵ متر و فاصله داری حدود ۰/۶ تا ۲ متر میباشند. سطح درزه ها صاف و زبر و کمی هوازده بوده و باز شدگی حدود ۲ میلیمتری آن توسط رس و لای پر شده است [۵].

دسته سوم : ناپیوستگی ها از نوع برگوارگی بوده و دارای شیب و امتداد ۷۸ درجه و N ۳۱۴ می باشند. سایر خصوصیات آنها مشابه برگواره های دسته اول می باشد. ( ۱۰ درصد داده ها )

دسته چهارم : این دسته حدود ۷ درصد داده ها را دربر گرفته اند. شیب این ناپیوستگی ها که از نوع برگوارگی هستند، حدود ۵۴ درجه به سمت N ۱۶۳ می باشد. خصوصیات، مشابه بخشهای قبلی است [۵].

## ۲-۸- زمین شناسی مهندسی مسیر خط انتقال خدنگستان

با استفاده از بررسی های زمین شناسی انجام شده در منطقه خدنگستان که منجر به تهیه نقشه و گزارش تحت همین عنوان شده است، و همچنین بررسی های گسترده صحرایی، مسیر خط انتقال آب خدنگستان به ۹ پهنه اصلی تقسیم شده، و خصوصیات مربوط به هر پهنه به صورت جداگانه آمده است. پارامترهایی مانند: خصوصیات سنگ چینه ای، ویژگی های تکتونیکی، وضعیت آبهای زیر زمینی و رو زمینی، ارتفاع روباره و همچنین ویژگی های ژئوتکنیکی توده سنگهای مسیر، برای هر پهنه بررسی شده است. یادآوری میشود که بررسی وضعیت درزه ها در این پهنه و در مقاطع عمود بر محور تونل در فصل بعدی آمده است [۵].

### ۲-۸-۱- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۰+۰۰۰ الی ۰+۱۹۰ (پهنه A)

این محدوده بیشتر از سنگهای آهکی نازک لایه (بخش بالایی واحد  $JK^{LM3}$ ) و آهکهای مارنی - رسی واحد  $JK^{LM4}$  تشکیل شده است. سنگ آهکهای نازک لایه که در سطح تازه به رنگ خاکستری روشن تا کرم و در سطح هوازده به رنگ خاکستری روشن دیده میشود، مجموعه درهم ریخته و خرد شده ای است که به سمت شمال بر میزان رس آن افزوده میشود و در نهایت به آهکهای مارنی - رسی متناوب با آهکهای ماسه ای تبدیل میگردد.

در این بخش میزان روباره تونل با پیشروی افزایش یافته و نهایتاً در بخش انتهایی به حدود ۱۵۰ متر میرسد.

وجود مواد شکل پذیر (DUCTILE) در ترکیب سنگ شناسی منطقه و شدت تغییرات ساختاری، کل محدوده ورودی تونل را به صورت یک پهنه برشی آورده است. بواسطه پوشیده بودن رخنمون های سنگی و تاثیر فراوان هوازدهگی مکانیکی در خرد نمودن سنگهای سطح زمین، مطالعات ریز ناپیوستگی ها در سطح، با دشواریها و خطاهای فراوانی روبروست. ریز ناپیوستگیها بیشتر از نوع برگوارگی هستند [۵].

## ۲-۸-۲- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۱۹۰+۰ الی ۱۷۹۰+۱ (پهنه B)

قسمت اعظم قطعه اول تونل انتقال در این پهنه قرار گرفته است. بیشترین میزان روباره در این پهنه معادل ۳۴۰ متر می باشد. تمامی مسیر انتقال در این پهنه از آهک ها و آهک های مارنی - رسی واحد  $JK^{LM}_4$  عبور می نماید. سنگ شناسی این واحد، شامل تناوبی است از آهک های مارنی - رسی، آهک و آهک های ماسه ای.

ضخامت لایه های آهکی و آهک ماسه ای تا حد بیش از ۲ متر نیز میرسد. در حالیکه ضخامت باند آهک مارنی - رسی بسیار بیشتر بوده و حتی به بیش از ۱۵ متر نیز میرسد. آهک مارنی - رسی به عنوان بافت اصلی سنگ شناسی منطقه، در سطح هوازده خاکستری تیره تا سیاه و در سطح تازه به رنگ خاکستری است. بخشهایی از این واحد نیز به علت افزایش رس در ترکیب سنگ به صورت شیل آهکی دیده میشوند.

از سمت غرب به شرق با دور شدن از ورودی تونل ضمن کاهش نسبی درهم ریختگی ها فاصله بین لایه های آهکی نیز افزایش می یابد، بطوریکه در بخشهای شرقی بر خلاف بخشهای غربی، لایه های آهکی دربرخی قسمتها دارای شیب و امتداد مشخص و قابل اندازه گیری هستند. مشخصات هندسی این لایه ها N85E/ 50NW بدست آمده است.

دو گسل F15 و F6 با ساز و کار معکوس به ترتیب در حوالی مترائز ۹۵۰ و ۱۷۰۰ از ورودی تونل احتمالا" با مسیر تونل برخورد می نمایند. گسل F6 با امتداد تقریبی N80E و گسل F15 با امتداد تقریبی شرقی-غربی میباشد. تاثیر این گسلها به صورت تشدید برگوارگی ها و تشدید و تعمیق هوازدگی خواهد بود.

همچنین جابجایی هایی نیز دربخشهای آهکی و آهک ماسه ای خواهد داشت. در این پهنه مشخصات درزه ها به علت تغییرات ساختاری فراوان در ناحیه، در چهار ایستگاه مختلف در مسیر تونل برداشت و در جدول ارایه گردیده که در فصل بعدی به بررسی آنها و پیدا کردن شیب ظاهری آنها در امتداد عمود بر محور تونل پرداخته میشود. کیفیت سنگهای بستر تونل در پهنه B در حد نسبتا"

خوبی قرار دارد. در بخشهای آهک مارنی - رسی به علت افزایش مقاومت سنگ - بویژه در قستیهای که رگه های کلسیتی تراکم بیشتری دارد، چون رگه های کلسیتی باعث افزایش مقاومت می شود - شاخص کیفی وضعیت مطلوب تری دارد.

به غیر از قسمت خروجی تونل در قطعه اول که میزان روباره به شدت کاهش می یابد، در سایر قسمت‌های این پهنه احتمال برخورد با نواحی هوازده در مسیر تونل در حد ضعیفی است.

به علت وجود رس در ترکیب سنگهای کربناته این ناحیه، میزان نفوذ پذیری و انحلال سنگها به شدت کاهش یافته و بنا براین توسعه آبهای زیرزمینی به بخشهای هوازده سطحی محدود شده و پدیده کارست به صورت عمده قابل مشاهده نیست، بنابر این نفوذ آب به تونل بسیار ناچیز بوده و به ندرت به بیش از چند دهم لیتر در ثانیه خواهد رسید [۵].

## ۲-۸-۳- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۱+۷۹۰ الی ۲+۶۴۵ (پهنه C)

این پهنه به علت کاهش میزان روباره تونل، در طرح اولیه به صورت ناو کانال در نظر گرفته شده است. بر اساس این طرح ناو کانالی با طول ۱۲۵۰ و ابعاد  $2/5 \times 3/4$  (عرض کف  $\times$  عمق) با دیواره های قائم، انتقال آب در این بخش را به عهده گرفته است و سنگ بستر ناو کانال در سرتاسر مسیر از نهشته آهک - آهک مارنی واحد  $JK_4^{LM}$  می گذرد. سنگ شناسی واحد در این قسمت تناوبی از آهک مارنی - رسی و آهک است. بخشهای آهکی دارای پهنایی در حدود یک تا سه متر و بخشهای مارنی - رسی بین ۵ تا ۲۰ متر ضخامت دارند.

امتداد لایه بندی تقریباً شرقی - غربی بوده و شیب متغییری بین ۴۵ تا ۷۰ درجه دارند. از

گسل‌های مهم موجود در این پهنه می توان به گسل‌های F7 , F8 , F21 اشاره نمود [۵].



## ۲-۸-۴- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۶۴۵+۲ الی ۸۱۰+۳ (پهنه D)

این پهنه حد فاصل ورودی قطعه سوم خط انتقال تا محل گسل F10 را در بر گرفته است. با پیشروی تونل از ورودی قطعه سوم به سمت خروجی بر میزان روباره افزوده شده، نهایتاً در متر ۷۴۰ متر از ابتدای پهنه D به ۲۴۰ متر روی تونل خواهد رسید.

تمامی مسیر پهنه D از آهک مارنی - رسی واحد  $JK_4^{LM}$  میگذرد. سنگ شناسی واحد در این قسمت، شامل تناوبی از رسوبات آهک مارنی - رسی و آهک است. امتداد عمومی لایه ها شرقی - غربی و شیب لایه ها بین ۳۰ تا ۸۰ درجه متغیر است که به سمت شمال است.

گسل F21 با ساز و کار راندگی باعث رانده شدن بخشی از واحد  $JK_4^{LM}$  روی خودش شده است و محدوده ورودی قطعه سوم را تحت تاثیر قرار داده است. شیب این گسل در حدود ۳۴ درجه می باشد.

گسل F10 مرز واحدهای آهک مارنی - رسی و شیل آهکی را تشکیل میدهد که در حدود ۴۹ درجه به سمت شمال شیب دارد. محل تقاطع این گسل با محور تونل در متر ۱۱۵۰ متر از ورودی قطعه سوم خواهد بود.

بر اساس بررسی های روزمینی، شاخص کیفی سنگ در این پهنه را میتوان درحد نسبتاً خوب تا خوب دانست. از نظر وجود آب هر چند درزه و شکستگی های فراوانی در این قسمت در سنگها دیده میشود، اما به علت وجود رس در ترکیب نهشته ها امکان تشکیل سفره های آب زیرزمینی در حد پایینی است، زیرا اولاً "درز و شکستگی ها کاملاً" به هم مرتبط نیستند و ثانياً "اکثر سنگهای موجود دارای قابلیت انحلال بسیار پایینی است و بنابراین خطری از جانب آبهای زیرزمینی و هجوم آنها به داخل تونل پروژه را تهدید نمی کند [۵]."

## ۲-۸-۵- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۳+۸۱۰ الی ۶+۵۸۰ (پهنه E)

سنگ شناسی این واحد شامل آهکهای مارنی - رسی و شیلهای آهکی است که در بخشهایی که میزان ترکیبات کربناته افزایش یافته و لیتولوژی به سمت مارن سنگ گرایش یافته است، رسوبات به صورت موضعی به رنگ سفید تا سفید شیری دیده میشود. بیشترین میزان روباره در این پهنه در حدود ۲۱۰ متر میباشد. برگواره ها معمولاً در این پهنه به موازات لایه بندی بوده و امتداد شرقی - غربی و شیبی معادل ۵۵ تا ۸۰ درجه دارند. بین لایه های آهکی و آهک ماسه ای با پهنای حدود ۵ متر در بین واحدها دیده می شود.

گسل F19 با امتداد حدود N75E / 38 در حوالی کیلومتر ۵۲۵۰ مسیر خط انتقال قرار گرفته است. ساز و کار گسل راندگی بوده و با شیب حدود ۳۸ درجه باعث رخداد جابجایی در واحد  $JK^{LM_{95}}$  شده است.

گسل F25 هم از انشعابات گسل F19 است و دارای خصوصیتی شبیه به آن است که در مترائ ۵۳۰۰ با تونل برخورد میکند.

گسل F27 با امتداد N05E در کیلومترات ۵+۸۵۰ قرار گرفته است گسل F17 نیز با امتداد N25W / 48 مرز پهنه های F و E را تشکیل میدهد.

با توجه به بررسی های روزمینی و مقایسه وضعیت سنگ با سایر نواحی مشابه که مورد کاوشهای ژئوفیزیکی واقع شده اند، شاخص کیفی سنگ را در این پهنه می توان در حد نسبتاً خوب دانست. سنگ بستر اصلی، همانطور که گفته شد، از جنس آهک رسی - مارنی و شیل آهکی خرد شده است که بین لایه هایی از جنس آهک و آهک ماسه ای، در آنها دیده می شود. پهنه E نیز مانند سایر بخشهای ناحیه به علت وجود رس در ترکیب سنگها دارای نفوذ پذیری پایینی می باشد [۵].

## ۲-۸-۶- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۵۸۰+۶ الی ۷۰۰+۶ (پهنه F)

پهنه F در حد فاصل گسلهای F33 و F17 واقع در قطعه پنجم مسیر خط انتقال (EF) با طول حدود ۱۲۰ متر قرار گرفته است. بیشترین میزان روباره تونل در این پهنه حدود ۱۰۰ متر خواهد بود. تمام پهنه F مسیر خط انتقال، از نهشته های مربوط به واحد  $JK^{LSH}_1$  می گذرد. سنگ شناسی این واحد شامل شیل های آهکی خاکستری تیره تا سیاه رنگی است که بین لایه های از ماسه سنگ و ماسه سنگ آهکی به رنگ خاکستری تا قهوه ای روشن و آهک به رنگ خاکستری روشن تا کرم در آنها دیده میشود.

مشخصات لایه های اندازه گیری شده در حوالی محور مسیر خط انتقال در حدود N45-90W 70 NE-50/ می باشد.

گسل F17 با ساز و کار راندگی دارای امتداد و شیب N25 W/ 48NE می باشد که مرز پهنه های E,F است. گسل F33 با راستای تقریبی N20E به موازات دره خرسناک قرار گرفته است. این گسل دارای ساز و کار امتداد لغز از نوع چپ بر بوده و شیب نزدیک به قائم دارد. کیفیت سنگ در حد ضعیف تخمین زده شده است. نهشته های شیلی این واحد دارای پایین ترین حد آبگذری در میان نهشته های تشکیل دهنده مسیر خط انتقال هستند. بنابراین امکان نفوذ آب به داخل این واحد و در نتیجه ورود به مقطع حفاری در حد بسیار ضعیفی است [۵].

## ۲-۸-۷- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۷۵۰+۶ الی ۸۴۰+۶ (پهنه G)

پهنه G در حد فاصل دو گسل F33 در غرب (۶۷۵۰ متر) و F18 در شرق (۸۴۶۰ متر) قرار گرفته است و در حقیقت بخش اعظم قطعه پنجم و قسمت کوچکی از قطعه ششم را دربر گرفته است. بیشترین میزان روباره در این پهنه در متر ۷۰۵۰ و حدود ۱۲۰ متر است.

سنگ بستر این پهنه از مسیر خط انتقال را نهشته های واحد  $JK^{ML}_5$  تشکیل داده است. سنگ شناسی این واحد بیشتر شامل شیل های کربناته و مارن سنگها و آهکهای مارنی خاکستری

روشن است. امتداد عمومی لایه بندی در این بخش نیز شرقی - غربی و دارای شیب ۸۰ تا ۵۵ درج به سمت شمال است.

گسل F18 به عنوان مرز پهنه های H , G دارای مشخصات N30 W/50 NE می باشد. در این پهنه نیز با توجه به جنس نهشته های بستر تونل که از سنگ آهکهای مارنی، مارن سنگهای آهکی و شیل های آهکی تشکیل شده است و با توجه به وجود رس در ترکیبات سنگهای کربناته فوق، استعداد انحلال این سنگ ها تا حد بسیار زیادی کاهش یافته و احتمال وجود آبهای زیرزمینی در این سنگها را می توان منتفی دانست [۵].

## ۲-۸-۸- زمین شناسی مهندسی کیلومتر ۴۶۰+۸ الی ۱۷۰+۹ ( پهنه H)

این پهنه در حد فاصل گسلهای F18 (حوالی کیلومتر ۴۶۰+۸) و F46 (حوالی کیلومتر ۹۱۷۰) قرار دارد.

بیشترین میزان روباره در طول این مسیر پهنه معادل ۷۵ متر است که در ابتدای پهنه قرار گرفته است. سنگ بستر این پهنه را نهشته های واحد  $JK^{LSH}$  تشکیل می دهد. سنگ شناسی این واحد شامل شیل و مارن سنگهای آهکی است که بین لایه هایی از جنس آهک، آهک مارنی و ماسه سنگ آهکی در آن ها دیده میشود. مشخصات لایه بندی آهک در این پهنه N65-90W/35-60N می باشد.

گسل F46 از نوع معکوس بوده و دارای امتداد و شیب ۸۰ - ۳۰ / N 80 E می باشد. سنگهای این پهنه بر اساس مطالعات انجام شده در حد ضعیف میباشند. وجود رس در ترکیب سنگهای فوق و همچنین پرشدن شکاف های بین ریز ناپیوستگیها توسط رس بر میزان ناپایداری افزوده است. آبگذری این واحد بدلیل وجود رس در ترکیب سنگها بسیار کم است [۵].

## ۲-۸-۹- زمین شناسی مهندسی از کیلومتر ۹+۱۷۰ الی ۱۱+۲۶۰ (پهنه I)

این پهنه حد فاصل گسل F46 در غرب و دره چشمه لنگان در شرق می باشد که این پهنه بخش انتهایی قطعه ششم مسیر خط انتقال (FG) و تمامی قطعه هفتم (GH) را در بر گرفته است. بیشترین مقدار روباره مربوط به کیلومتر ۹+۳۵۰ بوده و حدود ۶۰ متر میباشد.

سنگ بستر تونل در این پهنه غالباً از سنگ آهکهای مارنی - رسی شیلهای آهکی واحد  $JK^{ML}_s$  می باشد. مشخصات لایه های آهکی در این پهنه عموماً "E - W- 55 - 80 N" می باشد.

گسل F46 که مرز پهنه های H,I می باشد و در قسمت قبل مشخصات آن ذکر شد. گسل F47 با ساز و کار امتداد لغز چپ بر شیبی نزدیک به قائم دارد و امتداد آن در محل برخورد با مسیر خط انتقال N40E میباشد. گسل مزبور به غیر از خرد شدگی و در هم ریختگی ساختاری که در دهانه خروجی قطعه ششم و ورودی قطعه هفتم ایجاد نموده، تاثیر ویژه دیگری ندارد.

آهک های مارنی - رسی و مارنهای آهکی که سنگ بستر این پهنه را تشکیل داده است، بر اساس بررسی های روزمینی و در نظر گرفتن وضعیت سنگ شناسی، در حد نسبتاً "خوب تخمین زده میشود [۵]."

## فصل سوم

### وضعیت درزه ها و

### آزمایشهای انجام شده روی نمونه ها

### ۳-۱- مقدمه

در پروژه های تونلسازی، ارزیابی موقعیت و تعداد ناپیوستگی ها نقش مهمی را در تحلیل پایداری تونل و طراحی های لازم جهت تعیین سیستم نگهداری داریم و موقت ایفا می کند. با توجه به طول حدود ۱۲ کیلومتری خط انتقال آب خدنگستان در ایستگاههای مختلف در طول مسیر، دسته درزه های گوناگونی با شیب و امتداد و خصوصیات متفاوت برداشت شده است.

این مشخصات شامل امتداد و شیب حقیقی ناپیوستگی ها و لایه بندی هستند که جهت بررسی پایداری تونل باید ابتدا شیب ظاهری این ناپیوستگیها در امتداد عمود بر محور تونل یعنی در سینه کارها محاسبه شود و سپس از آنها استفاده گردد.

در این فصل ابتدا وضعیت درزه ها در سینه کارهای مختلف مشخص شده و سپس نتایج آزمایشهای ژئوتکنیکی انجام شده روی نمونه های گرفته شده از مسیر تونل، آورده شده است. بر روی مسیر تونل انتقال آب خدنگستان، شش گمانه حفر شده و مغزه گیری شده که در ادامه مشخصات آنها آمده است.

### ۳-۲- وضعیت درزه ها در سینه کارها (مقاطع عمود بر محور تونل)

همانطور که در فصل قبل مشاهده گردید، از نظر زمین شناسی مسیر تونل به ۹ پهنه تقسیم شد. مشخصات ناپیوستگی ها نیز در این ۹ پهنه و در ایستگاههای مختلف آنها اندازه گیری و ثبت شده است.

جهت استفاده از این دسته درزه ها و لایه بندی ها در تحلیل پایداری تونل ابتدا باید شیب ظاهری آنها در مقاطع مورد نظر که عمود بر محور تونل است، محاسبه گردد. جداول صفحات بعدی این مشخصات را به همراه محاسبات مربوطه نشان میدهد [۵].

جدول ۳-۱- مشخصات دسته درزه های اصلی در قسمت های مختلف مسیر تونل [۶]

Part	شیب ظاهری $d=174$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 1	۷۸	۰/۶-۲	۳-۱۰	۱۹۰/۷۹	درزه ۱ (J1)
.....	۲۷	۰/۶-۲	۳-۱۰	۰۳۵/۴۵	درزه ۲ (J2)
الی	۳۰	۰/۶-۲	۳-۱۰	۰۷۱/۶۹	درزه ۳ (J3)
۰+۰۵۰	۵۰	۱۵ و ۲	-	۳۵۵/۵۰	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=174$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 2,3	۶۱	۰/۶-۲	۳-۱۰	۰۱۶/۶۳	درزه ۱ (J1)
۰+۰۵۰	۷۸	۰/۶-۲	۱۰-۲۰	۲۲۶/۸۲	درزه ۲ (J2)
الی	۳۰	۰/۶-۲	۱-۳	۰۷۱/۶۹	درزه ۳ (J3)
۰+۸۹۰	۵۰	۱۵ و ۲	-	۳۵۵/۵۰	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=174$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 4,5	۵۹	۰/۶-۲	۳-۱۰	۲۳۹/۷۶	درزه ۱ (J1)
۰+۸۹۰	۸۷	۰/۶-۲	۱۰-۲۰	۱۰۴/۸۹	درزه ۲ (J2)
الی	۲۳	۰/۶-۲	> ۲۰	۳۰۰/۲۳	درزه ۳ (J3)
۱+۶۹۰	۵۰	۱۵ و ۲	-	۳۵۵/۵۰	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=174$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 6	۵۲	۰/۶-۲	۳-۱۰	۰۳۶/۶۰	درزه ۱ (J1)
۱+۶۹۰	۴۵	۰/۶-۲	۱۰-۲۰	۳۵۷/۴۵	درزه ۲ (J2)
الی	۷۴	۰/۶-۲	۳-۱۰	۳۴۹/۷۴	درزه ۳ (J3)
۲+۳۱۵	۵۰	۱۵ و ۲	-	۳۵۵/۵۰	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=174$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 7	۸	۰/۶-۲	۳-۱۰	۰۶۰/۱۹	درزه ۱ (J1)
۲+۳۱۵	۸۷	۰/۶-۲	۳-۱۰	۲۴۲/۸۹	درزه ۲ (J2)
الی	۱۸	۰/۶-۲	> ۲۰	۰۷۲/۵۸	درزه ۳ (J3)
۲+۵۲۵	۴۵-۷۰	۱۵ و ۲	-	۰/۴۵-۷۰	لایه بندی



Part	شیب ظاهری $d=25$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 8	۳۳	۰/۶-۲	۳-۱۰	۱۵۰ / ۴۹	درزه ۱ (J1)
۲+۵۴۵	۱۴	۰/۶-۲	۳-۱۰	۱۸۷ / ۱۵	درزه ۲ (J2)
الی	۸۴	۰/۶-۲	۳-۱۰	۳۴۷ / ۸۵	درزه ۳ (J3)
۲+۷۴۵	۲۸-۷۹	۱۵ و ۲	-	۰ / ۳۰-۸۰	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=25$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 9	۵۶	۰/۶-۲	۳-۱۰	۰۱۹ / ۵۶	درزه ۱ (J1)
۲+۷۴۵	۶۱	۰/۶-۲	۳-۱۰	۲۴۵ / ۶۷	درزه ۲ (J2)
الی	۸۸	۰/۶-۲	۳-۱۰	۹۰ / ۹۰	درزه ۳ (J3)
۲+۷۷۰	۲۸-۷۹	۱۵ و ۲	-	۰ / ۳۰-۸۰	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=25$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 10	۹۰	۰/۶-۲	۳-۱۰	۰۱۱ / ۹۰	درزه ۱ (J1)
۳+۷۷۰	۵۹	۰/۶-۲	۳-۱۰	۰۶۰ / ۶۴	درزه ۲ (J2)
۳+۸۷۰	۵۳-۷۹	۱۵ و ۵	-	۰ / ۵۵-۸۰	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=25$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 11	۷۸	۰/۶-۲	۳-۱۰	۰۳۹ / ۷۹	درزه ۱ (J1)
۳+۸۷۰	۵۵	۰/۶-۲	۳-۱۰	۲۳۱ / ۶۸	درزه ۲ (J2)
الی	۶	۰/۶-۲	۳-۱۰	۲۸۶ / ۳۵	درزه ۳ (J3)
۴+۸۳۰	۵۳-۷۹	۱۵ و ۵	-	۰ / ۵۵-۸۰	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=40$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 12	۷۸	۰/۶-۲	۳-۱۰	۱۹۵ / ۷۹	درزه ۱ (J1)
۴+۸۳۰	۳۳	۰/۶-۲	۱-۳	۱۱۸ / ۷۲	درزه ۲ (J2)
۵+۰۳۰	۲۴-۷۷	۱۵ و ۲	-	۰ / ۳۰-۸۰	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=40$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 13	۸۴	۰/۶-۲	۱-۳	۰۳۱ / ۸۴	درزه ۱ (J1)
۵+۰۳۰	۷۴	۰/۶-۲	۱-۳	۰۹ / ۷۶	درزه ۲ (J2)
۶+۱۰۰	۳۴	۱۵ و ۵	-	۳۴۲ / ۵۲	لایه بندی

ادامه جدول ۱-۳- مشخصات دسته درزه های اصلی در قسمت های مختلف مسیر تونل [۶]

Part	شیب ظاهری $d=20$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 14,15,16	۶۶	۰/۶-۲	۱۰-۲۰	۱۶۴/۷۶	درزه ۱ (J1)
۶+۱۰۰	۳۰	۰/۶-۲	۱-۳	۰/۵۲/۳۱	درزه ۲ (J2)
الی	۲۲	۰/۶-۲	۱-۳	۳۳۰/۵۰	درزه ۳ (J3)
۶+۸۹۰	۳۴	۱۵ و ۵	-	۳۴۲/۵۲	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=17$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 17	۶۳	۰/۶-۲	۳-۱۰	۲۱۸/۶۵	درزه ۱ (J1)
۶+۸۹۰	۷۱	۰/۶-۲	۳-۱۰	۱۵۴/۷۷	درزه ۲ (J2)
۸+۲۱۰	۴۳	۱۵ و ۵	-	۰/۲۴/۴۶	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=32$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 18,19,20	۲	۰/۶-۲	۱۰-۲۰	۱۲۰/۴۸	درزه ۱ (J1)
۸+۲۱۰	۷۷	۰/۶-۲	۳-۱۰	۰/۸۰/۸۱	درزه ۲ (J2)
الی	۸۴	۰/۶-۲	۳-۱۰	۲۹۳/۹۰	درزه ۳ (J3)
۱۰+۲۸۵	۵۰	۱۵ و ۵	-	۰/۲۵/۵۵	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=32$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 21	۸۹	۱-۳	۳-۱۰	۰/۰۷/۹۰	درزه ۱ (J1)
۱۰+۲۸۵	۶۱	۰/۶-۲	۳-۱۰	۰/۲۳/۶۱	درزه ۲ (J2)
۱۰+۴۸۵	۵۰-۷۸	۱۵ و ۵	-	۰/۵۵-۸۰	لایه بندی

Part	شیب ظاهری $d=32$	فاصله داری (m)	تداوم (m)	موقعیت فضایی	درزه ها و لایه ها
Part 22, 23	۵۴	۰/۶-۲	۳-۱۰	۳۴۶/۶۳	درزه ۱ (J1)
۸+۲۱۰	۸۵	۰/۶-۲	۳-۱۰	۱۸۳/۸۶	درزه ۲ (J2)
۱۰+۲۸۵	۵۰-۷۸	۱۵ و ۵	-	۰/۵۵-۸۰	لایه بندی

### ۳-۳- گمانه های حفر شده در مسیر تونل

بر روی مسیر تونل انتقال آب خدنگستان، شش گمانه حفر شده است. گمانه BK1-A بر روی قطعه ششم، گمانه BK1 و BK2 بر روی قطعه پنجم، گمانه BK3 و BK4 بر روی قطعه چهارم و گمانه BK6 بر روی قطعه سوم حفاری شده اند. مشخصات گمانه های مذکور در جدول ۲-۳ آمده است:

جدول ۲-۳- مشخصات گمانه های حفر شده در طول مسیر [۶]

گمانه	مطالعه گمانه از عمق	مطالعه گمانه تا عمق	عمق آبرفت (متر)	عمق آب زیرزمینی (متر)	عمق (متر)	ارتفاع دهانه گمانه (متر)	RQD (%)
BK1-A	۱۸	۲۵	۴	۶/۵-۶/۹	۳۵/۰۰	۲۴۳۷/۶۹	۷۰
BK1	۲۷	۵۷	۹	۱۸-۱۹	۵۷/۰۰	۲۴۶۰/۹۷	۶۰
BK2	۴۷	۷۷/۲	۶	۶/۲-۷	۷۷/۲۰	۲۴۸۳/۰۰	۴۰
BK3	۷۴	۱۰۴	۴۲/۸	۳۳/۵-۳۴	۱۰۴/۰۰	۲۵۰۷/۳۵	۶۰
BK4	۸۱	۱۱۱/۱	۲۰/۴۰	۴/۵-۶	۱۱۱/۱۰	۲۵۱۸/۱۲	۶۵
BK6	۸۸	۱۱۸/۲	۴-۶	۸/۵	۱۱۸/۲۰	۲۵۱۲/۷۵	۶۰

### ۳-۴- آزمایشات لوژان

جهت شناسایی وضعیت نفوذ پذیری توده های سنگی در ترازهای مختلف گمانه ها، توسط شرکت مشاور، اقدام به انجام آزمایش لوژان با روش سینگل پکر<sup>۱</sup> در حین حفاری شده است، که نتایج غالباً "مبنی بر نفوذ پذیری بسیار کم است. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات لوژان در تمام گمانه ها می توان اینطور استنباط کرد که در تمام طول مسیر تونل بدلیل عبور آن از تشکیلات سنگ

1- Single Pocke

آهک مارنی و بسته بودن درزه ها بوسیله رس یا کلسیت نفوذپذیری بسیار پایین می باشد و لذا میتوان امیدوار بود که در مسیر تونل با هجوم ناگهانی آب برخورد نخواهد شد. از نتایج آزمایشات لوژان در عمق های کم می توان به این نتیجه رسید که آبهای زیرسطحی منطقه کلا" در لایه آبرفت رویی و قسمت های هوازده و ضعیف رویی سنگ بستر در جریان است و با توجه به نتایج بدست آمده و جنس غالب سنگ موجود ( سنگ آهک مارنی ) به هیچ عنوان نمی توان انتظار وجود شبکه های هدایت آب زیرزمینی ( کارست ) را در منطقه عبور تونل پیش بینی نمود. نتایج آزمایشات لوژان در گمانه های مختلف در قسمت پیوست آمده است [۶].

### ۳-۵- آزمایشات آزمایشگاهی

جهت شناسایی خصوصیات ژئوفیزیکی نمونه های بکر سنگ، از مغزه های اخذ شده از گمانه های حفر شده، شرکت مشاور نمونه برداری کرده و پس از موم اندود کردن به آزمایشگاه ارسال و آزمایشهای لازم را روی آنها انجام داده است. به لحاظ اینکه کلیه نقاط حفاری شده دارای یک لیتولوژی واحد می باشد و گزارشهای زمین شناسی نیز این مطلب را تایید می کند، نتایج بدست آمده را میتوان برای کلیه نقاط تعمیم داد.

آزمایشهای انجام گرفته به شرح ذیل است [۶]:

#### ۳-۵-۱- اندازه گیری خصوصیات فیزیکی

نتایج حاصل از آزمایشات اندازه گیری خصوصیات فیزیکی در جدول ۳-۳ به تفصیل آمده است و جهت انجام محاسبات و مطالعات بعدی از اعداد ارائه شده در سطر آخر این جدول با عنوان نتیجه میتوان بهره جست. نتایج اخذ شده گویای این مطلب است که سنگ بکر دارای تخلخل نسبتاً کم به مقدار ۳ درصد بوده، محیط مرطوب و با توجه به جنس سنگ می توان نفوذ پذیری توده سنگ و سنگ بکر را بسیار ناچیز عنوان کرد.

### ۳-۵-۲- اندازه گیری مدول یانگ

پس از حذف نمونه های دارای خطا، نتایج اخذ شده گویای این مطلب است که محیط دارای سنگی با مدول الاستیسیته در حالت بکر نزدیک به ۱۸۹۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (۱۸/۹ گیگا پاسکال) می باشد. لازم به ذکر است که این مقدار مربوط به سنگ بکر می باشد و برای توده سنگ در ادامه مطالعات مقدار مدول الاستیسیته بر اساس شرایط محیط و طبقه بندی انجام شده از توده سنگ برآورد و ارائه خواهد شد.

### ۳-۵-۳- اندازه گیری ضریب پواسون

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده، مقدار ضریب پواسون برای نمونه های موجود مابین ۰/۱۵ و ۰/۲۷ می باشد. پس از بررسی نمونه ها از لحاظ کیفیت و بررسی جداول مرجع عدد ۰/۲۰ جهت انجام محاسبات بعدی پیشنهاد می گردد.

### ۳-۵-۴- تورم آزاد و فشار تورمی

جهت شناسایی نمونه ها از لحاظ تورم از سه گمانه BK6 و BK3 و BK1-A نمونه برداری شده و به دو روش تورم آزاد و فشار تورمی آزمایش انجام گردید که شرح آن در جدول ۳-۴ آمده است:

جدول شماره ۳-۴- نتایج آزمایش فشار تورمی [۶]

گمانه	عمق (m)	فشار تورمی	تورم آزاد
Bk 1 – A	۱۶/۶-۱۶/۹	فاقد تورم	فاقد تورم
BK3	۹۱/۰۷-۹۱/۳۸	فاقد تورم	فاقد تورم
BK6	۹۶/۷-۹۷/۵	فاقد تورم	فاقد تورم

آزمایشات انجام گرفته حاکی از عدم تورم پذیر بودن نمونه های مورد آزمایش می باشد و این مطلب را میتوان برای مسیر تونل تعمیم داد. البته به صورت متناوب در مکانهایی با توده هایی برخورد خواهد شد که در زمان حفر تونل بایستی از این مواضع نمونه برداری و آزمایشات تورم صورت پذیرد.

### ۳-۵-۵- شاخص دوام

آزمایش شاخص دوام بر روی چهار نمونه از گمانه های BK6 و BK3 و BK1-A صورت پذیرفته که نتایج آن در جدول ۳-۵ آمده است. این آزمایش در دو حالت یک مرحله ای و دو مرحله ای صورت پذیرفته و نتایج، حاکی از مقاومت نسبتاً خوب در برابر آزمایش می باشد. لذا پدیده هوازدگی در جنسهای آهک مارنی که در اغلب مسیر تونل با آن برخورد خواهد شد در برابر هوازدگی سنگها نسبتاً مقاوم خواهد بود. ولیکن در مکانهایی که تونل با شیل مارن آهکی و یا گل سنگ برخورد نماید، بایستی آزمایشات تکرار شده و پایداری سنگ بررسی گردد. مشکل هوازدگی بین لایه ای سنگ آهک مارنی که اغلب از رس می باشد، می تواند مشکل زا باشد.

جدول ۳-۵- نتایج آزمایش شاخص دوام [۶]

گمانه	عمق (m)	مرحله ۲ (%)	مرحله ۱ (%)
BK1-A	۲۸/۰-۲۸/۶	۱/۳	۰/۵
BK 3	۷۳/۹۲-۷۴/۷۲	۱/۲	۰/۶
BK3	۷۹/۵-۷۹/۹	۱/۷	۱/۲
BK6	۱۱۵/۸۵-۱۱۶/۳	۱/۴	۰/۷

### ۳-۵-۶- مقاومت فشاری تک محوری

جهت شناسایی خصوصیات مقاومتی سنگ بکر اقدام به انجام هشت آزمایش تک محوری بر روی نمونه های اخذ شده گردید. نتایج این آزمایشات در جدول ۳-۶ به تفصیل آمده است. در نهایت نیز پس از بررسی نمونه ها و نتایج بدست آمده، اعداد نهایی برای انجام مطالعات، ارائه گردیده است. این آزمایشات و نتایج آنها پس از حذف آزمایشهای مشکوک و نمونه های درزه دار، بیان کننده مقاومت واقعی سنگ بکر بدون درزه و شکاف و لایه بندی است.

جدول ۳-۶- نتایج بدست آمده از آزمایشات مقاومت فشاری تک محوری [۶]

گمانه	عمق (m)	مقاومت فشاری تک محوری (kg/cm <sup>3</sup> )	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	رطوبت محتوی (%)
BK1-A	۲۸ - ۲۸/۶	۱۴۵	۲/۷۱	۰/۰۸
BK1-A	۳۴/۲۵-۳۴/۷۵	۹۵	۲/۷۰	۰/۱۰
BK 3	۷۳/۹۲-۷۴/۲۷	۲۹۵	۲/۷۰	۰/۵۰
BK 3	۷۹/۵-۷۹/۹	۲۶۰	۲/۷۲	۰/۷۵
BK 3	۸۸/۱۵-۸۸/۳	۷۹۸	۲/۷۲	۰/۷۰
BK 3	۹۱/۰۷-۹۱/۳۸	۸۵۷	۲/۷۳	۰/۹۰
BK 6	۱۱۵/۸-۱۱۶/۳	۵۳۰	۲/۶۸	۰/۲۶
BK 6	۸۶/۶-۸۷/۴	۳۵۷	۲/۷۱	۰/۱۰
<b>Result</b>	-	<b>۷۳۰</b>	<b>۲/۷۱</b>	<b>۰/۷۰</b>

مقاومت تک محوری برای نمونه های بکر سنگ آهک مارنی موجود مقدار ۷۳۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (۷۳ مگا پاسکال) پیشنهاد میگردد که این مقاومت، مقاومت نسبتاً خوبی برای سنگ موجود می باشد. ولی به علت خرد بودن توده سنگ، چنین مقاومت خوبی برای توده های سنگی انتظار نمی رود.



### ۳-۵-۷- آزمایش سه محوری

جهت مشخص شدن خصوصیات مکانیکی سنگ، آزمایش سه محوری در حالت طبیعی سنگ انجام گرفته که نتایج آن در جدول ۳-۷ در زیر آمده است. نتیجه گیری این جدول با حذف پارامترها و نتایج مشکوک و دور از انتظار انجام شده است.

جدول ۳-۷- نتایج آزمایشات سه محوری [۶]

گمانه	عمق (m)	$\phi$ (deg)	C (MPa)
BK1-A	-	۵۹/۸	۳/۶
BK3	۷۹/۱-۷۹/۹	۳۲	۵/۰۷
BK6	۸۶/۶-۸۷/۴	۴۴/۵۲	۳/۵۲
RESULTE	-	۳۲	۳/۵

### ۳-۵-۸- آزمایش برش در امتداد درزه ها

سه آزمایش برش مستقیم روی درزه ها انجام شده که آزمایشات در حالت طبیعی صورت گرفته است و نتایج آن بصورت مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک سطحی درزه در جدول ۳-۸ آمده است.

جدول ۳-۸- نتایج آزمایشات برش مستقیم روی درزه ها [۶]

گمانه	عمق (متر)	F (deg)	C (MPa)
BK1-A	۲۸/۰-۲۸/۶	۳۳/۸	۰/۲۱
BK3	۹۷/۱-۹۷/۹	۲۴	۰
BK6	-	۳۱	۲/۳۶



## فصل چهارم

پارامترهای ژئومکانیکی مسیر تونل  
و برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس  
طبقه بندی توده سنگ

براساس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، سنگهای مسیر تونل انتقال آب خدنگستان به بیست و سه قسمت یا ناحیه ساختاری تقسیم شده و پارامترهای ژئومکانیکی برای هر قسمت براساس نمونه ها و مطالعه آماری ناپیوستگی ها که در فصل قبل بررسی شدند، تعیین گردیده است.

در این فصل ابتدا مختصری در مورد روشهای طبقه بندی توده سنگ که مبنای برآورد سیستم نگهداری موقت براساس روشهای تجربی می باشد، بحث شده، سپس به بررسی پارامترهای ژئومکانیکی هر قسمت از مسیر تونل و نحوه محاسبه آنها پرداخته و بر اساس روشهای طبقه بندی توده سنگ (RMR و Q) رده بندی شده اند. در نهایت بر اساس این رده بندی، سیستم نگهداری موقت مناسب برای هر قسمت ارائه خواهد شد.

#### ۴-۲- رده بندی مهندسی با روش پیشنهادی بنیادسکی (RMR)

در این رده بندی، پارامترهای ۶ گانه ای که مورد امتیازدهی قرار میگیرند، عبارتند از [15]:

##### ۱- مقاومت فشاری سنگ سالم

این پارامتر توسط آزمایشهای انجام شده روی نمونه های اخذ شده از گمانه ها که روی سنگ بکر انجام میشود تعیین می گردد. نتیجه این آزمایشها در فصل قبل موجود می باشد.

##### ۲- مقدار RQD

در حالت کلی مقدار این پارامترها در گمانه ها و مغزه های بدست آمده، اندازه گیری می شود. مقدار RQD در گمانه های مختلف نیز در فصل قبل در قسمت (۳-۳) آمده است.

##### ۳- فاصله داری درزه ها و ضخامت میانگین تک لایه ها

امتیاز این دو پارامتر به روش حداقل مقدار فاصله داری، مورد امتیازدهی قرار گرفته و آنگاه مقدار انتخابی در نامناسبترین حالت پیشنهاد شده است.

#### ۴- وضعیت ناپیوستگی ها

این پارامتر اصلی برای امتیاز دهی به ۵ پارامتر کوچکتر: تداوم، بازشدگی، هوازدگی، ماده پرکننده و زبری سطح درزه ها تبدیل شده و امتیاز هر یک از این پارامترهای کوچکتر برآورد و مجموع آنها برای وضعیت ناپیوستگیها بکار گرفته شده است. وضعیت ناپیوستگی ها و وضعیت پارامترهای آن در فصل قبل به تفصیل آمده است.

#### ۵- آبهای زیرزمینی

وجود آب زیرزمینی در محیط کاری در صورتیکه نفوذپذیری واحدهای سنگی منطقه زیاد باشد، اهمیت زیادی دارد. در قسمت زمین شناسی مهندسی سنگهای اطراف تونل خدنگستان، به این موضوع اشاره شد که به علت نوع سنگ و وجود رس در ترکیبات، نفوذ پذیری بسیار پایین بوده و مشکلی از این بابت وجود ندارد. به این ترتیب امتیاز پارامتر آبهای زیرزمینی در رده بندی مهندسی به صورت قطره ای در نظر گرفته شده است.

#### ۶- جهت داری ناپیوستگیها

این پارامتر با توجه به چگونگی پیشروی تونل به سمت توده سنگ درزه دار، شیب لایه ها و ناپیوستگی ها انتخاب می شود.

#### ۴-۳- روش طبقه بندی براساس شاخص کیفی ( Q )

این روش در سال ۱۹۷۴ توسط بارتن و همکارانش در انستیتوی ژئوتکنیکی نروژ (NGI) ارائه شد. اساس این روش بر مبنای محاسبه مقدار Q از رابطه زیر و سپس ارائه سیستم نگهداری مناسب می باشد. مقدار Q از رابطه زیر بدست می آید:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1-4)$$

که در آن RQD شاخص کیفی سنگ، Jn تعداد دسته درزه، Jr عدد زبری درزه ها، Ja عدد هوازدگی درزه ها، Jw عدد کاهش آب درزه ها و SRF ضریب کاهش تنش می باشد [۱۱].

در جدول (۴-۱) مقدار Q برای قسمت‌های مختلف مسیر تونل آورده شده است.

#### ۴-۴- برآورد پارامترهای ژئومکانیکی با روش RMR

ابتدا به بررسی روابط مورد نیاز برای برآورد پارامترهای ژئومکانیکی با روش RMR می‌پردازیم.

(۱) رابطه های محاسبه مقاومت فشاری توده سنگ [23] و [۷]:

$$\delta_{cm} = \delta_{ci} \times \exp\left(\frac{RMR-100}{18.75}\right) \quad (a)$$

$$\delta_{cm} = \delta_{ci} \times \exp\left(\frac{RMR-100}{13.07}\right) \quad (b)$$

$$\delta_{cm} = \frac{2c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (C)$$

که در این روابط  $\sigma_{cm}$  و  $\sigma_{ci}$  به ترتیب مقاومت فشاری توده سنگ و مقاومت فشاری سنگ بکر هستند.

(۲) رابطه های محاسبه مدول دگر شکلی (توده سنگ) [22] و [23]:

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40} \quad (GPa) \quad (a)$$

$$E_m = 0.0736 * \exp(0.0755RMR) \quad (GPa) \quad (b)$$

(۳) رابطه برآورد مقاومت کششی [15] و [23]:

$$\delta t m = \delta t \times \exp \left[ \frac{RMR - 100}{27} \right] \quad (a)$$

$$\delta t = 0.053 + 0.07 \delta c i \quad (b)$$

(۴) رابطه سینگ برای تقریب مدول برشی [23]:

$$G = 0.1E$$

(۵) فشار نگهدارنده سقف نهایی (فشار وارد بر پوشش) [17]:

$$load Q = \frac{2\sqrt{Jn}}{3Jr} \times Q^{-0.333}$$

در جدول (۴-۲) پارامترهای ژئومکانیکی ۲۳ قسمت مسیر تونل آمده است، که در آن: GSI:

مقدار طبقه بندی روش GSI بر اساس پیشنهاد هوک و براون است:

$$GSI = RMR - 5$$

$$E: \text{مدول تغییر شکل بر اساس فرمول } E = 10 \frac{RMR - 10}{40} \text{ (گیگا پاسکال)}$$

$\phi m$ : زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ (درجه)

$Cm$ : مقدار چسبندگی توده سنگ (مگا پاسکال)

$s cm$ : مقاومت تک محوری توده سنگ (مگا پاسکال)

$Q$ : مقدار بار وارده بر پوشش نهایی تونل طبق پیشنهاد بارتن (کیلوگرم بر متر مربع)

$over bu$ : مقدار حداقل و حداکثر روباره (متر)

$\sigma l$ : مقدار تنش قائم ثقلی بر اساس حداکثر روباره (مگا پاسکال)

$Ko$ : ضریب فشار جانبی ( $\sigma h / \sigma v$ ) طبق رابطه [۱۰]:

$$ko = 0.25 + 7E (0.001 + (1/Z))$$

جدول ۴-۱- مقدار شاخص کیفی سنگ برای قسمت‌های مختلف مسیر تونل خدنگستان [۶]

قسمت	از	تا	ROD (%)	SRF	Jv	Ja	Jr	Jn	Q
۱	۰+۰۰۰	۰+۰۵۰	۲۰	۱۰	۰/۶۶	۳	۳	۱۲	۰/۱۱
۲	۰+۰۵۰	۰+۲۵۰	۳۰	۱۰	۰/۶۶	۲	۳	۹	۰/۳۳
۳	۰+۲۵۰	۰+۸۹۰	۷۰	۷/۵	۱	۱	۳	۹	۳/۱۱۱
۴	۰+۸۹۰	۱+۰۱۰	۳۵	۱۰	۱	۲	۱/۵	۱۲	۰/۲۱۹
۵	۱+۰۱۰	۱+۶۹۰	۷۰	۷/۵	۱	۱	۳	۹	۳/۱۱۱
۶	۱+۶۹۰	۲+۳۱۵	۴۰	۷/۵	۱	۳	۳	۱۲	۰/۴۴۴
۷	۲+۳۱۵	۲+۵۴۵	۷۰	۷/۵	۱	۲	۳	۹	۱/۵۵۶
۸	۲+۵۴۵	۲+۷۴۵	۴۰	۱۰	۱	۳	۳	۱۲	۰/۳۳۳
۹	۲+۷۴۵	۳+۷۷۰	۷۰	۷/۵	۱	۱	۳	۹	۳/۱۱۱
۱۰	۳+۷۷۰	۳+۸۷۰	۳۰	۱۰	۱	۲	۱/۵	۱۲	۰/۱۸۸
۱۱	۳+۸۷۰	۴+۸۳۰	۶۰	۷/۵	۱	۱	۲	۹	۱/۷۷۸
۱۲	۴+۸۳۰	۵+۰۳۰	۵۰	۱۰	۱	۳	۲	۱۲	۰/۲۷۸
۱۳	۵+۰۳۰	۶+۱۰۰	۵۰	۷/۵	۱	۲	۲	۹	۱/۷۷۸
۱۴	۶+۱۰۰	۶+۳۰۰	۴۰	۱۰	۱	۳	۲	۱۲	۰/۲۲۲
۱۵	۶+۳۰۰	۶+۵۹۰	۶۵	۷/۵	۱	۱	۲	۹	۱/۹۲۶
۱۶	۶+۵۹۰	۶+۸۹۰	۴۰	۱۰	۱	۲	۱/۵	۱۲	۰/۲۵
۱۷	۶+۸۹۰	۸+۲۱۰	۶۰	۷/۵	۱	۱	۲	۹	۱/۷۷۸
۱۸	۸+۲۱۰	۸+۴۱۰	۳۰	۱۰	۱	۳	۲	۹	۰/۲۲۲
۱۹	۸+۴۱۰	۹+۲۶۰	۴۰	۱۰	۱	۲	۱/۵	۱۲	۰/۲۵
۲۰	۹+۲۶۰	۱۰+۲۸۵	۶۰	۷/۵	۱	۱	۲	۹	۱/۷۷۸
۲۱	۱۰+۲۸۵	۱۰+۴۸۵	۴۰	۱۰	۱	۳	۲	۹	۰/۲۹۶
۲۲	۱۰+۴۸۵	۱۰+۸۸۵	۷۰	۷/۵	۱	۲	۲	۹	۱/۰۳۷
۲۳	۱۰+۸۸۵	۱۱+۲۶۶	۴۰	۷/۵	۱	۳	۲	۹	۰/۳۹۵

جدول ۴-۲- پارامترهای ژئومکانیکی در مسیر تونل خدنگستان [۱۱]

Part	From	To	Q	RMR	GSI	E	$\mu$ m	Cm	s	cm	LOAD	OVER	BU	s	Ko
1	0+000	0+050	0.11	23	18	2.113	24.9	0.45	1.41	13367	10 - 40	1.06	0.63		
2	0+050	0+250	0.33	31	26	3.35	29.5	0.69	2.37	9647	40 - 190	5.05	0.4		
3	0+250	0+890	3.111	39	34	5.309	31	0.9	3.2	8070	190 - 350	9.31	0.39		
4	0+890	1+010	0.219	31	26	3.35	29.5	0.69	2.37	22087	260 - 290	7.71	0.35		
5	1+010	1+690	3.111	39	34	5.309	31.3	0.9	3.2	8070	70 - 260	6.91	0.43		
6	1+690	2+315	0.444	34	29	3.981	30.3	0.71	2.47	8770	0 - 70	1.86	0.68		
7	2+315	2+545	1.556	39	34	5.309	31.3	0.9	3.2	8070	30 - 60	1.60	0.91		
8	2+545	2+745	0.333	34	29	3.981	30.3	0.71	2.47	9650	0 - 40	1.06	0.97		
9	2+745	3+770	3.111	39	34	5.309	31.3	0.9	3.2	8070	30 - 240	6.38	0.44		
10	3+770	3+870	0.188	31	26	3.35	29.5	0.69	2.37	23381	190 - 210	5.58	0.39		
11	3+870	4+830	1.778	39	34	5.309	31.3	0.9	3.2	8250	100 - 220	5.85	0.46		
12	4+830	5+030	0.278	34	29	3.981	30.3	0.71	2.47	15902	0 - 100	2.66	0.56		
13	5+030	6+100	1.778	39	34	5.309	31.3	0.9	3.2	8660	70 - 100	2.66	0.66		
14	6+100	6+300	0.222	34	29	3.981	30.3	0.71	2.47	16822	0 - 80	2.13	0.63		
15	6+300	6+590	1.926	39	34	5.309	31.3	0.9	3.2	8070	80 - 100	2.66	0.66		
16	6+590	6+890	0.25	31	26	3.35	29.5	0.69	2.37	21773	90 - 100	2.66	0.51		
17	6+890	8+210	1.778	39	34	5.309	31.3	0.9	3.2	8660	40 - 120	3.19	0.6		
18	8+210	8+410	0.222	31	26	3.35	29.5	0.69	2.37	16570	0 - 60	1.60	0.66		
19	8+410	9+260	0.25	31	26	3.35	29.5	0.69	2.37	21170	50 - 70	1.86	0.61		
20	9+260	10+285	1.778	39	34	5.309	31.3	0.9	3.2	8660	40 - 60	1.60	0.91		
21	10+285	10+485	0.296	34	29	3.981	30.3	0.71	2.47	14940	0 - 40	1.06	0.67		
22	10+485	10+885	1.037	39	34	5.309	32.3	1.25	4.54	9910	30 - 40	1.06	1.22		
23	10+885	11+266	0.395	34	29	3.981	30.3	0.71	2.47	13570	0 - 40	1.06	0.97		

#### ۴-۵- سیستم های نگهداری اولیه

سیستم های نگهداری متداول اولیه که در تونلها بکار میروند، شامل اجزای زیر میباشد [۲]:

- |                     |           |
|---------------------|-----------|
| ۱- بتن پاشی         | Shotcrete |
| ۲- شبکه تور فولادی  | Wire Mesh |
| ۳- پیچ سنگهای مپاری | Rock Bolt |
| ۴- قاب فولادی       | Rib Frame |

#### ۴-۵-۱- بتن پاشی (شاتکریت) Shotcrete

بتن پاشی مهمترین و متداولترین جزء سیستم نگهدارنده اولیه در تونلها محسوب می شود. طبق تعریف شاتکریت یا بتن پاشیده را می توان ملاتی دانست که از طریق یک شیلنگ تحت فشار هوا با سرعت زیاد روی سطح مورد نظر پاشیده می شود. بتن پاشی از هوازدگی توده خاک و سنگ و ریزش موضعی جلوگیری می کند، همچنین به همراه شبکه تور فولادی به دلیل عملکرد پیوسته و یکنواخت از جابجایی زیاد توده خاک و سنگ جلوگیری کرده و باعث استفاده خوب از قابلیت و ظرفیت باربری توده خاک و سنگ می گردد. همچنین به عنوان عضو سازه ای یکنواخت و گسترده باربری سازه ای نیز خواهد داشت [۲].

در حال حاضر بتن پاشیده جزء لاینفک و شناخته شده در ساخت سازه ها و فضاهای زیرزمینی می باشد و به طور کلی به علت عدم نیاز به قالب بندی و از سوی دیگر تجهیزات مختصرتر و قابل حمل تر نسبت به بتن معمولی ارجحیت دارد. سطح مورد نظر هر شکل و اندازه ای که داشته باشد شاتکریت قابل استفاده خواهد بود و این درحالی است که روی اکثر مواد به خوبی می چسبد [۱۴].

از کاربردهای شاتکریت در کارهای زیرزمینی و حفاری تونل ها می توان به نگهداری موقت، دائمی، تعمیراتی و مکمل اشاره کرد.



همچنین به عنوان پوشش حفاظتی برای سطح حفاری آسیب پذیر در مقابل هوا (هوازدگی) و آب بندی برای کنترل نشت آب در محل هایی با دبی و فشار کم کاربرد دارد. دو روش اجرا برای شاتکریت وجود دارد:

روش تر WET-MIX PROCESS و روش اجرای خشک DRY-MIX PROCERSS در طراحی سیستم نگهداری، سه نوع فشار وارد بر تکیه گاه در نظر گرفته میشود که عبارتند از:

فشار سست شدگی ( Loosening Pressure )

فشار آماسی یا تورمی ( Swelling Pressure )

فشار خالص زمین ( Genuine Ground Pressure )

فشار سست شدگی یک فشار موضعی ناشی از وزن مواد در محل تاج قوس تونل است که بر اثر شکستگی روی پوشش تکیه می کند این تنش بویژه در سنگهای درزه دار به طور گسترده وجود دارد. فشار تورمی در نتیجه افزایش مقدار رطوبت در زمینهایی حاصل میشود که دارای مواد منبسط شونده مانند کانی های رسی هستند.

در صورتیکه قبل از خاتمه جابجایی های شعاعی قطعات سنگ در تونل، پوشش اجرا شود، فشاری از طرف سنگهای فراگیر آن بر شاتکریت وارد خواهد شد، بنابراین فشار زمین ممکن است باعث پوسته شدن دیواره گردد. چنانچه از شاتکریت به طور صحیحی استفاده شود، علاوه بر اینکه بر تنش های زمین فائق می آید می تواند به عنوان پوشش محافظ، از نفوذ آب یا هوا و تخریب سنگ جلوگیری نماید [۷].

#### ۴-۵-۲- شبکه تور فولادی Wire Mesh

به دلیل مقاومت کم خمشی و کششی بتن در سیستم بتن پاشی، شبکه تور فولادی به عنوان باربر نیروهای کششی و لنگر خمشی در بتن پاشی و همچنین حایل گسترده در جهت توزیع بارهای اعمال شده عمل می کند. [۲]

تور سیمی یا فولادی که جهت نگهداری قطعات کوچک سنگ یا به عنوان مسطح کننده شاتکریت مورد استفاده قرار می گیرد، معمولاً در دو نوع درسازه های زیرزمینی استفاده می گردد. توری بافته یا توری سرنندی و توری جوش شده.

توری سرنندی برای مسلح کردن شاتکریت مناسب نیست. زیرا دانه های بتن از توری بافته شده به راحتی عبور نمی کنند. در مقابل، توری جوش شده عموماً برای مسلح کردن بتن مورد استفاده قرار می گیرد. توری جوش شده عموماً توسط واشر و مهره اضافی که روی سنگ دوزها قرار میدهند، به بدنه سنگ متصل می گردد. در فواصل بین سنگ دوزها نیز بر حسب لزوم توری توسط میله های کوتاه که به سطح سازه نصب می گردند، به بدنه سازه متصل میشود. فاصله زیاد توری از سطح سنگ موجب هدر رفتن بتن می گردد. زیرا باید آنقدر بتن پاشی ادامه یابد تا توری را کاملاً بپوشاند. به همین خاطر فواصل بین سنگ دوزها را نیز با میله های کوتاه به سطح سنگ متصل می کنند تا فاصله کم شود.

توری ها در مقابل پرتاب قطعات سنگ ناشی از آتشکاری به آسانی آسیب می بینند، بنابراین نصب آن را باید تا زمانی که آتشکاری تا فاصله مناسب از کار دور نشده به تاخیر انداخت. توری های جوش شده نسبت به توری های سرنندی از این امتیاز برخوردارند که در اثر آسیب دیدگی از هم باز نمی شوند [۸].

#### ۴-۵-۳- پیچ سنگ (راک بولت) Rock Bolt

پیچ سنگ یا میل مهاری ها از نظر عملی به دو دسته تقسیم میشوند: مهاری های تنیده و مهاری های غیر تنیده، که هر دو دسته برحسب نوع نصب به دو دسته درگیر در یک نقطه و درگیر در طول تقسیم میشوند.

درگیر کردن مهاری ها به منظور انتقال نیرو به زمین، به سه طریق امکان پذیر است: به طریق مکانیکی، بوسیله ملات واسطه (سیمان یا صمغ مصنوعی) و بوسیله ریشه های بازشو.

بیشترین کاربرد پیچ سنگ ها، همراه با ملات تزریق شده می باشد که مبتنی بر نیروهای چسبندگی ملات واسطه با مهارى و دیواره های چال بوده و از مزایای آن، ارزانی نسبی آن و حفاظت مهارى در برابر خوردگی می باشد.

پیچ سنگ ها به دلیل طرح، اجرا و حفاظت ساده و هزینه نسبتاً پایین آنها کاربرد وسیعی پیدا کرده اند. پیچ سنگها ضمن تامین ایمنى كافی در مقابل ریزش، فضای اضافی اشغال نمی کنند. چسبندگی بین دوغاب و دیواره چال که پیچ سنگ در آن قرار گرفته است به مقاومت فشاری سنگ و دوغاب، زبری جداره چال و به وسعت سطح تماس بستگی دارد. طبق نظریات لیتل جان و بروس: چسبندگی نهایی سیمان و سنگ را میتوان تقریباً "۰/۱ مقاومت فشاری سنگ یا دوغاب سخت شده در نظر گرفت. برای سنگ های ضعیف و هوازده این مقدار ۲۰ الی ۳۰ درصد مقاومت فشاری سنگ می باشد. عواملی که باعث کاهش تاثیر پیچ سنگ می شوند، عبارتند از: عدم تناسب قطر چال - که باعث میشود کشش کافی در پیچ سنگ ایجاد نشود - وجود سنگ های سست در نقطه درگیری - بخصوص برای پیچ سنگها با درگیری مکانیکی مانند مهارى با پوسته باز شو، که در این سنگ ها بهتر است از تزریق استفاده شود - خزش، زنگ زدگی و تخریب ساختمانی میل مهارى و ارتعاشات انفجاری [۸] و [۱۴].

#### ۴-۵-۴- قاب فولادی Rib Frame

قابهای فولادی از پروفیل‌های فولادی ساخته شده و به عنوان بخشی از سیستم نگهدارنده در مناطقی بکار می روند که زمین بسیار سست و ریزشی بوده و سایر سیستمهای نگهدارنده نتواند پایداری کافی تونل را تامین نمایند. این قابها در کارگاه و در ابعاد مختلف قابل ساخت بوده و به عنوان عامل مسلح کننده بتن بکار می روند [۲].

از انواع این قابها می توان به قابهای فولادی صلب و قابهای مفصلی (مول) و قابهای کشویی اشاره کرد [۱۳].

#### ۴-۶- برآورد سیستم نگهداری اولیه بر اساس روشهای تجربی

در این بخش به تخمین سیستم نگهداری اولیه بر اساس روش های RMR و Q پرداخته می شود:

#### ۴-۶-۱- روش RMR - بنیابوسی ۱۹۷۶-۱۹۸۴

در روش RMR ، بنیابوسی طی جدولی برای تونل به شکل نعل اسبی به پهنای ۱۰ متر سیستم نگهداری اولیه را پیشنهاد کرده است. این جدول در قسمت پیوست موجود می باشد. به دلیل اینکه پهنای تونل انتقال آب کمتر از ۱۰ متر است، در طرح سیستم نگهداری پیشنهادی این جدول تعدیل اعمال می گردد.

از آنجا که تمامی ۲۳ قسمت مسیر تونل انتقال آب خدنگستان، در طبقه بندی مهندسی سنگ RMR بین ۲۰-۴۰ دارد، در رده سنگهای ضعیف قرار می گیرد. بنابراین در جدول بنیابوسی برای تعیین سیستم نگهداری در گروه  $RMR=20-40$  قرار گرفته و طبق توصیه این جدول سیستم نگهداری شامل موارد زیر است:

۱- پیچ سنگ مهاری (راک بولت) از فولاد به قطر 20 mm و به طول ۴-۵ متر در سقف و دیواره ها به همراه تور سیمی.

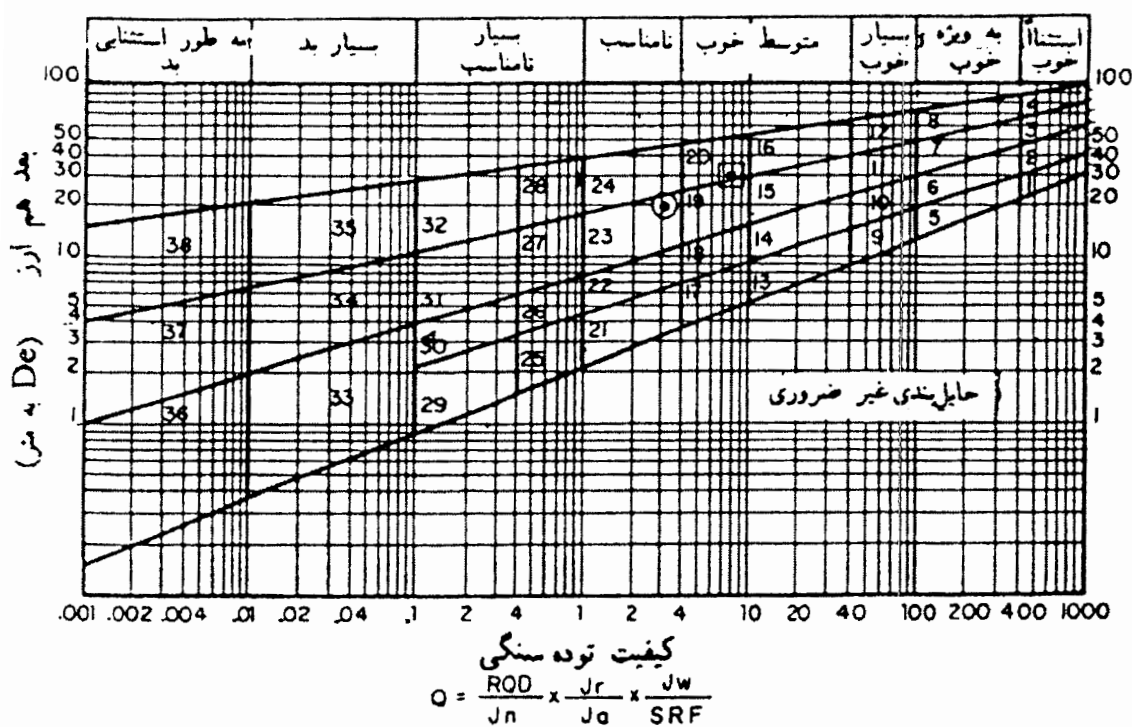
۲- بتن پاشی (شاتکریت) به همراه تور فولادی (مش) به ضخامت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیمتر در سقف و ۱۰۰ میلیمتر در دیواره ها.

۳- پایه های کناری (قاب فلزی) سبک با فواصل ۱/۵ متر در محلهایی که لازم است، اجرا می

شود.

#### ۴-۶-۲- روش Q برای تعیین سیستم نگهداری اولیه

در روش Q، از نمودار مربوطه استفاده می گردد که در شکل (۴-۱) آمده است. به عنوان نمونه برای قسمت اول مسیر از کیلومتر ۰+۰۰۰ الی ۰+۰۵۰ با شاخص کیفی سنگ  $Q=0.11$  که در رده خیلی ضعیف قرار می گیرد، تونل دارای  $ESR=1.6$  می باشد، (طبق جدول مربوطه (پیوست) که برای تونل های آبرسانی، تونل های معدنی دائم و نیروگاه های آبی، مقدار ضریب نگهداری تونل  $ESR=1.6$  می باشد). بنابراین این قسمت در گروه ۲۹ قرار میگیرد که  $(Q=0.1-0.4)$  و  $(Jr/Ja > 0.25)$  و  $(Span/ESR = 1-3)$  بوده، بنابراین طبق جدول مربوطه سیستم نگهداری اولیه  $B(Utg)1m+S(mr)5cm$  یعنی راک بولت غیر کششی به فواصل ۱ متر  $(1 \times 1)$  و شاتکریت به همراه توری فلزی (مش) به ضخامت ۵ سانتیمتر می باشد. در جدول ۳-۴ برای بیست و سه قسمت مختلف مسیر تونل انتقال آب خدنگستان، براساس روش Q، تعیین سیستم نگهداری اولیه شده است.



شکل ۴-۱- تخمین سیستم نگهداری موقت به کمک روش Q

جدول ۴-۳- تعیین سیستم نگهداری بر اساس شاخص کیفی سنگ Q

قسمت	از	تا	Q	گروه	نوع سیستم نگهداری
۱	۰+۰۰۰	۰+۰۵۰	۰/۱۱	۲۹	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm
۲	۰+۰۵۰	۰+۲۵۰	۰/۳۳	۲۹	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm
۳	۰+۲۵۰	۰+۸۹۰	۳/۱۱۱	۲۱	Bolt (utg) 1 m
۴	۰+۸۹۰	۱+۰۱۰	۰/۲۱۹	۲۹	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm
۵	۱+۰۱۰	۱+۶۹۰	۳/۱۱۱	۲۱	Bolt (utg) 1 m
۶	۱+۶۹۰	۲+۳۱۵	۰/۴۴۴	۲۵	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm
۷	۲+۳۱۵	۲+۵۴۵	۱/۵۵۶	۲۱	Bolt (utg) 1 m
۸	۲+۵۴۵	۲+۷۴۵	۰/۳۳۳	۲۹	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm
۹	۲+۷۴۵	۳+۷۷۰	۳/۱۱۱	۲۱	Bolt (utg) 1 m
۱۰	۳+۷۷۰	۳+۸۷۰	۰/۱۸۸	۲۹	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm
۱۱	۳+۸۷۰	۴+۸۳۰	۱/۷۷۸	۲۱	Bolt (utg) 1 m
۱۲	۴+۸۳۰	۵+۰۳۰	۰/۲۷۸	۲۹	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm
۱۳	۵+۰۳۰	۶+۱۰۰	۱/۷۷۸	۲۱	Bolt (utg) 1 m
۱۴	۶+۱۰۰	۶+۳۰۰	۰/۲۲۲	۲۹	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm
۱۵	۶+۳۰۰	۶+۵۹۰	۱/۹۲۶	۲۱	Bolt (utg) 1 m
۱۶	۶+۵۹۰	۶+۸۹۰	۰/۲۵	۲۹	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm
۱۷	۶+۸۹۰	۸+۲۱۰	۱/۷۷۸	۲۱	Bolt (utg) 1 m
۱۸	۸+۲۱۰	۸+۴۱۰	۰/۲۲۲	۲۹	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm
۱۹	۸+۴۱۰	۹+۲۶۰	۰/۲۵	۲۹	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm
۲۰	۹+۲۶۰	۱۰+۲۸۵	۱/۷۷۸	۲۱	Bolt (utg) 1 m
۲۱	۱۰+۲۸۵	۱۰+۴۸۵	۰/۲۹۶	۲۹	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm
۲۲	۱۰+۴۸۵	۱۰+۸۸۵	۱/۰۳۷	۲۱	Bolt (utg) 1 m
۲۳	۱۰+۸۸۵	۱۱+۲۶۶	۰/۳۹۵	۲۹	Bolt (utg) 1 m + shot (mr) 5 cm

utg : پیچ سنگ غیر کششی با تزریق دوغاب

mr : شاتکریت تقویت شده با توری فلزی

shot : بتن پاشی یا شاتکریت

## فصل پنجم

برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس

تحلیل اندرکنش سنگ – سیستم نگهداری

در این فصل، با توجه به یکسری فرضیات و فرمولهای موجود، منحنی مشخصه زمین (منحنی واکنش توده سنگ میزبان) Ground Reaction Curve یا منحنی GRC و منحنی مشخصه سیستم نگهداری در دستگاه فشار سیستم نگهداری - تغییر شکل شعاعی سنگهای اطراف تونل، رسم می شود.

نقطه تلاقی منحنی مشخصه سیستم نگهداری و منحنی مشخصه زمین، نقطه عملکردی است که بیان می کند به ازای مقدار مشخصی از تحمل بار سیستم نگهداری، تغییر شکل شعاعی سنگهای اطراف تونل چقدر می باشد. بنابراین با تحلیل چند نوع سیستم نگهداری، می توان برآوردی از سیستم نگهداری موقت تونل انجام داد.

## ۵-۲- فرضیات اساسی در رسم منحنی مشخصه زمین

- هندسه تونل: تونل، با مقطع دایره به شعاع  $r_i$  در نظر گرفته می شود. به دلیل طول زیاد تونل، می توان مسئله را به صورت دو بعدی و شرایط کرنش صفحه ای در نظر گرفت.

- میدان تنش برجا: فرض می کنیم تنش های افقی و قائم با هم برابر و مساوی  $P_0$  باشد.

(k=1).

- فشار سیستم نگهداری: فرض می شود که سیستم نگهداری نصب شده، فشار  $P_i$  را به صورت شعاعی و یکنواخت به جدار تونل اعمال می کند.

- خصوصیات توده سنگ اصلی: توده سنگ اصلی الاستیک فرض شده و معیار شکست این توده سنگی با رابطه (۵-۱) بیان می شود [۱۱]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_3^2)^{0.5} \quad (5-1)$$

که در این رابطه

$s$ : تنش اصلی ماکزیمم در لحظه شکست



s3 : تنش اصلی مینیمم

$\sigma_c$  : مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر

s و m : مقادیر ثابتی که به خواص توده سنگ (جنس سنگ، هوازدگی، فاصله داری درزه ها و ... ) بستگی دارد.

- خصوصیات توده سنگ شکسته: فرض می شود که توده سنگ شکسته که تونل را در بر گرفته است، پلاستیک کامل بوده و از معیار شکست زیر پیروی می کند [۱۱]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (mr \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + sr \cdot \sigma_c^2)^{0.5} \quad (5-2)$$

که mr و sr مقادیر مربوط به سنگ شکسته هستند.

- کرنش های حجمی: در منطقه الاستیک، کرنش های حجمی با ثوابت الاستیک E و  $\nu$  مشخص می شوند.

- رفتار وابسته به زمان: فرض می شود که توده سنگهای اصلی و شکسته، هیچکدام رفتار وابسته به زمان از خود نشان نمی دهند.

- گسترش منطقه پلاستیک: فرض می شود که منطقه پلاستیک تا شعاع  $r_e$  گسترش یابد که این گسترش به فشار  $P_o$  ، فشار سیستم نگهداری  $P_i$  و خصوصیات مصالح سنگی الاستیک و پلاستیک بستگی دارد.

- تقارن شعاعی: در تمامی این بحث ها، مسئله به صورت متقارن حول محور تونل تحلیل می شود. اگر وزن سنگ شکسته در تحلیل منظور شود، این تقارن ساده کننده از بین خواهد رفت. از آنجا که وزن سنگ شکسته اطراف تونل در طراحی سیستم نگهداری بسیار مهم است، بعد از اتمام تحلیل اصلی، اثر وزن را به طور تقریبی منظور می کنند [۱۱] و [18].

### ۵-۳- مراحل رسم منحنی مشخصه زمین

اطلاعات مورد نیاز عبارتند از:

$\sigma_c$  : مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر

$s$  و  $m$  : ثابت های توده سنگ اصلی

$E$  : مدول الاستیسیته توده سنگ اصلی

$\nu$  : ضریب پواسون توده سنگ اصلی

$m_r$  و  $s_r$  : ثابت های توده سنگ شکسته

$\gamma_r$  : وزن مخصوص توده سنگ شکسته

$P_o$  : اندازه تنش درجا

$r_i$  : شعاع تونل

$P_i$  : فشار داخلی سیستم نگهداری به جدار تونل

ابتدا باید سه پارامتر  $M$  و  $D$  و  $N$  را محاسبه کرد [۱۱] و [20]:

$$M = 0.5 \left[ \left( \frac{m}{4} \right)^2 + \left( \frac{m_p}{\sigma_c} \right) + s \right]^{0.5} - (m/8) \quad (۳-۵)$$

$$D = \frac{-m}{m + 4 \left[ \left( \frac{m}{\sigma_c} \right) \cdot (P_o - M \sigma_c) + s \right]^{0.5}} \quad (۴-۵)$$

$$N = 2 \left[ \frac{P_o - M \sigma_c}{m_r \cdot \sigma_c} + \frac{s_r}{m_r^2} \right] \quad (۵-۵)$$

فشار بحرانی از رابطه زیر به دست می آید:

$$P_{icr} = P_o - M \sigma_c \quad (۵-۵)$$

حال برای رسم نقاط منحنی به ازای هر  $P_i$ ، تغییر شکل شعاعی  $U_i$  محاسبه می شود. بدین صورت که به ازای  $P_i$  بیشتر از  $P_{icr}$  تغییر شکل اطراف تونل الاستیک است. در این حالت  $U_i$  برابر است با :

$$U_i = r_i \cdot \frac{(1+\nu)}{E} (P_o - P_i) \quad (7-5)$$

و برای  $P_i$  کوچکتر از  $P_{icr}$  شکستگی پلاستیک در اطراف تونل رخ می دهد. در این حالت  $U_i$  عبارتست از :

$$\frac{U_e}{r_e} = \frac{(1+\nu)}{E} M.\sigma_c \quad (8-5)$$

$$\frac{r_e}{r_i} = \exp \left[ N - 2 \left( \frac{P_i}{m r.\sigma_c} + \frac{s r}{m r^2} \right) \right] \quad (9-5)$$

$$r_e / r_i > \sqrt{3} \quad \text{اگر}$$

$$R = 1.1 D \quad (10-5)$$

$$r_e / r_i < \sqrt{3} \quad \text{اگر}$$

$$R = 2D \cdot \ln (r_e / r_i) \quad (11-5)$$

$$e_{av} = \frac{2(U_e/r_e) \cdot (r_e/r_i)^2}{[(r_e/r_i)^2 - 1] \cdot (1 + 1/R)} \quad (12-5)$$

$$A = [2 (U_e/r_e) - e_{av}] \cdot [r_e/r_i]^2 \quad (13-5)$$

$$U_i = r_i \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1 - e_{av}}{1 + A} \right) \right] \quad (14-5)$$

$r_e$  : شعاع منطقه الاستیک و  $U_e$  جابجایی شعاعی در مرز الاستیک است [۱۱] و [20].

#### ۵-۴- منحنی مشخصه سیستم نگهداری

این منحنی با فرض اینکه صلبیت سیستم نگهداری ثابت است، خطی فرض می شود و حال آنکه در عمل اینطور نیست. در شکل زیر خط سیستم نگهداری رسم شده است. در این شکل:

$U_{io}$ : تغییر شکل کلی اولیه تونل قبل از نصب سیستم نگهداری

$U_{sm}$ : حداکثر تغییر شکل الاستیک سیستم نگهداری

$P_{sm}$ : حداکثر فشار ناشی از سیستم نگهداری

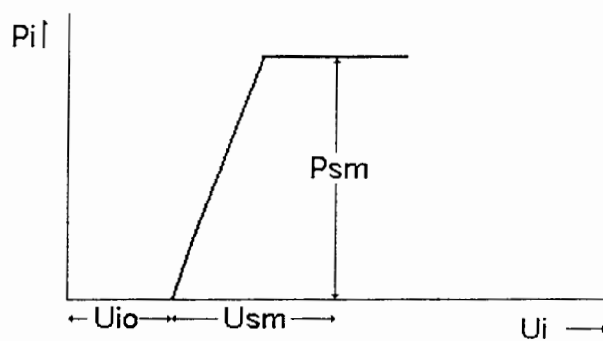
در این حالت تغییر شکل نهایی تونل برابر است با [۱۱]:

$$U_i = U_{io} + U_{ie} \quad (۵-۱۵)$$

که  $U_{ie}$  تغییر شکل الاستیک سیستم نگهداری است و برابر است با [۱۱]:

$$U_{ie} = (P_{sm}.r_i) / K_c \quad (۵-۱۶)$$

که در آن  $r_i$  شعاع تونل و  $K_c$  سختی سیستم نگهداری است.



شکل ۵-۱- منحنی مشخصه سیستم نگهداری [۱۱]

#### ۵-۴-۱- محاسبه تغییر شکل اولیه قبل از نصب سیستم نگهداری

تعیین میزان همگرایی تونل قبل از نصب سیستم نگهداری از اهمیت زیادی برخوردار است. همگرایی تابع سرعت پیشروی جبهه کار و توقف های احتمالی در کار بوده و سرعت همگرایی نیز به خواص زمین بستگی دارد. می توان گفت تغییر شکل شعاعی تونل صرفه نظر از پدیده خزش، تابعی از فاصله جبهه کار پیشروی تا سیستم نگهداری و سرعت پیشروی می باشد.

طبق نظریه چانگ (۱۹۹۴)، همگرایی  $U(x)$  در مقطعی که به فاصله  $x$  از سینه کار قرار دارد، برابر است با [16]:

$$U(x) = U_{tot} \cdot [1 - (1 - \frac{U_{io}}{U_{tot}}) \cdot (1 + 1.19 \frac{x}{R_p})^2] \quad (۱۷-۵)$$

که  $U_i$  میزان همگرایی در سینه کار پیشروی است که بلافاصله بعد از عملیات حفاری رخ می دهد و  $U_{total}$  همگرایی برای مقطعی است که فاصله ای دور از سینه کار پیشروی دارد.

بر اساس گفته پانت و گونت،  $U_{io}/U_{tot}$  مقداری ثابت و برابر  $0.28$  می باشد. (یعنی ۲۸ درصد کل جابجایی بعد از حفر انجام خواهد شد) [16].

در مورد انتخاب  $U_{io}$  دو نکته را باید در نظر گرفت:

- از آنجا که سرعت اجرای سیستم نگهداری شاتکریت (به همراه تور سیمی) با سرعت پیشروی بیشتری نسبت به اجرای شاتکریت و پیچ سنگ همراه است، مقدار همگرایی اولیه کمتری برای سیستم نگهداری شاتکریت، نسبت به اجرای سیستم نگهداری شاتکریت و پیچ سنگ باید در نظر گرفته شود.

- همگرایی بحرانی  $U_{crit}$ ، مقدار همگرایی است که فشار کلی وسیله نگهداری حداقل خواهد بود. در هنگام نصب سیستم نگهداری باید دقت نمود که رابطه زیر برقرار باشد [16]:

$$U_{io} + U_{sm} < U_{crit} \quad (۱۹-۵)$$

زیرا اگر این رابطه برقرار نباشد، تونل بالقوه ناامن خواهد بود و احتمال ریزش وجود خواهد داشت

[۱۱].

#### ۵-۴-۲- سیستم نگهداری موجود برای شاتکریت

صلبیت سیستم نگهداری از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۱]:

$$K_c = \frac{E_c \cdot [r_i^2 - (r_i - t_c)^2]}{(1 + v_c)[(1 - 2v_c)r_i^2 + (r_i - t_c)^2]} \quad (۱۹-۵)$$

$E_c$  : مدول الاستیسیته بتن

$v_c$  : ضریب پواسون بتن

$t_c$  : ضخامت شاتکریت

وجود تور سیمی نقش مهمی در کنترل و توزیع تنش ها و ترک ها در پوشش ایفا می کند. اما در افزایش صلبیت نقش چندانی ندارد. حداکثر فشار سیستم نگهداری که بوسیله پوشش شاتکریت ایجاد می شود از رابطه زیر بدست می آید [۱۱]:

$$P_{sm} = 0.5 \sigma_c \left[ 1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] \quad (۲۱-۵)$$

که در آن  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک محوری شاتکریت می باشد. [۱۱]

#### ۵-۴-۳- سیستم نگهداری برای پیچ سنگ تزریقی

از آنجا که اثر تزریق برای محاسبه مستقیم خط عکس العمل پیچ سنگ تزریقی بر پایه تحلیل اندرکنش سنگ - سیستم نگهداری ممکن نیست، می توان فرض کرد که تزریق باعث اتصال سنگها به هم و افزایش مقاومت کششی آنها می شود. بنابراین در تحلیل پیچ سنگ تزریقی، با افزایش مقادیر  $m_r$  و  $s_r$  می توان از روابط پیچ سنگ های غیر تزریقی استفاده کرد. این روابط در زیر آمده است:

$$\frac{1}{K_b} = \frac{S_c \cdot St}{r_i} \left[ \frac{4L}{\pi \cdot d_b \cdot E_b} + Q \right] \quad (۲۲-۵)$$

$$P_{sbm} = T_b f / (S_c \cdot St) \quad (۲۳-۵)$$

Kb : صلبیت پیچ سنگ

Sc : فاصله داری محیطی پیچ سنگ ها

St : فاصله داری طولی پیچ سنگ ها

L : طول پیچ سنگ

db : قطر پیچ سنگ

Eb : مدول الاستیسیته پیچ سنگ

Q : ثابت بار - تغییر شکل برای بخش گیرش و راس پیچ سنگ

Psbm : حداکثر فشار سیستم نگهداری پیچ سنگ

Tbf : گسیختگی نهایی حاصل از آزمون بیرون کشی

#### ۵-۴-۴- سیستم نگهداری ترکیبی

اگر دو سیستم پیچ سنگ و شاتکریت با هم ترکیب شود، صلبیت سیستم نگهداری ترکیبی، مساوی جمع صلبیت افزایش سیستم هاست. در سیستم ترکیبی فرض بر این است که دو سیستم به طور همزمان با هم نصب می شوند و واکنش ها نسبت به تغییر شکل تونل به طور همزمان است [۱۱].

$$U_{max1} = (r_i \cdot P_{sm1}) / K1 \quad (24-5)$$

$$U_{max2} = (r_i \cdot P_{sm2}) / K2 \quad (25-5)$$

$$U12 = (r_i \cdot P_i) / (K1+K2) \quad (26-5)$$

K1 : سختی سیستم نگهداری اول

K2 : سختی سیستم نگهداری دوم

Psm1 : حداکثر فشار سیستم نگهداری اول

Psm2 : حداکثر فشار سیستم نگهداری دوم

حال برای وضعیت  $U_{12} < U_{max1} < U_{max2}$  خواهیم داشت:

$$U_i = U_{io} + (P_i \cdot r_i) / (K_1 + K_2) \quad (27-5)$$

و برای وضعیت  $U_{12} > U_{max1} < U_{max2}$  خواهیم داشت:

$$P_{max12} = U_{max1} \cdot (K_1 + K_2) / r_i \quad (28-5)$$

و در مورد وضعیت  $U_{12} > U_{max2} < U_{max1}$  خواهیم داشت:

$$P_{max12} = U_{max2} \cdot (K_1 + K_2) / r_i \quad (29-5)$$

## ۵-۵- تحلیل منحنی عکس العمل سیستم نگهداری بر روی منحنی مشخصه زمین

برای رسم منحنی مشخصه زمین در قسمت های مختلف تونل، طبق فرمولهایی که در بخش های قبلی ارائه شد نیاز به یکسری اطلاعات می باشد که شامل: RMR، مدول الاستیسیته توده سنگ ( $E_m$ )، مقاومت فشاری تک محوری ( $\sigma_c$ )، ضریب پواسون ( $\nu$ )،  $m$  و  $s$  (پارامترهای هوک و براون)، حداکثر روباره، دانسیته (?) و شعاع تونل ( $r_i$ ) هستند. این اطلاعات برای قسمت های مختلف تونل در فصل های قبل آمده اند. در این بخش برای نمونه، منحنی عکس العمل سیستم نگهداری و منحنی مشخصه زمین برای مقطع حداکثر روباره که معادل ۳۵۰ متر و در حوالی متر ۸۰۰ از ورودی تونل می باشد ترسیم شده و سیستم نگهداری مناسب برای این مقطع تعیین شده است. برای قسمت های دیگر تونل انتقال آب، فقط نتیجه تحلیل ها در آخر این فصل ارائه شده است.

جدول ۵-۱- اطلاعات مورد نیاز برای رسم منحنی اندرکنش توده سنگ در مقطع حداکثر روباره.

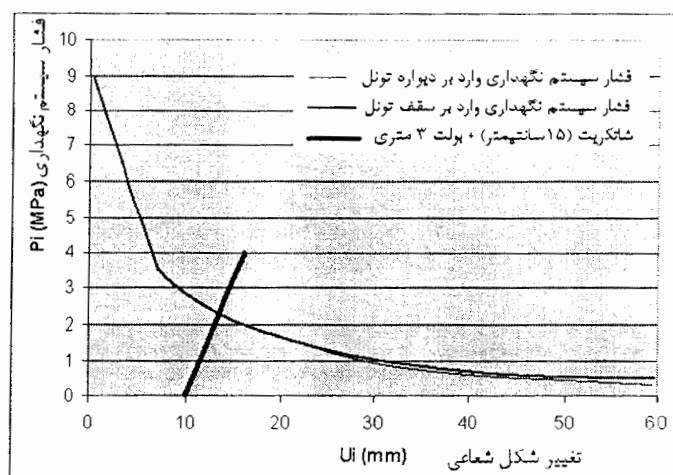
RMR	$E_m$	$\sigma_c$	$\nu$	$m$	$s$	Over bu	?	$r_i$	Part
۳۹	۲/۵	۲/۵	۰/۲	۸	۰/۰۰۶۸	۳۵۰	۲/۷۱	۲/۵	۳



جدول ۲-۵- اطلاعات مورد نیاز بدست آمده با توجه به فرمولها و جدول (۵-۱) برای مقطع حداکثر روباره

GSI	Sr	Mr	Po (Mpa)	M	D	N	Picr
34	0.000653	0.757523	9.27045	1.137114	-0.46792	1.847674	3.3575

در مورد سیستم نگهداری واضح است که علاوه بر پیچ سنگ، شاتکریت نیز لازم است، چرا که علاوه بر وظیفه جلوگیری از ریزش سنگهای خرد شده به داخل تونل و پایداری موقت تا نصب سیستم نگهداری دائمی، سطح حفاری شده را در برابر هوازدگی حفاظت می نماید. از پیچ سنگ ۳ متری با قطر ۲۵ میلیمتر استفاده شده است. منحنی سیستم نگهداری به همراه منحنی عکس العمل زمین برای توده سنگ های مقطع حداکثر روباره (در حوالی متر از ورودی تونل)، مطابق شکل ۲-۵ می باشد:



شکل ۲-۵- منحنی سیستم نگهداری و زمین برای توده سنگ های مقطع حداکثر روباره

با اجرای سیستم نگهداری شاتکریت به ضخامت ۱۵ سانتیمتر و پیچ سنگ با طول ۳ متر و قطر ۲۵ میلیمتر با فاصله داری ۱×۱ متر، در توده سنگ های زون حداکثر روباره (Part 3) و با فرض اینکه تغییر شکل شعاعی اولیه سنگهای اطراف تونل ۱ سانتیمتر باشد، تغییر شکل شعاعی کلی در ۱/۳ سانتیمتری متوقف خواهد شد. در این حالت فشار وارد بر سیستم نگهداری طبق نمودار برابر ۲/۲ مگاپاسکال خواهد بود.

طبق این روش، در قسمت ورودی تونل (تا متر ۲۵۰ متر) با اجرای سیستم نگهداری شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتیمتر و پیچ سنگ ۳ متری با قطر ۲/۵ میلیمتر با فاصله داری ۱/۵×۱/۵ متر و با فرض اینکه تغییر شکل شعاعی اولیه سنگهای اطراف تونل ۰/۷ سانتیمتر باشد، تغییر شکل شعاعی کلی در ۰/۹ سانتیمتری متوقف خواهد شد. لازم به ذکر است بدون اجرای سیستم نگهداری تغییر شکل شعاعی تونل در دیواره در ۲/۳ سانتیمتری و در سقف تونل در ۲/۹ سانتیمتری متوقف خواهد شد.

با اضافه شدن ضخامت روباره در متر ۸۰۰ متری همانگونه که مشاهده شد، ضخامت شاتکریت به ۱۵ سانتیمتر و فاصله داری پیچ سنگ ها به ۱×۱ متر می رسد. در قسمت خروجی، اجرای شاتکریت به ضخامت ۷/۵ سانتیمتر و پیچ سنگ های ۳ متری با فاصله داری ۱/۵×۱/۵ متر توصیه می شود. در این حالت با اجرای این سیستم نگهداری و فرض تغییر شکل شعاعی اولیه ۰/۵ سانتیمتر برای توده سنگ های اطراف تونل، تغییر شکل شعاعی کلی در ۰/۸ سانتیمتری متوقف خواهد شد. در این قسمت بدون اجرای سیستم نگهداری تغییر شکل شعاعی تونل در دیواره در ۰/۹ سانتیمتری و در سقف تونل در ۱/۳ سانتیمتری متوقف خواهد شد.

از آنجا که در رسم منحنی مشخصه زمین و سیستم نگهداری فرضیاتی چون وجود تنش هیدروستاتیک، دایروی بودن مقطع تونل و ... در نظر گرفته شده است، نمی توان زیاد به نتایج این روش تکیه کرد و لذا ضرورت دارد که از روش های مدلسازی عددی استفاده نمود و محدودیت ها و فرضیات را به حداقل رسانید.

## فصل ششم

برآورد سیستم نگهداری موقت

بر اساس روش های عددی

در این فصل پس از بررسی کلیاتی در مورد روشهای عددی برای تحلیل تنش در تونلها، به تشریح نرم افزار UDEC و نحوه مدلسازی با آن پرداخته و در مورد پارامترهای ورودی این نرم افزار و نحوه تعیین برخی از این پارامترها توسط نرم افزار RocLab بحث می شود و سپس برای مسیر تونل تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری می شود.

## ۶-۲- روشهای عددی

اساس روشهای عددی شبیه سازی یک محیط با بینهایت درجه آزادی، توسط محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط می باشد. در این حال اثر نیرو و بارگذاری در این نقاط بررسی شده و پس از تعیین میزان تغییر شکل در این نقاط برای سایر نقاط با روشهای درون یابی و تغییر شکل محاسبه می گردد. در اغلب این مسائل محیط دارای شکل دلخواه می باشد که تحت بارگذاری ثقلی، نیروهای خارجی، تنشهای برجا، تغییرات درجه حرارت، فشار سیال، بیش تنش یافتگی، نیروهای دینامیکی و ... قرار گرفته و برای پیدا کردن تغییر شکلهای از روابط تنش- کرنش استفاده می شود.

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

۱- روشهای محیطی<sup>۱</sup> یا دیفرانسیلی<sup>۲</sup>، توده سنگ را به عناصر ساده هندسی تفکیک می کنند که هر یک ویژگی های خاص خود را دارند و مجموعه این عناصر فرعی، رفتار کلی توده سنگ را بیان می کنند این گروه شامل روشهایی چون: روش عناصر محدود<sup>۳</sup> FEM، روش تفاوت محدود<sup>۴</sup> FDM و روش عناصر مجزا<sup>۵</sup> DEM می باشد.

<sup>۱</sup> Domain

<sup>۲</sup> Differential

<sup>۳</sup> Finite Element Method

<sup>۴</sup> Finite Difference Method

<sup>۵</sup> Distinct Element Method

۲- روشهای مرزی<sup>۶</sup> یا انتگرالی<sup>۷</sup>، فقط مرز خارجی حفریات زیرزمینی را به عناصر مجزایی تقسیم می کنند و بخش درونی توده سنگ را به عنوان یک محیط نامحدود در نظر می گیرند. از متداولترین این روشها، روش عناصر مرزی<sup>۸</sup> BEM می باشد [۱۰].

## ۶-۲-۱- روش عناصر محدود (FEM)

اساس روش عناصر محدود تقسیم مسئله به یکسری زیر ناحیه کوچک به نام المان با شکل های مختلف از قبیل سه ضلعی و چهار ضلعی برای مسائل دو بعدی و چهار و شش وجهی برای مسائل سه بعدی است. به منظور فرموله کردن جابجایی، توابعی که تعریف کننده مولفه های جابجایی در هر نقطه از المان و همچنین در نقاط گره ای انتخاب می گردند، سپس با استفاده از روابط کرنش جابجایی، کرنش ها محاسبه می شوند. در روش عناصر محدود فرض بر این است که اثر نیروهای داخلی بین لبه های المان مجاور به وسیله عکس العمل های آنها در نقاط گره ای بیان می شوند. این امر نیازمند تعیین معادلاتی برای نیروهای گره ای است. به طوری که این معادلات استاتیکی، نیروهای عمل کننده بین المانها در طول لبه های مجاور می باشند. یکی از معایب این روش آن است که تلاش قابل توجهی جهت تهیه داده های ورودی برای حل مسائل مختلف لازم است. این روش قادر به مدلسازی مسئله به بهترین شکل نمی باشد. علت این امر تعیین یک مرز اختیاری برای مسئله می باشد که در نتیجه یک مسئله نامتناهی باید به صورت یک مسئله متناهی مدل شود و این امر باعث ایجاد خطا در نتایج و محاسبات می شود. با وجود این معایب، روش عناصر محدود در مهندسی سنگ بسیار مورد استفاده قرار می گیرد زیرا در شرایط متفاوت از قبیل بارگذاری های مختلف، حفاری های مرحله به مرحله، نصب نگهدارنده ها، مسائل خطی و غیر خطی به خوبی کاربرد داشته و قابل انعطاف است [۱].

<sup>۶</sup> Boundary

<sup>۷</sup> Integral

<sup>۸</sup> Boundary Element Method

#### ۶-۲-۲- روش عناصر مرزی (BEM)

این روش نیز مانند روش عناصر محدود از عمومیت و شهرت خاصی برخوردار است. البته فهم تئوری آن مانند عناصر محدود ساده نیست و نیاز به درک پیچیدگی های ریاضی با سطح بالا دارد. در این روش فقط مرز محیط مورد نظر مثلاً "توده سنگ به اجزای کوچکتری تقسیم می شود. بنابراین در مسایل دو بعدی این اجزا به صورت خطی در مرز محیط می باشند. در حالت سه بعدی المانهای سطحی در مرز مسئله تعریف می شود. فراهم کردن داده های مورد نیاز در این روش نسبتاً ساده است و در مواردی که تغییر خواص مصالح وجود دارد، بایستی سطح جدا کننده مواد را تعریف نمود. این روش معمولاً برای مصالح با رفتار خطی و محیط های با یک نوع ماده کاربرد دارد. در این روش واکنش المانها نسبت به شرایط بارگذاری خارجی محاسبه می شود و تحلیل رفتار المانهای مرزی بر اساس معادلات دیفرانسیل جزئی شبیه سازی و تحلیل می شود و اگر مقادیر تنش ها و تغییر شکل ها را در داخل محیط مورد نظر خواسته باشیم، با انتگرال گیری از معادلات دیفرانسیل جزئی می توان آنها را محاسبه نمود. از مزایای روش این است که نیازی به کامپیوترهای قوی با حافظه بالا ندارد [۱].

#### ۶-۲-۳- روش های تفاوت محدود (FDM) و عناصر مجزا (DEM)

روش تفاوتهای محدود در مسائل مختلف مهندسی کاربرد زیادی دارد. از آنجا که با این روش می توان تغییر مکانها و کرنش های بزرگ توده سنگ را مدل کرد، لذا کاربرد آن در مهندسی مکانیک سنگ و تونلسازی، عمومیت دارد. از سوی دیگر، مبانی دو روش تفاوت محدود و عناصر مجزا، شبیه به هم است و به همین جهت، در بسیاری موارد آنها را با هم مطالعه می کنند. در روش تفاوت های محدود، اصولاً "محیط را پیوسته در نظر می گیرند، اما می توان وجود چند سطح ناپیوستگی را نیز مدلسازی کرد.

در هر دو روش تفاوت های محدود و عناصر مجزا، مسئله اصلی وضعیت تنش و تغییر مکان در بلوکهای تغییر شکل پذیر است که از طریق یک سطح قابل تغییر شکل، با یکدیگر بر هم کنش دارند. در روش تفاوت های محدود، توده مورد مطالعه را به تعدادی منطقه چهار گوش تقسیم میکنند. تعداد و شکل این مناطق دلخواه است. با توجه به معادلات حرکت در مورد هر قلمرو معین، معادلات تفاوت نوشته می شود. در مرحله بعد، بخشی از توده سنگ در نقاط موسوم به گره، از سایر مناطق مجزا می شود، سپس معادلات حرکت گره ها برای تمام مناطق نوشته می شود. تئوری واگرایی گوس مبنای روش محاسبه نیروهای گره ها را تشکیل می دهد [۱۰].

### ۳-۶- نرم افزار UDEC

نرم افزار UDEC ( Universal Distinct Element Code ) ، یک برنامه تحلیل عددی دو بعدی است که بر مبنای روش المانهای مجزا برای تحلیل مکانیک سنگی محیط های ناپیوسته تهیه شده است. این نرم افزار واکنش یک محیط ناپیوسته (به عنوان مثال سنگ تکتونیزه و شدیداً "درزه دار") را در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی شبیه سازی می کند. این نرم افزار محیط سنگی را به عنوان مجموعه ای از بلوکهای مجزا تعریف می کند که ناپیوستگی ها (مثل درزه ها) به عنوان شرایط مرزی بین بلوکی در آنها عمل می کنند و جابجاییهای برشی در امتداد این ناپیوستگی ها و نیز چرخش بلوک ها می تواند انجام گیرد. در این نرم افزار امکان تعریف بلوک ها به صورت صلب یا تغییر شکل پذیر وجود دارد. بلوک های تغییر شکل پذیر به شبکه ای از المان های با تفاوت محدود تقسیم بندی شده و هر المان با رفتار تنش- کرنش خطی یا غیر خطی از پیش تعیین شده ای عمل می کند. حرکت نسبی ناپیوستگی ها نیز با روابط خطی و یا غیر خطی نیرو- جابجایی در امتداد عمودی یا برشی ناپیوستگی ها پوشش داده می شود. نرم افزار UDEC دارای چند مدل رفتاری برای مواد دست نخورده و ناپیوستگی ها می باشد که مدلسازی ناپیوستگی ها را با شرایط موجود زمین شناسی وفق می دهد.

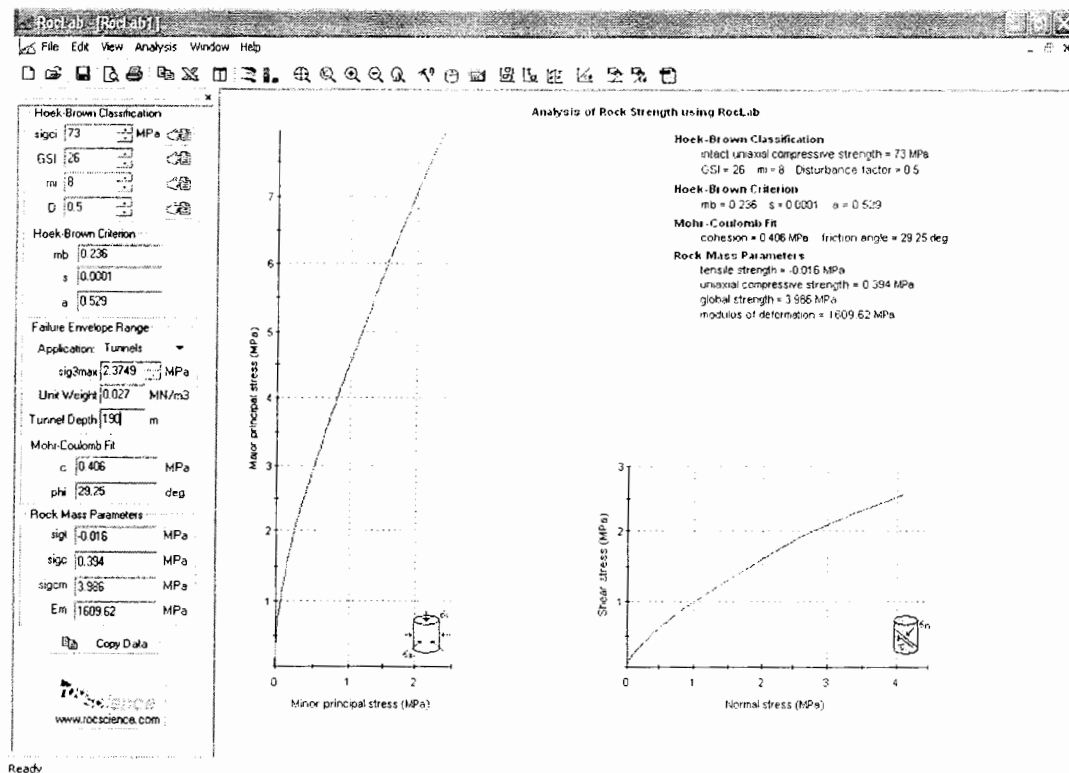
UDEC بر اساس محاسبات لاگرانژین عمل می کند که برای تغییر شکل ها و جابجاییهای بزرگ مورد استفاده قرار می گیرد. این نرم افزار با سرعت محاسبه بالا برای مدل هایی با چند هزار بلوک طراحی شده است و حل مسائل در آن با پیشرفت در پله های زمانی صورت می گیرد. با توجه به اینکه UDEC با پیش رفتن بصورت پله های زمانی معادلات تعادل نیرو و گشتاور را حل می نماید، در هر مرحله قبل از شروع مرحله بعدی نیروهای نامتعادل وارد بر سازه را محاسبه می نماید و حل مسئله را با اعمال این نیروها ادامه می دهد، یعنی در طول حل یک مدل نیروهای نامتعادل کننده به سمت صفر سوق داده می شود. وجود این قابلیت در UDEC امکان بررسی مسئله را در فازهای زمانی مختلف امکان پذیر می سازد و می توان مراحل مختلف اجرای یک طرح را شبیه سازی کرد [21].

شرایط ساختاری و زمین شناسی و ناپیوستگی های موجود در منطقه، در تطابق آن با اصول کلی عناصر مجزا، دلیل اصلی انتخاب نرم افزار UDEC در این تحقیق می باشد.

### ۶-۳-۱- تعیین پارامترهای ورودی نرم افزار

بدلیل تاثیر پذیری زیاد نرم افزار از پارامترها و اطلاعات ورودی، در انتخاب و تخمین این پارامترها دقت خاصی باید مبذول گردد. برخی از این پارامترهای ورودی مستقیماً در منطقه و یا آزمایشگاه قابل اندازه گیری می باشند، مانند: مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته ماده سنگ بکر و یا پارامترهای مربوط به ناپیوستگی ها مثل شیب و امتداد درزه ها و... که در گزارشات زمین شناسی و مطالعات ژئوتکنیکی پروژه موجود می باشد، اما برخی از پارامترهای ورودی به نرم افزار لازم است که توسط روابط و یا نرم افزارهایی که با استفاده از همین روابط و با دقت بالا کار میکنند، تعیین گردد. یکی از این نرم افزارها که برای تعیین یکسری ویژگیهای توده سنگ مانند مدول الاستیسیته توده سنگ و ... بکار می رود، نرم افزار RocLab می باشد که بر اساس معیار شکست هوک و براون کار می کند و از سری مجموعه نرم افزارهای Rocscience می باشد و در این تحقیق استفاده شده است. محیط این نرم افزار در شکل (۶-۱) نشان داده شده است:





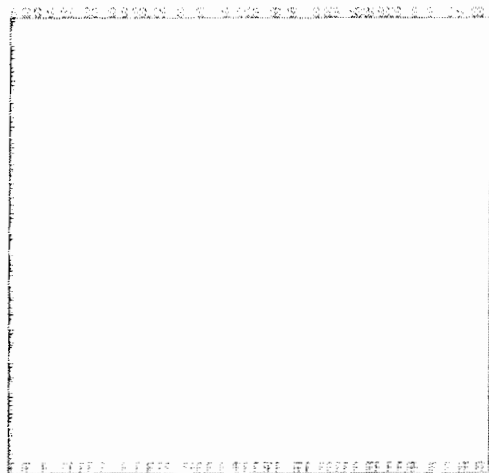
شکل ۶-۱- محیط نرم افزار RocLab

همانگونه که در شکل بالا دیده می شود پارامترهای ورودی نرم افزار RocLab عبارتند از :

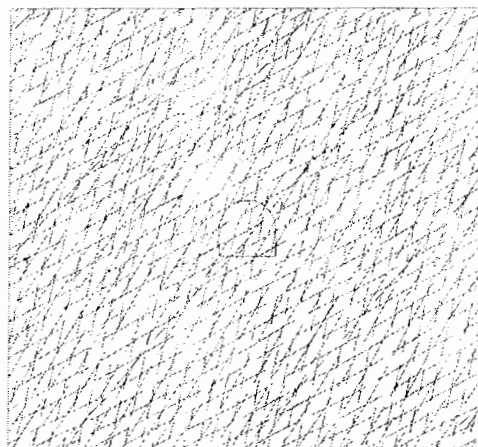
مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (sigci)، شاخص مقاومت زمین شناختی (GSI)، ضریب هوک و براون برای سنگ بکر (mi)، ضریب مربوط به نحوه حفاری تونل (D)، وزن مخصوص توده سنگ و عمقی که در آن تونل حفر می شود، می باشد. اما پارامترهای خروجی نرم افزار که در واقع برخی از پارامترهای ورودی نرم افزار UDEC می باشند عبارتند از : ضرایب هوک و براون برای توده سنگ (mb، s و a)، ضرایب معیار موهر - کولمب: مقاومت چسپندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (phi)، مقاومت کششی توده سنگ (sigt)، مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ (sigcm) و مدول الاستیسیته توده سنگ (Em).

### ۶-۳-۲- خصوصیات هندسی مدل

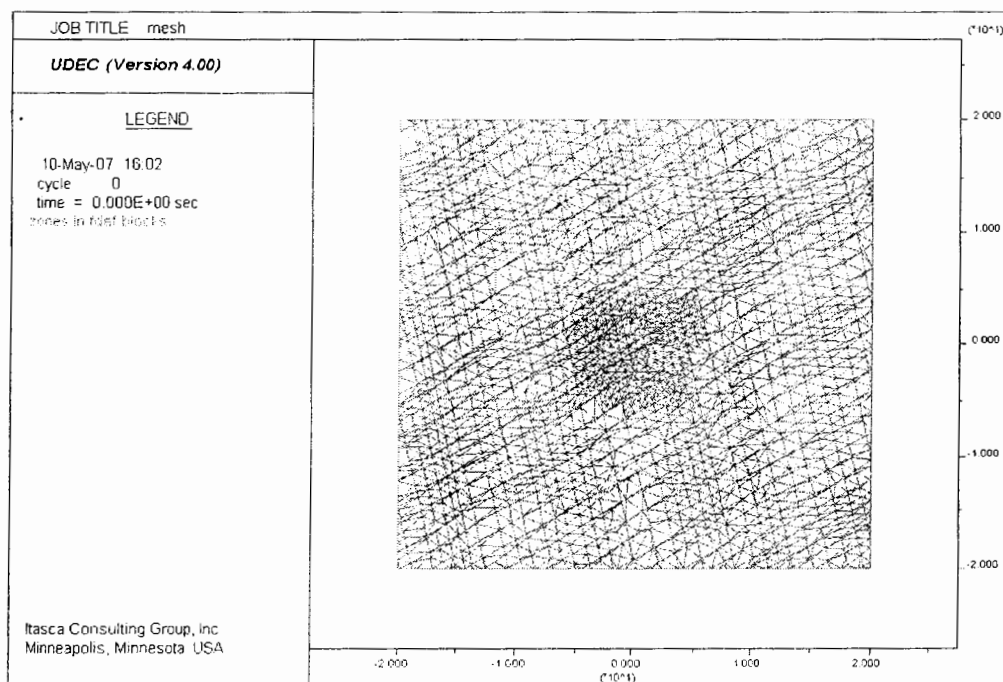
با توجه به هندسه مسیر و طول نسبتاً زیاد تونل نسبت به ابعاد آن، فرض رفتار کرنش صفحه ای، تقریب بسیار مناسبی از جواب واقعی خواهد بود. در شرایط کرنش صفحه ای، تمام کرنش های بوجود آمده در همین صفحه می باشد و در بعد سوم، کرنش برابر صفر است ( $\epsilon_z = 0$ ). به همین دلیل تونل بصورت دو بعدی مدل می شود. شکل های (۶-۲) و (۶-۳) نمونه ای از جزئیات مدلسازی را نشان می دهد. برای حذف اثر شرایط مرزی، ابعاد مدل  $40 \times 40$  متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۶-۲- وضعیت مرزها در اطراف مدل



شکل ۶-۳- وضعیت دسته درزه ها و لایه بندی در مدل



شکل ۴-۶- نمونه ای از مش بندی مورد استفاده در مدل

همانگونه که مشاهده می شود در ناحیه اطراف تونل از مش ریزتری نسبت به سایر نقاط استفاده شده تا حل مدل با دقت و سرعت بالاتری انجام گردد، ضمناً از المانهای مثلثی جهت مش بندی استفاده گردیده است.

### ۳-۳-۶- مدل رفتاری توده سنگ و ناپیوستگی ها

برای مدلسازی رفتار الاستوپلاستیک توده سنگ از مدل رفتاری موهر – کولمب استفاده شده است. این مدل رفتاری با قابلیت مدلسازی اثر فشار همه جانبه توده سنگ روی سطح تسلیم و تغییر شکل های پلاستیک ایجاد شده، مدل مناسبی جهت ارزیابی محسوب می شود. این مدل رفتار سنگ را در بخش الاستیک 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. پارامترهایی که برای تعیین مدل رفتاری موهر

- کولمب برای بلوکها باید تعریف گردد عبارتند از: وزن مخصوص توده سنگ، مدول الاستیسیته توده سنگ، ضریب پواسون، مقاومت چسپندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت کششی و زاویه اتساع. نرم افزار با استفاده از فرمولهای زیر مدول حجمی و برشی را به کمک مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (ν) داده شده به طور اتوماتیک محاسبه می کند [21]:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (۱-۶)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (۲-۶)$$

K : مدول حجمی

G : مدول برشی

مدل رفتاری برای ناپیوستگی ها، مدل تماس صفحه ای کولمب می باشد. پارامترهای لازم برای تعریف این مدل عبارتند از: سختی نرمال درزه ها (jkn)، سختی برشی درزه ها (jks)، مقاومت چسپندگی (jcoh) و زاویه اصطکاک داخلی (jfrie). در واقع سختی نرمال درزه عبارت است از مقاومت عمودی برای جلوگیری از بسته شدن درزه و سختی برشی درزه مقاومت مماسی یا برشی سطح درزه می باشد. برای تعیین این دو پارامتر از فرمولهای زیر استفاده می شود [21]:

$$\frac{1}{E_m} = \frac{1}{E_r} + \frac{1}{k_n s} \quad (۳-۶)$$

$$k_n = \frac{E_m E_r}{s (E_r - E_m)} \quad (۴-۶)$$

$$k_s = \frac{G_m G_r}{s (G_r - G_m)} \quad (۵-۶)$$

$E_m$  : مدول الاستیسیته توده سنگ

$E_r$  : مدول الاستیسیته ماده سنگ بکر

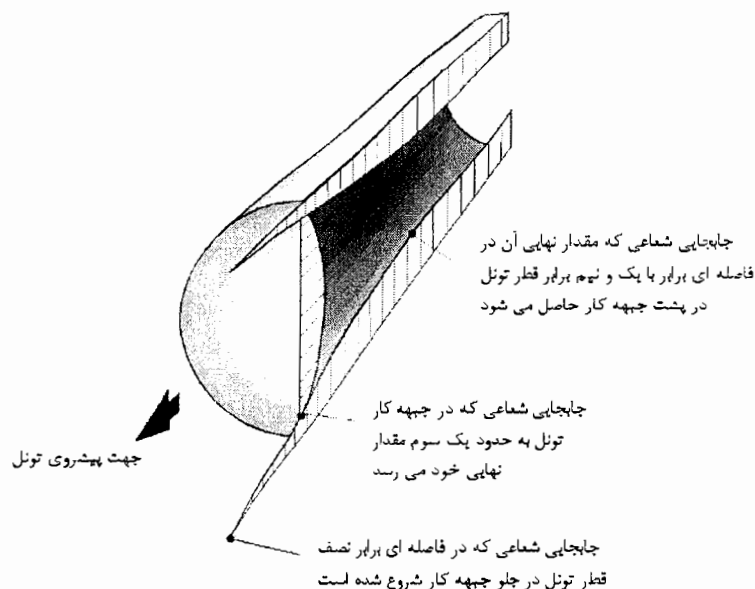
$s$  : فاصله داری متوسط درزه ها

$G_m$  : مدول برشی توده سنگ

$G_r$  : مدول برشی ماده سنگ بکر

### ۶-۳-۴- معیارهای تحلیل و طراحی سیستم نگهدارنده اولیه

بررسی محققین مختلف نشان می دهد که تغییر شکلهای توده سنگ از فاصله ای برابر با نصف قطر تونل در جلوی جبهه حفاری آغاز می شود. این تغییر شکل ها به تدریج اضافه می شود تا به حدود یک سوم جابجایی نهایی در جبهه حفاری برسد. با عبور از جبهه حفاری تغییر شکل ها افزایش یافته تا در حدود یک و نیم برابر قطر تونل، مقدار تغییر شکل به حداکثر مقدار خود می رسد. در شکل (۵-۶) این فرایند نشان داده شده است.



شکل ۵-۶- الگوی جابجایی در سقف و کف تونل در حال پیشروی [۹]

بنابراین باید به این نکته توجه کرد که همواره بخشی از تغییر مکان کلی قبل از نصب سیستم نگهدارنده اتفاق خواهد افتاد (حدود ۳۳ درصد) که قابل جلوگیری نمی باشد. علاوه بر این تغییر شکل ایجاد شده، تغییر شکل دیگری نیز با توجه به فاصله بوجود آمده بین جبهه کار و مقطع نصب سیستم نگهداری اتفاق می افتد که هر چه فاصله جبهه حفاری و مقطع نصب پوشش کمتر باشد، جابجایی ایجاد شده کوچکتر خواهد بود [۹].

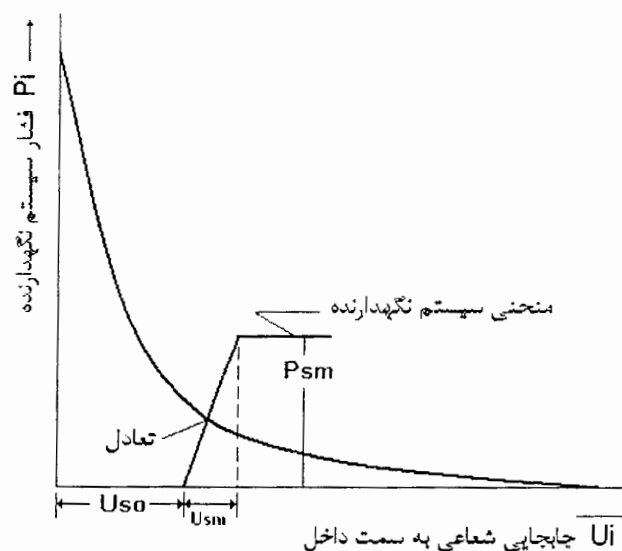
در این تحقیق به صورت محافظه کارانه فرض شده است که نصب سیستم نگهدارنده اولیه بلافاصله پس از حفر صورت پذیرد که با توجه به استفاده از شاتکریت بعنوان سیستم نگهدارنده، این امر ممکن خواهد بود. بنابراین در نظر گرفتن آزاد سازی تنش کمتر برای سیستم نگهدارنده اولیه، نیروی بیشتری به آن وارد خواهد کرد که در جهت اطمینان می باشد.

در روش بکار گیری از پوشش های نرم (نظیر شاتکریت) بعنوان سیستم نگهدارنده، اجازه تغییر مکان به تونل داده خواهد شد. در این حالت بخشی از باربری توسط خود زمین تامین می شود. در این حالت ناحیه خمیری در توده سنگ میزبان اطراف تونل ایجاد خواهد شد که لزوماً به معنای شکست و خرابی سازه تونل نخواهد بود. در صورتی که ضخامت این ناحیه نسبت به قطر تونل اندک باشد، تونل همچنان پایدار بوده و امکان باربری خواهد داشت. در صورتی که به علت ضعف توده سنگ میزبان، ناحیه پلاستیک ایجاد شده توسعه یابد، در نهایت باعث خرابی تونل خواهد شد.

#### ۴-۶- روش تعیین منحنی های اندرکنش توده سنگ

اولین گام در تحلیل عددی سیستم های نگهدارنده، تعیین منحنی اندرکنش زمین می باشد. منحنی عکس العمل زمین یا منحنی GRC (Ground Reaction Curve) در واقع ارتباط بین فشار سیستم نگهدارنده ( $P_i$ ) و جابجایی شعاعی تونل به سمت داخل ( $U_i$ ) است. همانطور که در شکل ۶-۶ مشاهده می شود، با افزایش فشار سیستم نگهدارنده، از جابجایی شعاعی تاج تونل یا دیواره و کف آن

به سمت داخل کاسته می شود. شکل (۶-۶) منحنی شماتیک واکنش سیستم نگهدارنده و توده سنگ اطراف را نمایش می دهد.



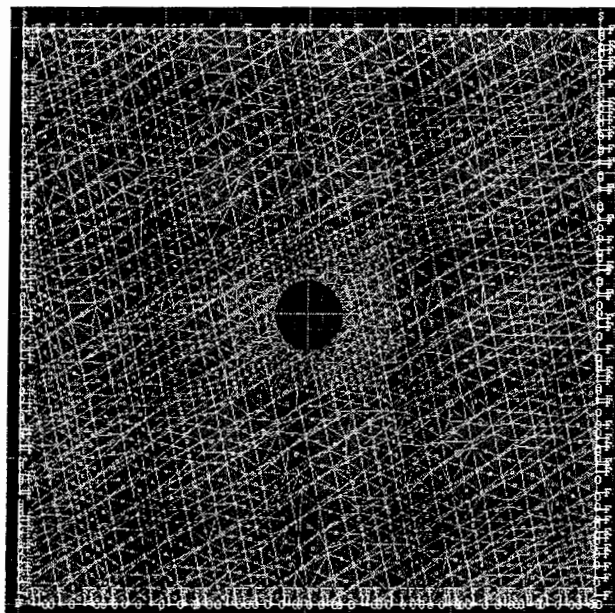
شکل ۶-۶- منحنی عکس العمل زمین (GRC) همراه با منحنی مشخصه سیستم نگهداری [20]

طراحی شاتکریت به عنوان سیستم نگهدارنده فضاهای زیرزمینی، فرایندی بسیار پیچیده است. فعل و انفعال پیچیده بین توده سنگ سست شده اطراف تونل و لایه ای از شاتکریت با ضخامت متغیر (که خواص مقاومتی آن در هر مرحله از گیرش تغییر نماید)، اکثر اقدامات در جهت تحلیل های تئوریکی را غیر ممکن می سازد، هرچند که با رشد و توسعه روش های عددی امکان انجام تحلیل های واقعی تر پدید آمده است. با توجه به آنکه همیشه حداقل یک مرحله از سیکل حفاری در فاصله بین سینه کار و نزدیکترین نگهدارنده نصب شده، اجرا می شود، لذا قبل از آنکه نگهدارنده تاثیر خود را بگذارد، تغییر شکل رخ می دهد. این جابجایی اولیه کلی با  $U_{so}$  معرفی می شود. همانطور که در شکل مشخص است، به محض نصب، سیستم نگهدارنده شروع به تغییر شکل الاستیک خواهد کرد. در این حالت حداکثر جابجایی الاستیک که می تواند در سیستم نگهدارنده پدید آید  $U_{sm}$  بوده و حداکثر فشار نگهداری  $P_{sm}$  می باشد که همان نقطه تسلیم سیستم نگهدارنده است.

به همراه پیشروی جبهه کار و فاصله گرفتن از نقطه مورد بررسی، سیستم نگهدارنده در واکنش به جمع شدگی تونل به طور الاستیک تغییر شکل خواهد داد. این تغییر شکل تحت تاثیر مشخصه های سیستم نگهدارنده، توده سنگ دربرگیرنده تونل و سطح تنش می باشد [20].

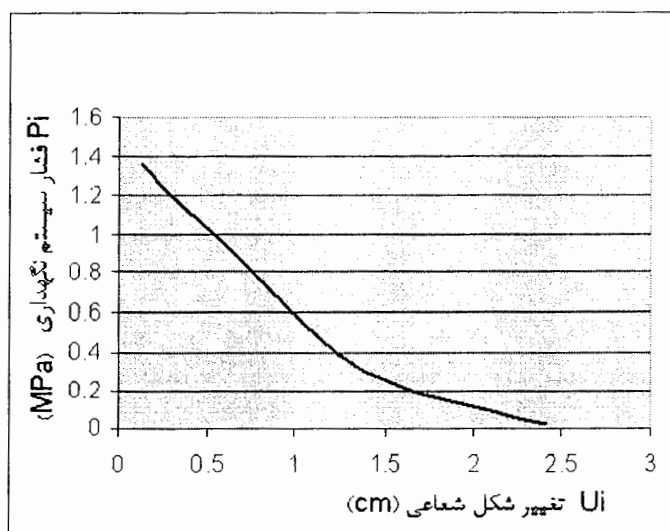
#### ۶-۴-۱- تعیین منحنی اندرکنش توده سنگ (GRC) قسمت های مختلف تونل

برای رسم منحنی عکس العمل توده سنگ قسمت های ورودی، خروجی و مقطع حداکثر روباره به عنوان نمونه در این بخش، از روش عددی و نرم افزار UDEC 4.0 استفاده شده است. مقطع مورد نظر با فرض دایره بودن مقطع تونل مدل شده و با اعمال تدریجی تنش یکنواخت روی مرز داخلی بخش حفاری، به عنوان فشار سیستم نگهدارنده، جابجایی های شعاعی در دو نقطه تاج تونل (سقف تونل) و دیواره آن ثبت گردیده است. در نهایت با در نظر گرفتن جابجایی های تاج یا دیواره تونل روی محور x دستگاه مختصات و فشار سیستم نگهدارنده (تنش داخلی روی مرز حفاری)، روی محور y، منحنی واکنش توده سنگ قسمت مورد نظر از مسیر تونل، ترسیم شده است.

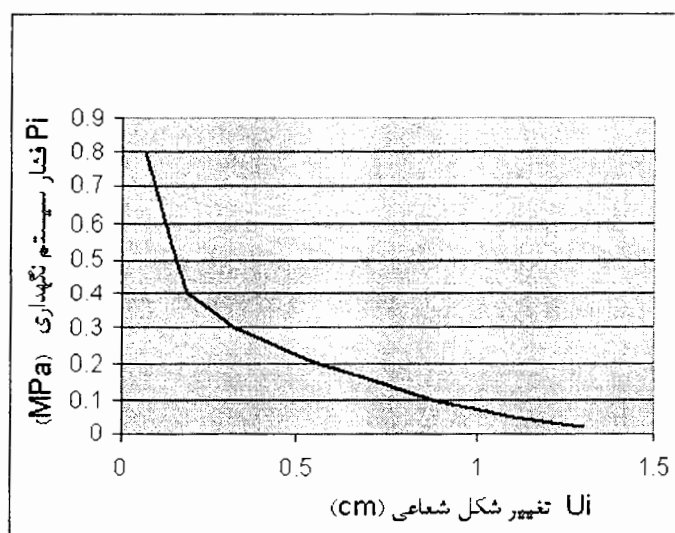


شکل ۶-۷ - مدل مورد نظر برای رسم منحنی GRC بوسیله نرم افزار UDEC



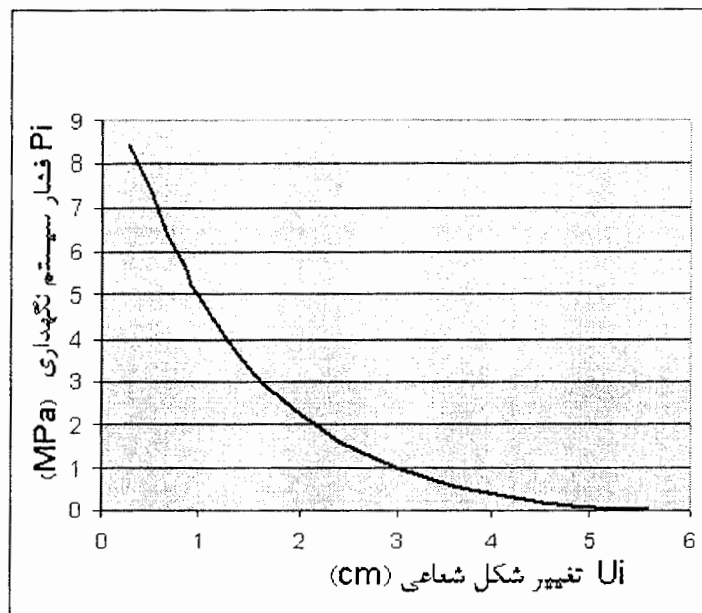


شکل ۸-۶- منحنی GRC تاج تونل برای توده سنگهای قسمت ورودی تونل (Part 1)

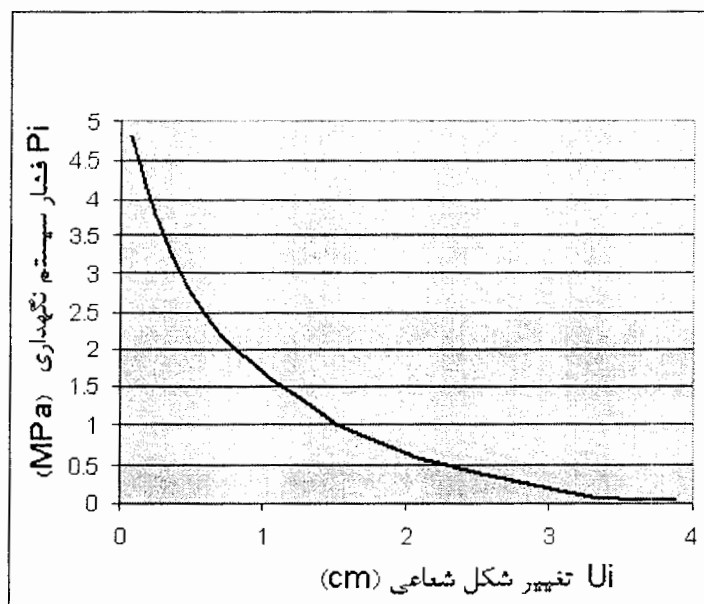


شکل ۹-۶- منحنی GRC دیواره تونل برای توده سنگهای قسمت ورودی تونل (Part 1)

همانطور که در این نمودارها مشاهده می شود، در قسمت ورودی تونل با حداکثر روباره ۴۰ متر، مقدار حداکثر جابجایی بدون نصب سیستم نگهدارنده، حدود ۲۵ میلیمتر در تاج تونل و ۱۳ میلیمتر در دیواره خواهد بود. به تدریج با افزایش فشار سیستم نگهداری، این جابجایی کاهش می یابد.

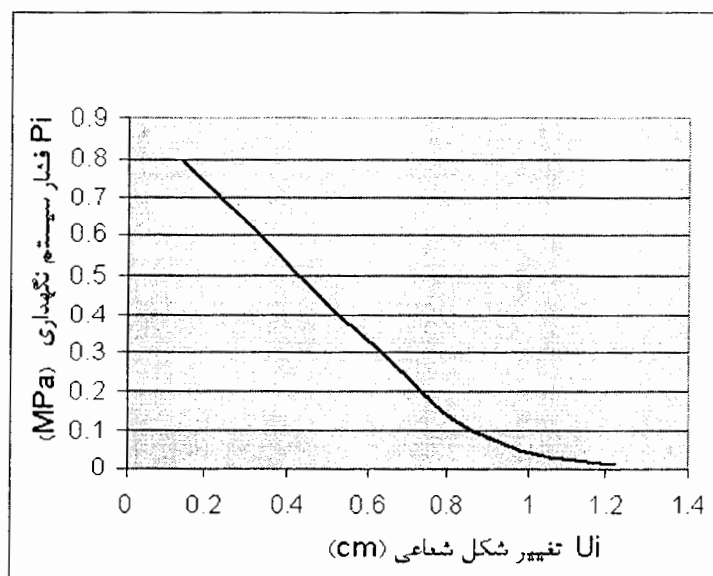


شکل ۶-۱۰- منحنی تاج تونل برای توده سنگهای قسمت حداکثر روباره (Part 3)

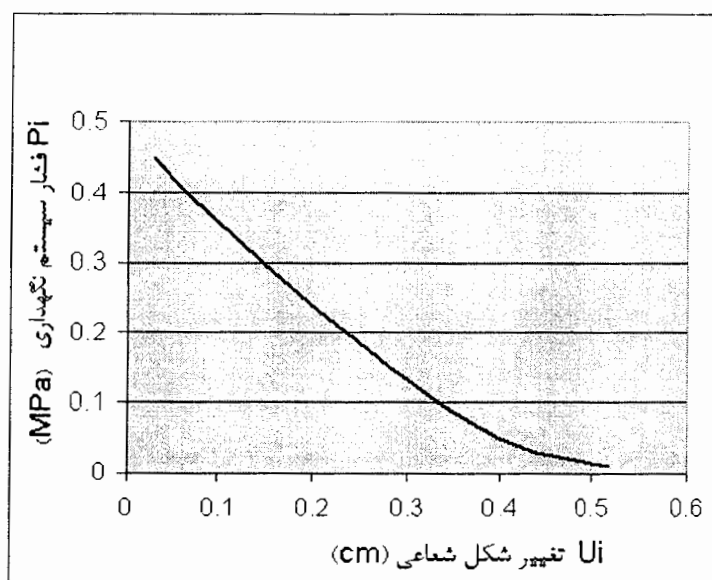


شکل ۶-۱۱- منحنی دیواره تونل برای توده سنگهای قسمت حداکثر روباره (Part 3)

در مقطع حداکثر روباره (۳۵۰ متر)، مقدار حداکثر جابجایی بدون نصب سیستم نگهداری، ۵۸ میلیمتر در تاج تونل و ۴۳ میلیمتر در دیواره تونل می باشد که این میزان به تدریج با افزایش فشار سیستم نگهداری، این جابجایی کاهش می یابد.



شکل ۶-۱۲ - منحنی GRC تاج تونل برای توده سنگهای قسمت خروجی تونل (Part 23)



شکل ۶-۱۳ - منحنی GRC دیواره تونل برای توده سنگهای قسمت خروجی تونل (Part 23)

در مقطع خروجی تونل با در نظر گرفتن ۴۰ متر روباره و با توجه به کیفیت نسبتاً خوب سنگ، مقدار حداکثر جابجایی بدون نصب سیستم نگهداری، حدود ۱۲ میلیمتر در تاج تونل و ۷ میلیمتر در دیواره می باشد که به تدریج با افزایش فشار سیستم نگهداری، این جابجایی کاهش می یابد.

## ۵-۶- تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت تونل انتقال آب خدنگستان

در بخشهای قبلی، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری قسمت های مختلف تونل انتقال آب خدنگستان بر اساس روش های تجربی و تحلیلی انجام شد. از آنجا که در بکارگیری این روش ها از برخی فرضیات ساده کننده همانند فرض تنش های هیدروستاتیک در اطراف تونل و دایروی بودن مقطع تونل در روش تحلیلی برای تعیین سیستم نگهداری و بسیاری از فرضیات ساده کننده دیگر در روشهای تجربی و استفاده از نمودارها و روابطی که بر اساس تجربیات بدست آمده اند، استفاده شده است، بنابراین بکارگیری این روش ها برای تحلیل پایداری و تعیین سیستم نگهدارنده مناسب و مطمئن، از جهت داشتن یک زمینه و پیش فرض قبلی و یک دید کلی نسبت به مسئله مناسب است، اما زیاد نمی توان به نتایج این روشها تکیه کرد و لازم است با بکارگیری روش های عددی و یک نرم افزار مناسب که با توجه به شرایط توده سنگ و ناپیوستگی های منطقه انتخاب می گردد، به نتایج قابل اطمینان تری دست یافت.

بدین منظور در این بخش بر اساس روش عددی و به کمک نرم افزار UDEC 4.0 به تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری مناسب برای توده سنگ های مسیر تونل انتقال آب که به بیست و سه قسمت تقسیم شده است، می پردازیم. در ابتدای این بخش به بررسی نتایج نرم افزار در تعیین میزان حداکثر جابجاییها در سقف و دیواره تونل در شرایط کرنش صفحه ای و قبل از نصب سیستم نگهداری برای قسمت های مختلف تونل پرداخته شده، سپس برای نمونه، مراحل مدلسازی در قسمت حداکثر روباره و نتایج نموداری نرم افزار برای این مقطع قبل و بعد از نصب سیستم نگهداری همراه با تشریح عناصر بکار رفته در سیستم نگهدارنده، آورده شده است. جدول ۶-۱ میزان حداکثر جابجایی های سقف و دیواره تونل در مقاطع مختلف مسیر تونل را نشان می دهد:

جدول ۶-۱- میزان حداکثر جابجایی ها در سقف و دیواره تونل قبل از نصب سیستم نگهداری برای ۲۳

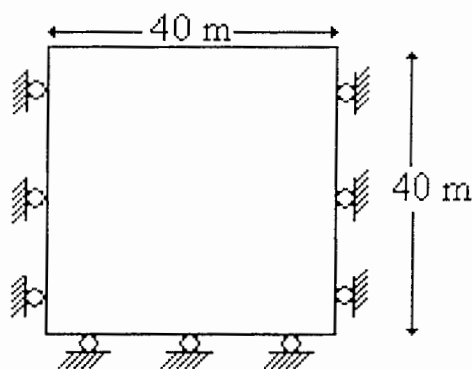
قسمت مسیر تونل انتقال آب

قسمت	از ...	تا ...	جابجایی قائم در سقف (cm)	جابجایی افقی در دیواره (cm)
۱	۰+۰۰۰	۰+۰۵۰	۲/۴۸	۱/۱۳
۲	۰+۰۵۰	۰+۲۵۰	۸/۳	۷
۳	۰+۲۵۰	۰+۸۹۰	۵/۸	۴/۳۲
۴	۰+۸۹۰	۱+۰۱۰	۹/۰۴	۸/۸
۵	۱+۰۱۰	۱+۶۹۰	۳/۵	۳/۱
۶	۱+۶۹۰	۲+۳۱۵	۱/۳	۰/۷۱
۷	۲+۳۱۵	۲+۵۴۵	۰/۹۴	۰/۴
۸	۲+۵۴۵	۲+۷۴۵	۱/۱	۰/۶۲
۹	۲+۷۴۵	۳+۷۷۰	۳/۳	۲/۹
۱۰	۳+۷۷۰	۳+۸۷۰	۸/۶	۷/۸
۱۱	۳+۸۷۰	۴+۸۳۰	۳/۳	۲/۷
۱۲	۴+۸۳۰	۵+۰۳۰	۱/۴	۰/۶۲
۱۳	۵+۰۳۰	۶+۱۰۰	۱/۴۶	۰/۱۸
۱۴	۶+۱۰۰	۶+۳۰۰	۱/۳	۰/۷۱
۱۵	۶+۳۰۰	۶+۵۹۰	۱/۴۶	۱/۱۸
۱۶	۶+۵۹۰	۶+۸۹۰	۲/۱	۱/۵
۱۷	۶+۸۹۰	۸+۲۱۰	۱/۶۲	۱/۳
۱۸	۸+۲۱۰	۸+۴۱۰	۱/۷	۱/۲
۱۹	۸+۴۱۰	۹+۲۶۰	۱/۷	۱/۲
۲۰	۹+۲۶۰	۱۰+۲۸۵	۱/۲۸	۰/۷
۲۱	۱۰+۲۸۵	۱۰+۴۸۵	۱/۱	۰/۶۲
۲۲	۱۰+۴۸۵	۱۰+۸۸۵	۰/۸۶	۰/۳۸
۲۳	۱۰+۸۸۵	۱۱+۲۶۶	۱/۱	۰/۶۲

برای آنکه نشان داده شود جدول قبلی (۶-۱) چگونه تهیه شده است، به عنوان نمونه برای مقطع حداکثر روباره مراحل مدلسازی و تحلیل تنش و مشخص کردن جابجایی های اطراف تونل در قسمت ۶-۵-۱ آمده است. (لازم به ذکر است که داده های ورودی برای این زون در قسمت پیوست به صورت فایل متنی موجود می باشد).

#### ۶-۵-۱- مراحل مدلسازی و تحلیل تنش در مقطع حداکثر روباره

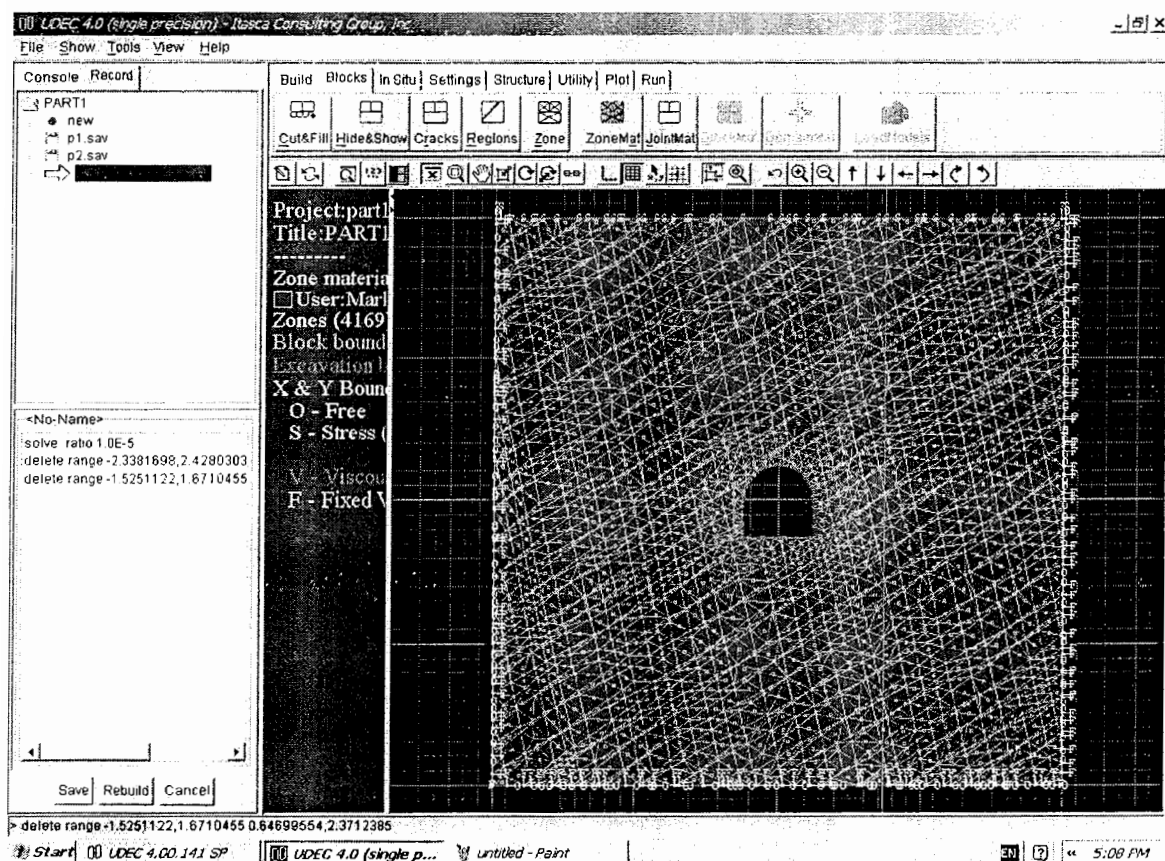
مشخصات تونل، سطح مقطع نعل اسبی با عرض ۵ متر، ارتفاع دیواره ۲/۵ متر، و قوس نیم دایره به شعاع ۲/۵ متر می باشد که در مدلسازی در نظر گرفته شده است. جهت برآورده شدن شرایط مستهلک شدن اغتشاش ناشی از ایجاد حفره در مقادیر تنش و جابجایی و جلوگیری از اثر شرایط مرزی، ابعاد مدل ۴۰×۴۰ متر در نظر گرفته شده است. از آنجا که شعاع تونل نسبت به طول آن ناچیز است شرایط کرنش صفحه ای برقرار است. در شرایط کرنش صفحه ای، تمام کرنش های بوجود آمده در همین صفحه می باشد و در بعد سوم، کرنش برابر صفر است ( $\epsilon_z = 0$ ). مرزهای کناری مدل (سمت راست و چپ مدل) و مرز پایینی به صورت غلظتی در نظر گرفته می شوند و روی مرز بالایی تنش ثقلی ناشی از وزن روباره بالای مدل اعمال می گردد.



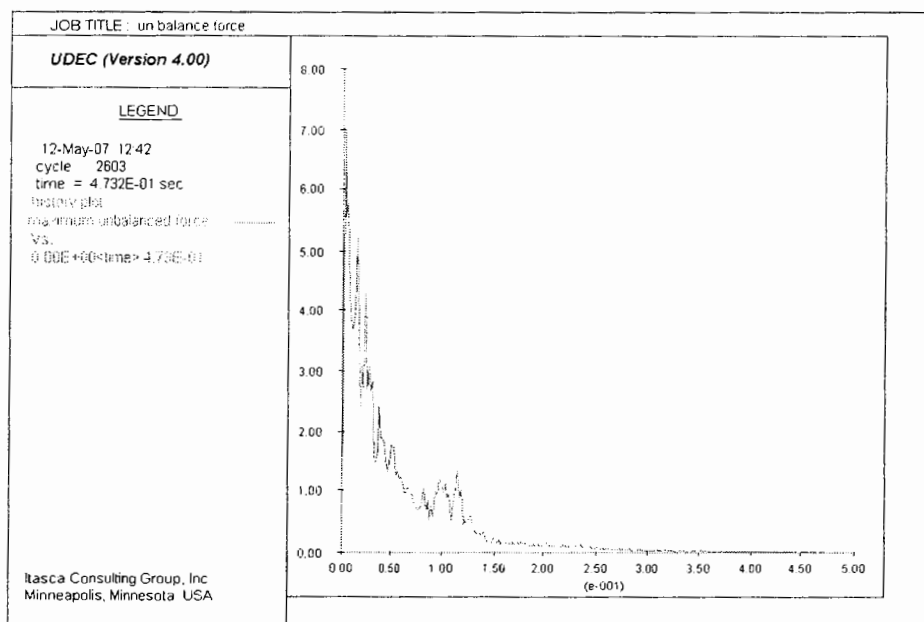
شکل ۶-۱۴- وضعیت مرزها در مدل

پس از اعمال شرایط مرز بر روی مدل، پارامترهای مربوط به توده سنگ و ناپیوستگی ها (که در بخش ۶-۳-۳ مدل رفتاری توده سنگ و ناپیوستگی ها پارامترهای مورد نیاز مشخص شده اند) به مدل اختصاص داده می شود. این مقادیر برای مقطع حداکثر روباره در قسمت پیوست به صورت یک فایل متنی آورده شده است. پس از آنکه این ویژگی ها به مدل اختصاص داده شد و مدل حل و تونل

حفاری گردید، می‌توان نتایج تحلیل‌ها را در نرم افزار مشاهده کرد. اولین نمودار مربوط به نیروهای نامتعادل کننده (unbalance force) است که در ضمن حل مسئله (اجرا کردن مدل) این نیروها به سمت صفر میل می‌کنند. در شکل ۶-۱۵ محیط نرم افزار UDEC 4.0 و مدل ساخته شده در آن نشان داده شده است. در شکل ۶-۱۶ نیروهای نامتعادل کننده در حل مدل در مقطع حداکثر روباره نشان داده شده که به سمت صفر میل کرده و نشان می‌دهد که مدل به تعادل رسیده است.



شکل ۶-۱۵- محیط نرم افزار UDEC 4.0 همراه با مدل ساخته شده و مقطع تونل

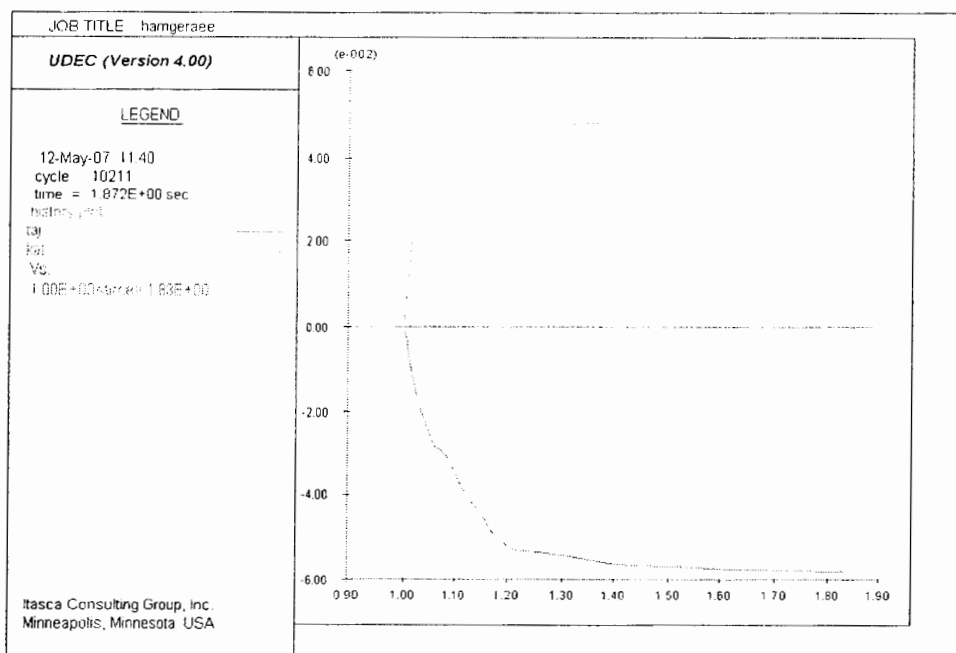


شکل ۶-۱۶- نیروهای نامتعادل کننده در حل مدل مقطع حداکثر روباره

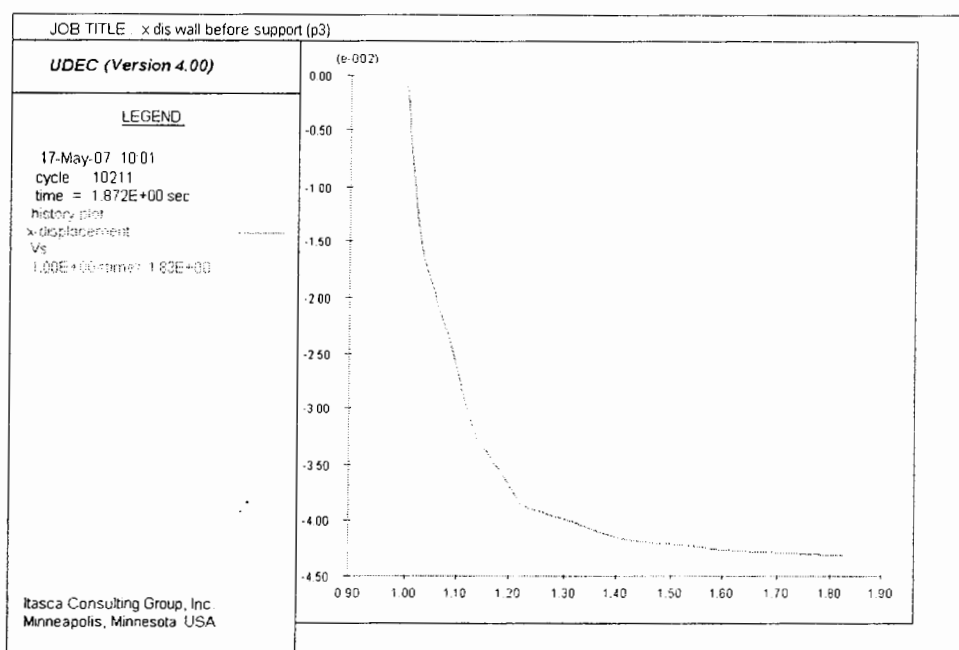
پس از حل مدل و به تعادل رسیدن آن، مقطع تونل حفاری شده و برای مشاهده میزان جابجایی ها در سقف و اطراف تونل مدل دوباره اجرا می شود. در شکل ۶-۱۷ نمودار همگرایی تونل (یعنی جابجایی سقف و کف تونل) برای مقطع حداکثر روباره نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود این میزان برای سقف تونل (قبل از نصب سیستم نگهداری) برابر ۵/۸ سانتیمتر و برای کف ۴/۸ سانتیمتر می باشد. همگرایی تونل معادل ۱۰/۶ سانتیمتر می باشد. شکل ۶-۱۸ جابجایی دیواره تونل را نشان می دهد که همانگونه که مشاهده می شود این مقدار برابر ۴/۳۲ سانتیمتر می باشد.

شکل ۶-۱۹ بردارهای جابجایی نقاط اطراف تونل را نشان می دهد. در شکل ۶-۲۰ نقاط پلاستیک اطراف تونل قبل از نصب سیستم نگهداری نشان داده شده است که همانگونه که در ادامه دیده خواهد شد، بعد از نصب سیستم نگهداری نقاطی که دچار شکست کششی شده اند و سطوح تسلیم، به حداقل خواهند رسید.

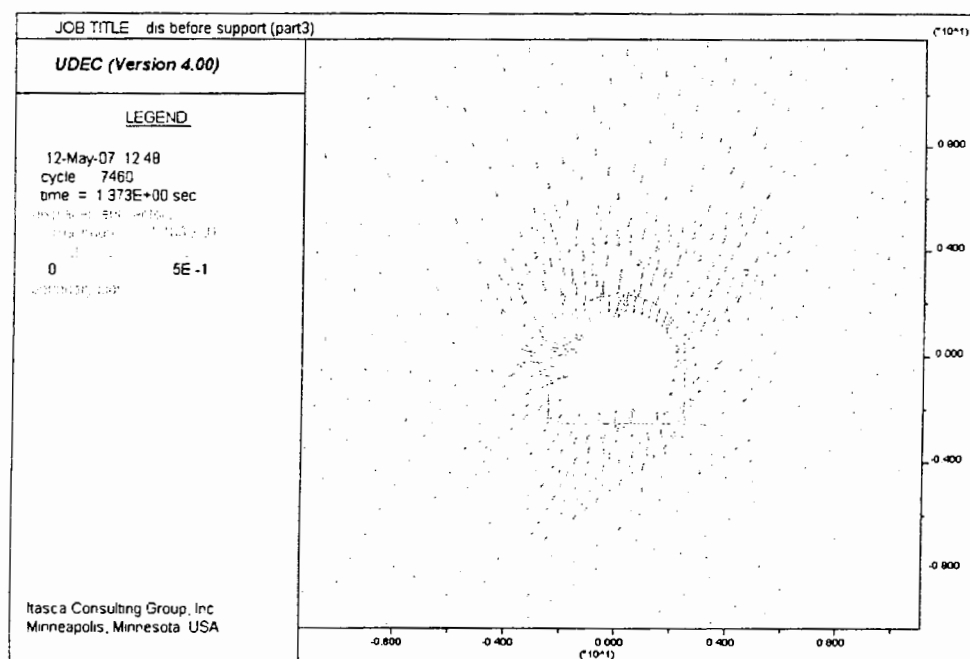




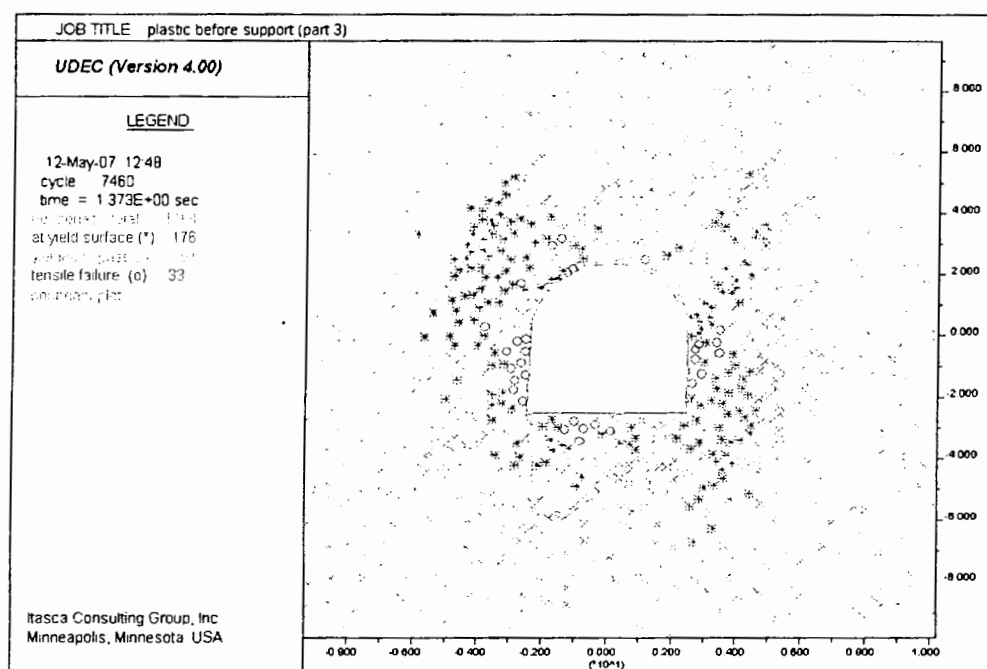
شکل ۶-۱۷- نمودار همگرایی سقف و کف تونل برای مقطع حداکثر روباره



شکل ۶-۱۸- نمودار جابجایی افقی دیواره تونل به سمت داخل برای مقطع حداکثر روباره

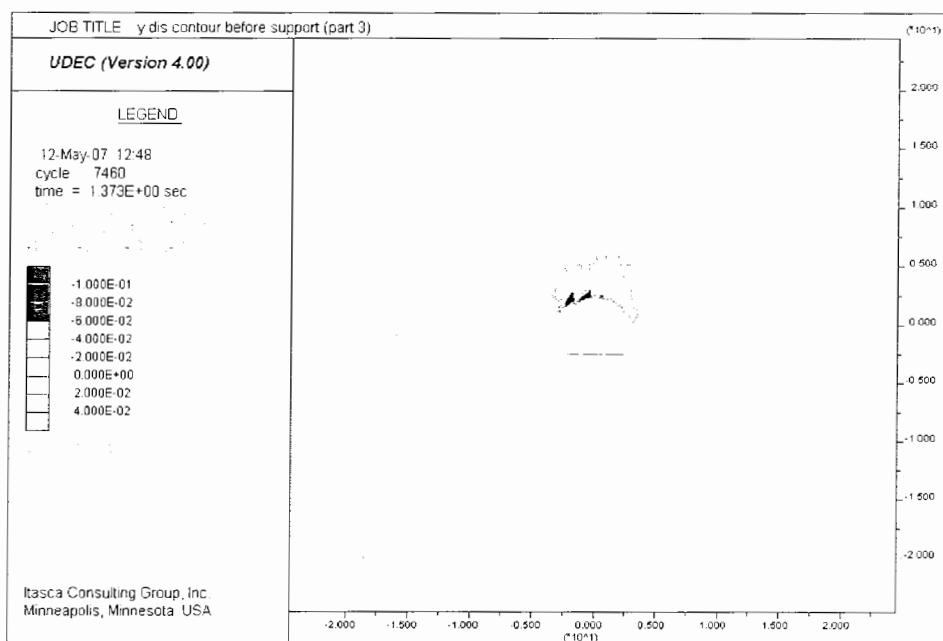


شکل ۶-۱۹- بردارهای جابجایی در نقاط اطراف تونل در مقطع حداکثر روباره

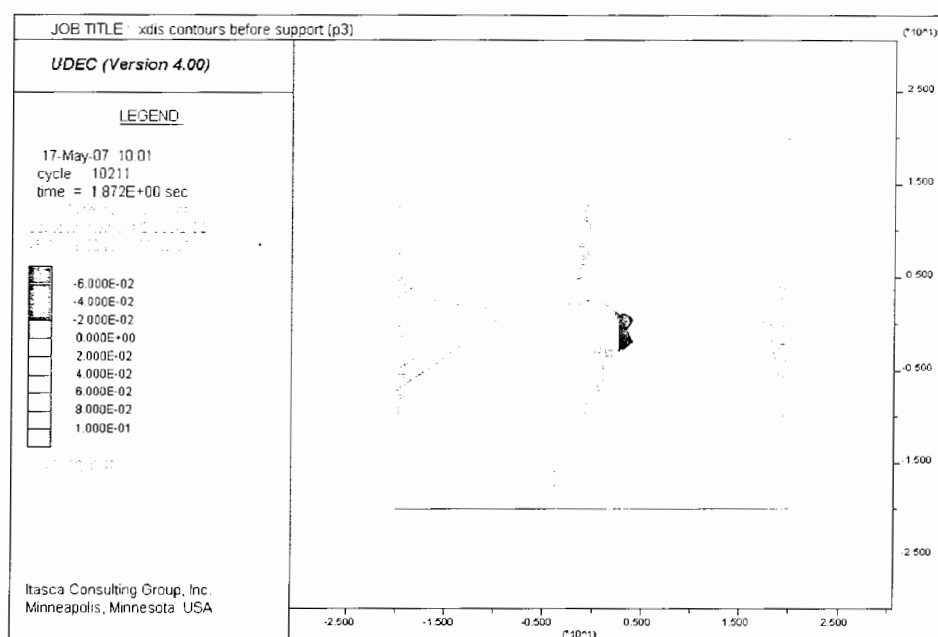


شکل ۶-۲۰- نقاط پلاستیک اطراف تونل همراه با سطوح تسلیم و شکست کششی قبل از نصب سیستم

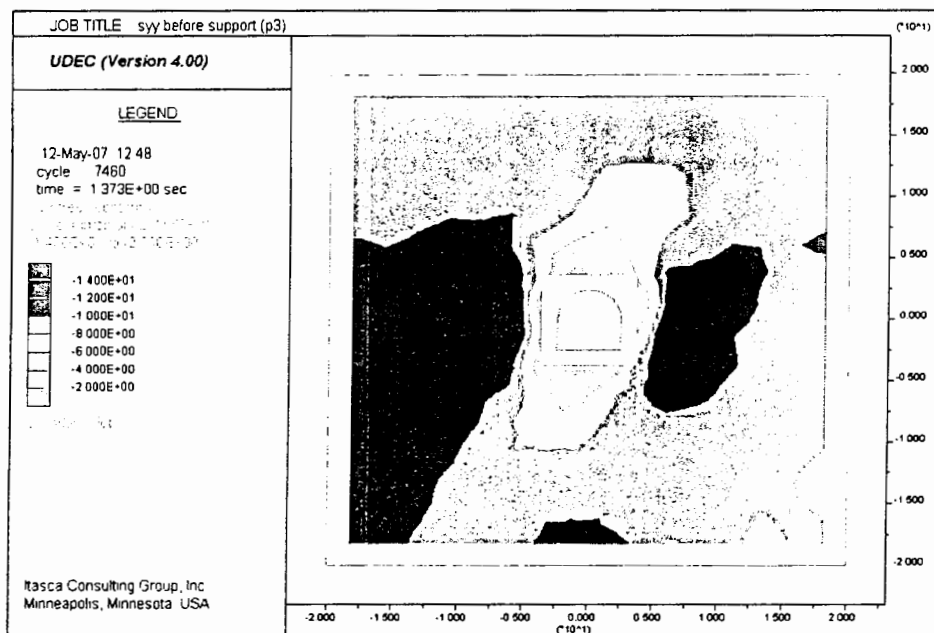
نگهداری در مقطع حداکثر روباره



شکل ۶-۲۱- نمودار تراز جابجایی قائم اطراف تونل قبل از نصب سیستم نگهداری در مقطع حداکثر روباره



شکل ۶-۲۲- نمودار تراز جابجایی افقی اطراف تونل قبل از نصب سیستم نگهداری در مقطع حداکثر روباره



شکل ۶-۲۳- نمودار تراز تنش های قائم  $S_{yy}$  قبل از نصب سیستم نگهداری در مقطع حداکثر روباره

همانگونه که مشاهده گردید، در شکل های ۶-۲۱ و ۶-۲۲ نمودار تراز جابجایی های قائم و افقی در اطراف تونل مقطع حداکثر روباره و قبل از نصب سیستم نگهداری نشان داده شده است. شکل ۶-۲۳ مربوط به تنش های قائم  $S_{yy}$  در مقطع حداکثر روباره، بعد از حفاری تونل و قبل از نصب سیستم نگهداری می باشد.

پس از ثبت جابجایی های انجام شده در اثر حفاری، مدل به حالت قبل از حل کردن پس از حفاری بازگردانده شده و این بار با نصب سیستم نگهداری حل می شود. جهت اینکه جابجایی های انجام شده قبل از رسیدن حفاری به مقطع مورد نظر، و یا تاثیر فاصله نصب سیستم نگهداری از مقطع مورد نظر مدل شود (که در بخش ۶-۳-۴ مطرح گردید)، مقداری آزاد سازی تنش (حدود ۳۵ درصد بسته به شرایط) قبل از نصب سیستم نگهداری انجام می شود. در ادامه ابتدا به تشریح المانهای بکار رفته در سیستم نگهداری پرداخته و بعد تاثیر سیستم نگهداری در کاهش جابجایی ها و پایداری تونل بررسی می شود.

## ۶-۵-۲- تشریح عناصر بکار رفته به عنوان سیستم نگهداری تونل انتقال آب

در نرم افزار UDEC در مدلسازی شاتکریت می توان از المانهای Beam یا Liner ، برای مدلسازی پیچ سنگ از المان Cable و یا Cable apply (برای پیچ سنگ های پیش تنیده) و برای مدل کردن قاب فولادی یا تیر ها از المان Beam استفاده نمود.

المان Cable یک المان دو نقطه ای است که به صورت محدود و مستقیم بوده و با مشخص کردن مختصات نقاط ابتدا و انتهای آن و تعداد سگمنت ها (بسته به طول آن که معمولاً به ازای هر متر طول یک المان در نظر گرفته می شود) تعریف می شود. این المان قابلیت تحمل کشش یا فشارش را دارد اما نمی تواند لنگر خمشی را تحمل کند. علاوه بر مختصات شروع و پایان المان، تعداد سگمنت در هر پیچ سنگ، سطح مقطع پیچ سنگ، مدول الاستیسیته فولاد پیچ سنگ، مقاومت فشاری فولاد، وزن مخصوص و ضریب پواسون فولاد، پارامترهای زیر نیز باید مشخص گردد:

$$S_b = p \cdot (D + 2t) \cdot T_{max} \quad (6-6)$$

که در آن:

$S_b$  : مقاومت برشی دوغاب تزریقی بر حسب پاسکال (grout shear strength)

$D$  : قطر پیچ سنگ بر حسب متر

$t$  : اختلاف شعاع پیچ سنگ از شعاع چالی که در آن قرار دارد بر حسب متر

$T_{max}$  : مقاومت برشی دوغاب که برابر نصف مقاومت فشاری تک محوری سنگ یا دوغاب

مصرفی است. (مقاومت فشاری تک محوری دوغاب را معمولاً ۲۰ مگاپاسکال در نظر می گیرند.

$$K_b = 2pG / 10 \ln (1 + (2t / D)) \quad (7-6)$$

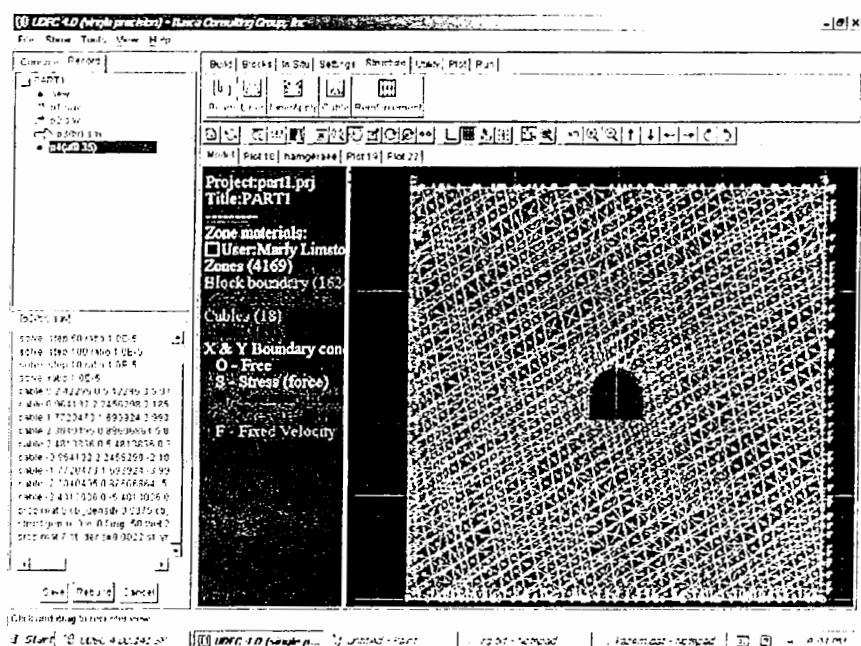
$K_b$  : سختی برشی دوغاب تزریقی (grout shear stiffness)

$G$  : مدول برشی دوغاب مصرفی که معمولاً آن را ۹ گیگاپاسکال در نظر می گیرند.

برای مدل کردن شاتکریت در نرم افزار UDEC با دستور Struct لازم است ابتدا مختصات نقطه ای که از آنجا بتن پاشیده می شود، تعیین گردد. سپس زاویه شروع و پایان بتن پاشی، ضخامت اجرای شاتکریت، تعداد سگمنت ها، تعیین شده و در نهایت خواص بتن بکار رفته باید مشخص شود. این خواص شامل: وزن مخصوص بتن، ضریب پواسون، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک محوره بتن می باشد.

### ۶-۵-۳- خلاصه نتایج مدل سازی پس از نصب سیستم نگهداری برای قسمت های مختلف مسیر تونل انتقال آب

پس از ساخت مدل و حل کردن آن با بکارگیری عناصر شرح داده شده در بخش قبل به عنوان سیستم نگهدارنده، میزان جابجایی های قائم و افقی در سقف و دیواره تونل برای قسمت های مختلف مسیر تونل از نرم افزار بدست آمده که این نتایج در جدول ۶-۲ آورده شده و به عنوان نمونه برای مقطع حداکثر روباره بررسی شده است.



شکل ۶-۲۴- نمونه ای از سیستم نگهداری مدل شده در نرم افزار UDEC 4.0

جدول ۶-۲- میزان جابجایی قائم در سقف و افقی در دیواره تونل پس از نصب سیستم نگهداری در

قسمت های مختلف مسیر تونل انتقال آب

قسمت	جابجایی قائم در سقف (میلیمتر)	جابجایی افقی در دیواره (میلیمتر)	سیستم نگهداری
۱	۳/۳	۰/۳۱	B (1.5×1.5) + SH (12 cm)
۲	۱۲/۵	۶/۱	B (1×1) + SH (15 cm)
۳	۱۴/۷	۶/۱	B (1×1) + SH (15 cm)
۴	۱۳	۳/۴	B (1×1) + SH (15 cm)
۵	۹/۸	۳/۴	B (1×1) + SH (15 cm)
۶	۴/۳	۱/۸	B (1.5×1.5) + SH (7.5 cm)
۷	۴/۲	۱/۵۶	B (1.5×1.5) + SH (5 cm)
۸	۲/۹	۰/۸	B (1.5×1.5) + SH (7.5 cm)
۹	۹/۱	۳/۳	B (1.5×1.5) + SH (12cm)
۱۰	۱۱	۷/۲	B (1.5×1.5) + SH (15 cm)
۱۱	۹/۸	۳/۱	B (1.5×1.5) + SH (15 cm)
۱۲	۴/۳	۱/۵	B (1.5×1.5) + SH (15 cm)
۱۳	۴/۹	۳/۵	B (1.5×1.5) + SH (7.5 cm)
۱۴	۴/۳	۱/۸	B (1.5×1.5) + SH (7.5 cm)
۱۵	۴/۹	۳/۵	B (1.5×1.5) + SH (7.5 cm)
۱۶	۴/۹	۱/۵	B (1.5×1.5) + SH (7.5 cm)
۱۷	۴/۹۲	۳/۸	B (1.5×1.5) + SH (7.5cm)
۱۸	۴/۷	۱/۲	B (1.5×1.5) + SH (7.5cm)
۱۹	۴/۷	۱/۲	B (1.5×1.5) + SH (7.5cm)
۲۰	۳/۸	۱/۴	B (1.5×1.5) + SH (7.5cm)
۲۱	۲/۹	۰/۸۸	B (1.5×1.5) + SH (7.5cm)
۲۲	۲/۴	۰/۸۵	B (1.5×1.5) + SH (7.5cm)
۲۳	۲/۹	۰/۸۸	B (1.5×1.5) + SH (7.5cm)

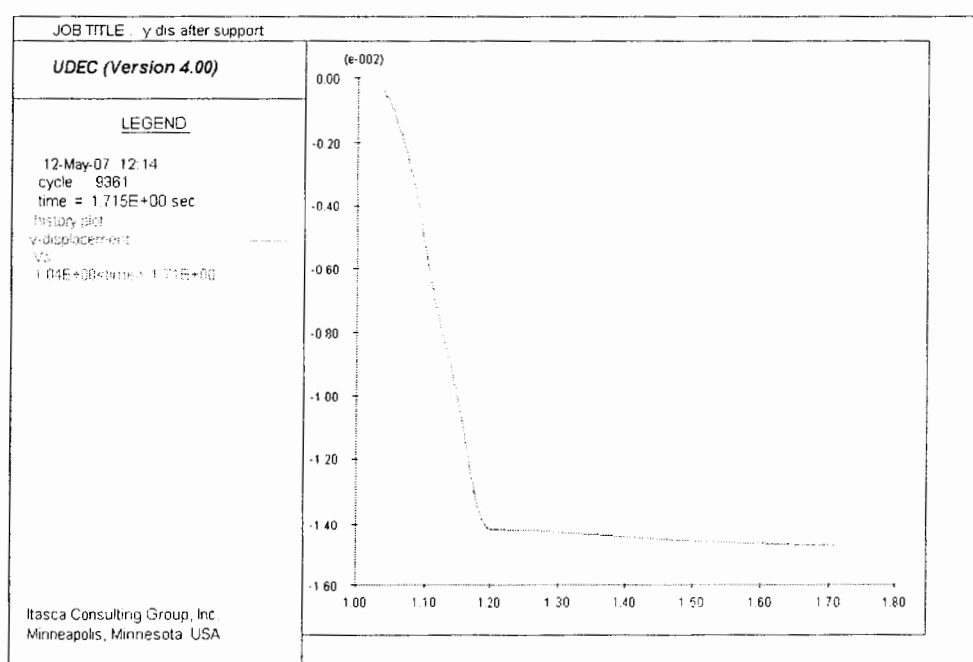
به عنوان نمونه نتایج به بررسی تحلیل پایداری پس از نصب سیستم نگهداری، برای مقطع

حداکثر روباره می پردازیم. در شکل های ۶-۲۵ و ۶-۲۶ نمودار حداکثر جابجایی قائم در سقف و

حداکثر جابجایی افقی در دیواره تونل، پس از نصب سیستم نگهداری آورده شده است. همانگونه که

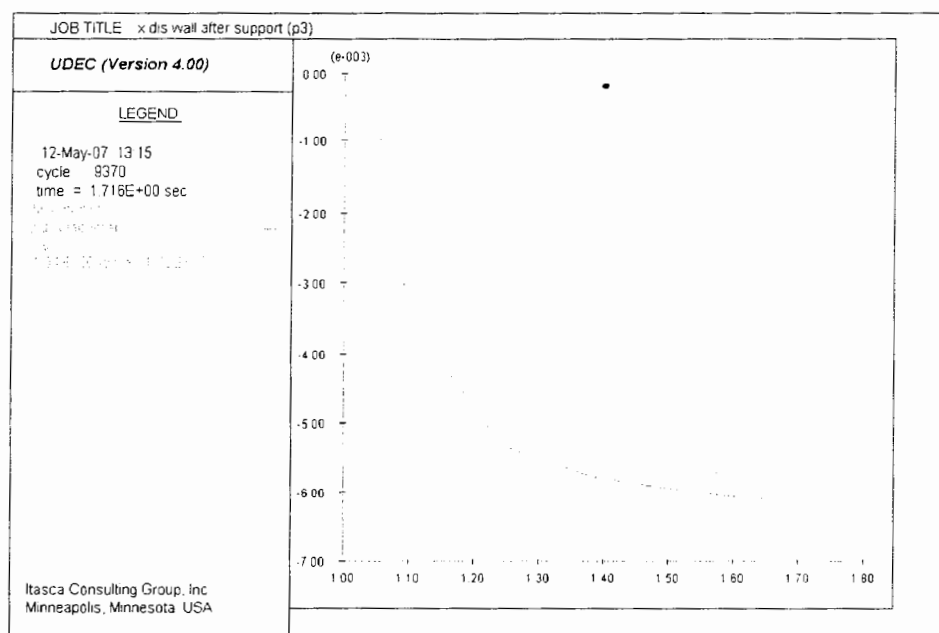
در این نمودارها مشاهده می شود، حداکثر جابجایی قائم در سقف تونل در مقطع حداکثر روباره ۱۴/۷ میلیمتر و در دیواره برابر ۶/۱ میلیمتر می باشد.

شکل ۶-۲۷ مربوط به وضعیت نقاط پلاستیک اطراف تونل در مقطع حداکثر روباره پس از نصب سیستم نگهدارنده می باشد. همانگونه که مشاهده می شود نسبت به حالت قبل از نصب سیستم نگهداری، وضعیت این نقاط بسیار بهبود یافته و شکست کششی وجود ندارد و سطوح تسلیم در این مقطع به حداقل رسیده است.

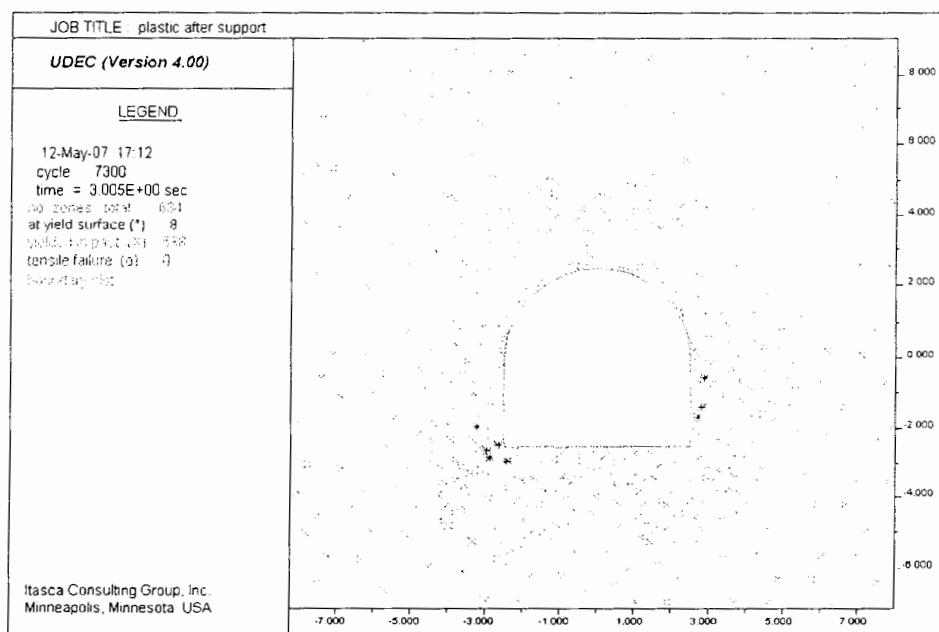


شکل ۶-۲۵- جابجایی قائم در سقف تونل در مقطع حداکثر روباره پس از نصب سیستم نگهداری

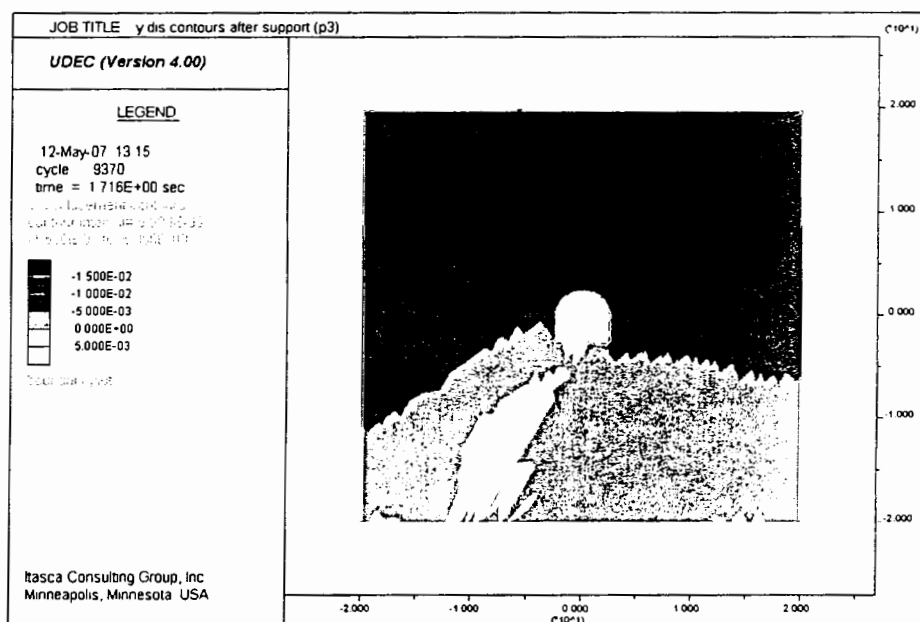




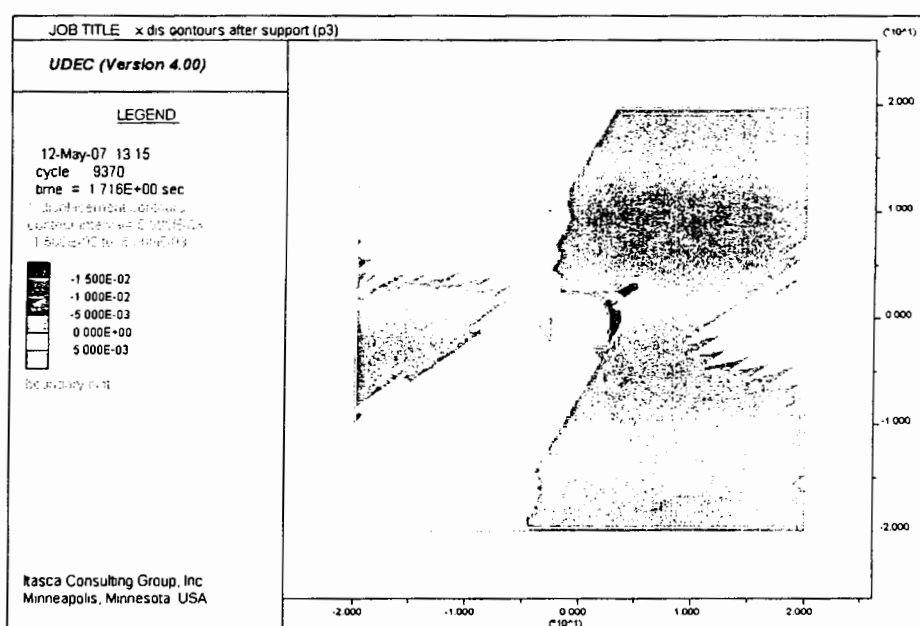
شکل ۶-۲۶- جابجایی افقی در دیواره تونل در مقطع حداکثر روباره پس از نصب سیستم نگهداری



شکل ۶-۲۷- نقاط پلاستیک اطراف تونل پس از نصب سیستم نگهداری در مقطع حداکثر روباره



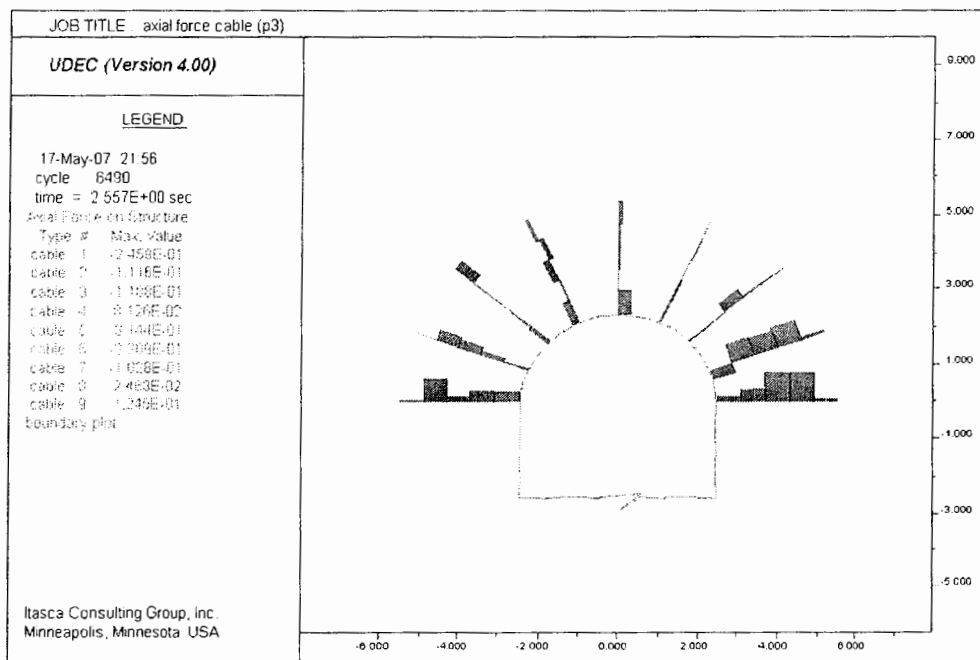
شکل ۶-۲۸- نمودار تراز جابجایی قائم در مقطع حداکثر روباره پس از نصب سیستم نگهداری



شکل ۶-۲۹- نمودار تراز جابجایی افقی در مقطع حداکثر روباره پس از نصب سیستم نگهداری

در مسیر تونل از پیچ سنگ با قطر ۲۵ میلیمتر، مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال، با مقاومت برشی دوغاب ۱/۷۵ مگاپاسکال و سختی برشی دوغاب ۷/۰۱ گیگاپاسکال (قطر چال حفاری برای پیچ سنگ ۵۶ میلیمتر در نظر گرفته شده است). با فاصله داری ۱×۱ متر در مقطع حداکثر روباره، به همراه شاتکریت با ضخامت های مختلف در طول مسیر و ضخامت ۱۵ سانتیمتر در این مقطع، با مقاومت فشاری تک محوری ۳۵ مگاپاسکال، مدول الاستیک ۲۱ گیگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۲۵ و دانسیته ۲۲۰۰ کیلو گرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.

در جدول ۳-۶ نتایج بدست آمده از نرم افزار در ارتباط با نیروهای محوری، برشی و لنگر خمشی وارده به پیچ سنگ و شاتکریت آورده شده است. به عنوان نمونه نمودارهای مربوط به سیستم نگهداری برای مقطع حداکثر روباره، در شکل های ۳۰-۶ تا ۳۸-۶ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل زیر دیده می شود، حداکثر نیروی محوری وارد شده به پیچ سنگ ها در این مقطع معادل ۰/۳۶۷ مگا نیوتن می باشد.

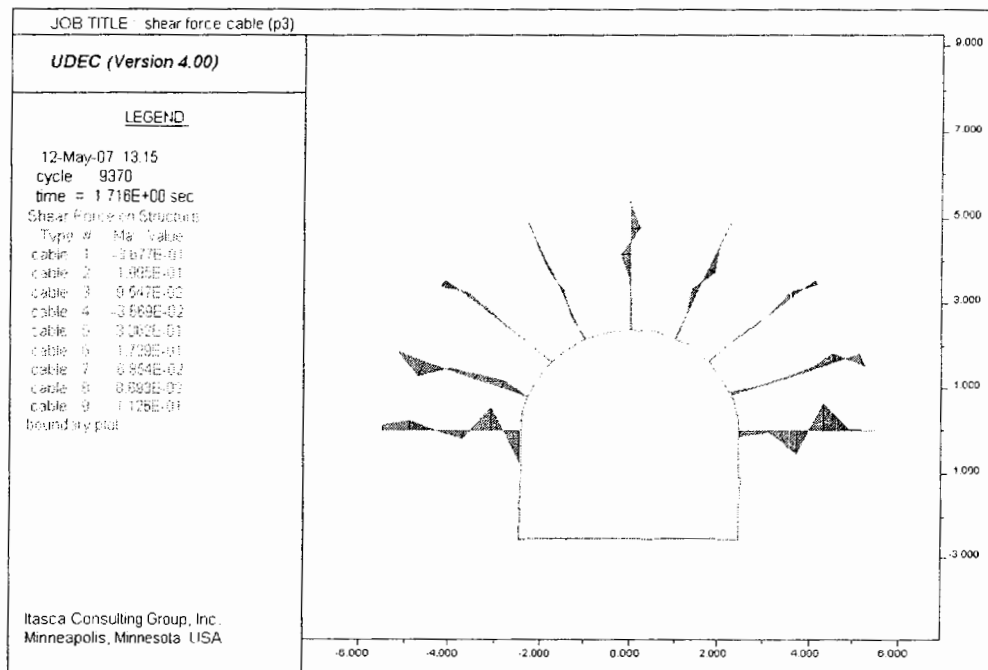


شکل ۳۰-۶- نیروهای محوری وارد بر پیچ سنگ های مقطع حداکثر روباره

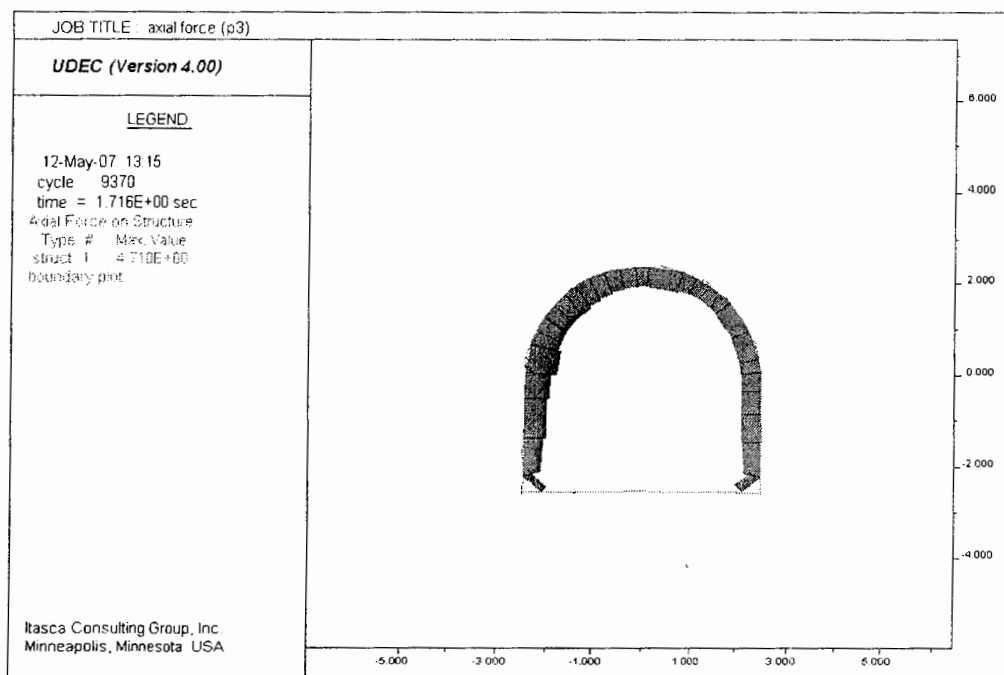
جدول ۶-۳- خروجی مستقیم نرم افزار در ارتباط با نیروهای وارد شده به اجزای سیستم نگهداری

(نوع سیستم نگهداری هر قسمت در جدول ۶-۲ موجود می باشد)

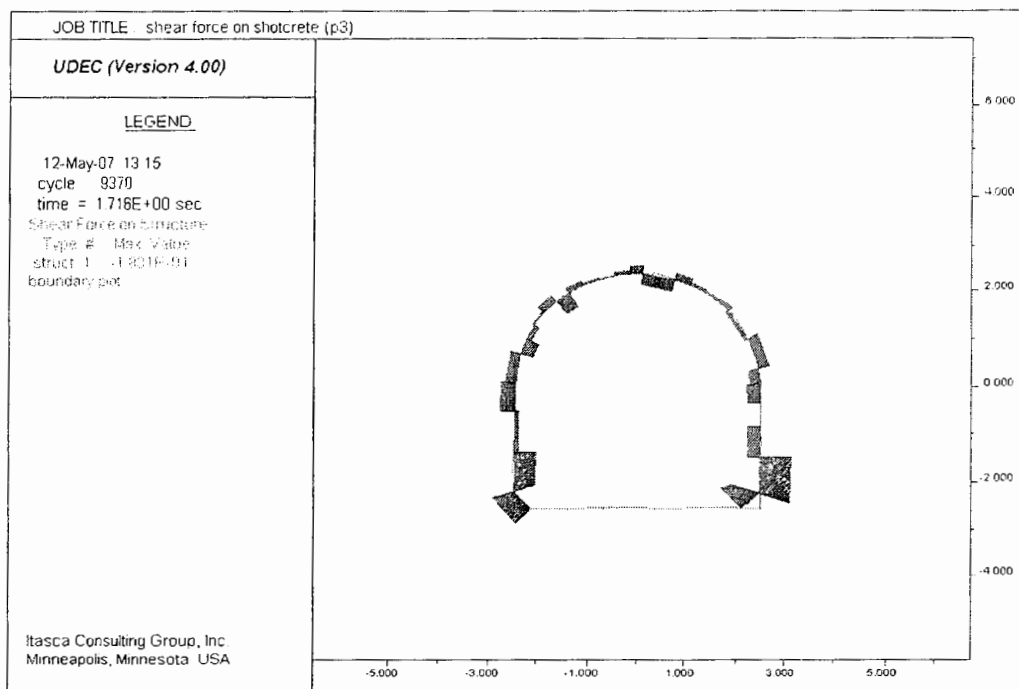
قسمت	حداکثر نیروی برشی در پیچ سنگ (MN)	حداکثر نیروی برشی بر لایه شاتکریت (MN)	حداکثر لنگر خمشی بر لایه شاتکریت (MN-m)	حداکثر نیروی برشی بر لایه شاتکریت (MN)	حداکثر نیروی محوری در پیچ سنگ (MN)
1	8.3e-2	7.1e-1	3.8e-2	8e-2	7.2e-2
2	2.38e-1	2.7	8.9e-2	1.7e-1	2.31e-1
3	3.67e-1	4.7	7.8e-2	1.83e-1	2.46e-1
4	2.7e-1	3.7	7.6e-2	2.3e-1	2.4e-1
5	1.96e-1	2.84	6.5e-2	2.07e-1	2.1e-1
6	7.07e-2	1.08	1.35e-2	3.34e-2	8.39e-2
7	7.75e-2	8.1e-1	1.9e-3	5.4e-3	8.8e-2
8	4e-2	3.8e-1	9.21e-3	2.75e-2	4.26e-2
9	1.9e-1	2.84	7.1e-2	1.9e-1	2.2e-1
10	2.2e-1	2.7	8.5e-2	1.9e-1	2.3e-1
11	1.94e-1	2.82	8.4e-2	1.8e-1	2.3e-1
12	6.7e-2	9.7e-1	1.12e-2	3.8e-2	7.9e-2
13	2.4e-1	1.48	9.6e-3	3.7e-2	2.6e-1
14	7.1e-2	1.05	1.3e-2	3.4e-2	8.3e-2
15	2.4e-1	1.48	9.6e-3	3.7e-2	2.6e-1
16	1.7e-1	6.8e-1	6.8e-3	2.8e-2	1.96e-1
17	2.4e-1	1.43	9.6e-3	3.8e-2	2.5e-1
18	1.9e-1	7.3e-1	8.7e-3	2.4e-2	2.1e-1
19	1.9e-1	7.3e-1	8.7e-3	2.4e-2	2.1e-1
20	4.4e-2	8.7e-1	1.1e-2	3.5e-2	4.5e-2
21	4.1e-2	3.8e-1	9.21e-3	2.75e-2	4.2e-2
22	4.4e-2	6.6e-1	1.7e-2	5.96e-2	4.4e-2
23	4.1e-2	3.8e-1	9.21e-3	2.75e-2	4.2e-2



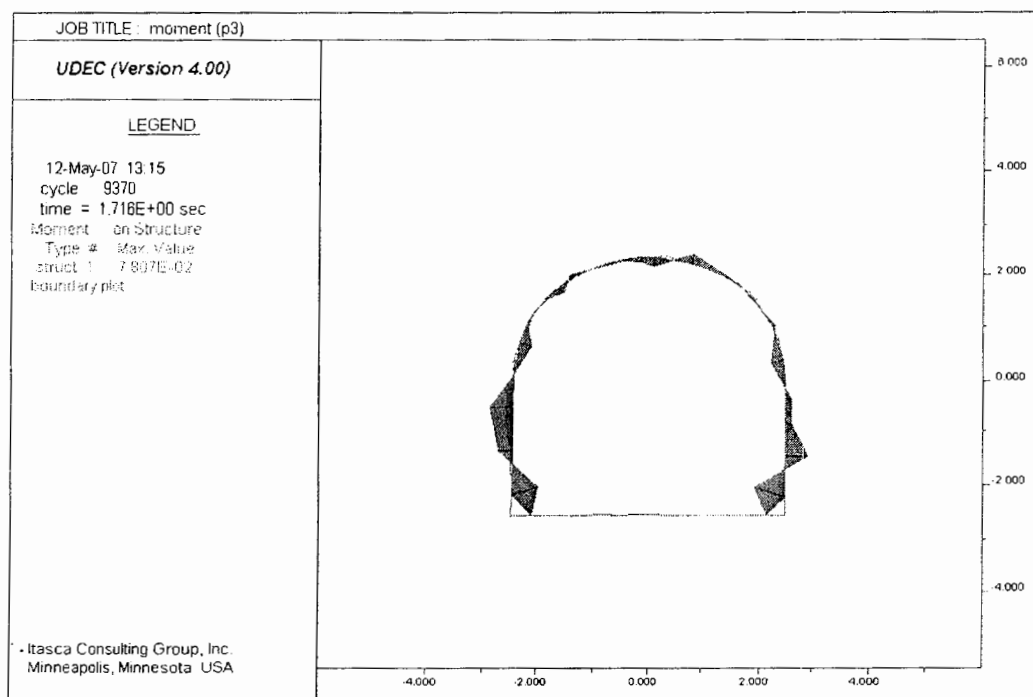
شکل ۶-۳۱- نیروی برشی وارد بر پیچ سنگ های مقطع حداکثر روباره



شکل ۶-۳۲- نیروهای محوری وارد بر لایه شاتکریت در مقطع حداکثر روباره



شکل ۳۳-۶- نیروی برشی وارد بر لایه شاتکریت در مقطع حداکثر روباره



شکل ۳۴-۶- لنگر خمشی وارد بر لایه شاتکریت در مقطع حداکثر روباره

#### ۶-۵-۴- محاسبه ضرایب ایمنی برای عناصر بکار رفته در سیستم نگهدارنده

با دانستن نیروهای محوری، برشی و لنگر خمشی وارد بر پیچ سنگ ها و لایه شاتکریت به کمک نرم افزار در مقاطع مختلف مسیر تونل، ضرایب ایمنی مطابق با فرمولهای موجود، قابل محاسبه می باشد. این محاسبات برای عناصر بکار رفته در سیستم نگهداری بیست و سه قسمت تحلیل شده مسیر در جدول ۴-۶ موجود می باشد. برای آشنا شدن با فرمولها و نحوه محاسبه این ضرایب، برای مقطع حداکثر روباره این کار صورت گرفته است.

#### - محاسبه ضریب ایمنی پیچ سنگ در برابر کشش

$$SFb = F1 / F2 = 0.285 / 0.246 = 1.16 \quad (۸-۶)$$

F1: مقاومت کششی پیچ سنگ بر حسب مگا نیوتن

F2: حداکثر نیروی محوری وارد شده بر پیچ سنگ بر حسب مگا نیوتن (که مستقیماً از نتایج

نرم افزار بدست می آید).

SFb: ضریب ایمنی کششی پیچ سنگ

#### - محاسبه ضریب ایمنی شاتکریت در برابر نیروهای برشی

$$\tau_v = 1.5 Q / t.z = 1.5 \times 0.183 / 0.15 \times 1 = 1.83 \text{ Mpa} \quad (۹-۶)$$

$$SFv = tB / \tau_v = 4 / 1.83 = 2.19 \quad (۱۰-۶)$$

که در آن :

$\tau_v$ : حداکثر تنش برشی وارد بر لایه شاتکریت بر حسب مگا پاسکال

Q: حداکثر نیروی برشی وارد بر لایه شاتکریت بر حسب مگا پاسکال (که مستقیماً از نتایج

نرم افزار بدست می آید).

t: ضخامت لایه شاتکریت بر حسب متر

Z: عرض لایه شاتکریت بر حسب متر

tB: تنش برشی مجاز شاتکریت مصرفی بر حسب مگا پاسکال

SFv: ضریب ایمنی شاتکریت در برابر برش

جدول ۴-۶- محاسبه ضرایب ایمنی برای عناصر بکار رفته در سیستم نگهدارنده

قسمت	ضخامت شاتکریت (سانتی متر)	ضریب ایمنی برشی شاتکریت	ضریب ایمنی بیج سنگ در برابر کشش
۱	۱۲	۴	۳/۹۶
۲	۱۵	۲/۳۵	۱/۲۳
۳	۱۵	۲/۱۹	۱/۱۶
۴	۱۵	۱/۷۴	۱/۱۹
۵	۱۵	۱/۹۳	۱/۳۶
۶	۷/۵	۵/۹۸	۳/۳۹
۷	۵	۲۴/۷	۳/۲۴
۸	۷/۵	۷/۲۷	۶/۷۹
۹	۱۵	۲/۱	۱/۲۹
۱۰	۱۵	۲/۱	۱/۲۴
۱۱	۱۵	۲/۲	۱/۲۴
۱۲	۷/۵	۵/۲۶	۳/۶
۱۳	۷/۵	۵/۴	۱/۱
۱۴	۷/۵	۵/۸۸	۳/۴۳
۱۵	۷/۵	۵/۴	۱/۱
۱۶	۷/۵	۷/۱۴	۱/۵
۱۷	۷/۵	۵/۲۶	۱/۱۴
۱۸	۷/۵	۸/۳۳	۱/۳۶
۱۹	۷/۵	۸/۳۳	۱/۳۶
۲۰	۷/۵	۵/۷۱	۶/۳
۲۱	۷/۵	۷/۲۱	۶/۷۹
۲۲	۷/۵	۳/۳۹	۶/۴۸
۲۳	۷/۵	۷/۲۱	۶/۷۹



فصل هفتم

# نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۷-۱- نتیجه گیری

بر پایه پروفیل های موجود از ساختارهای زمین شناسی در مسیر تونل و براساس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، سنگهای مسیر تونل انتقال آب خدنگستان به بیست و سه قسمت یا ناحیه ساختاری تقسیم و پارامترهای ژئومکانیکی برای هر قسمت با توجه به نمونه های اخذ شده و مطالعه آماری ناپیوستگی ها، تعیین گردیده است. طبق این تقسیم بندی و به کمک روش های تجربی، تحلیلی و عددی، برای مسیر تونل تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت انجام شد و نتیجه این تحلیل ها و طراحی ها، مبنی بر همسویی تقریبی این روشها و ارائه نتایج تقریبا "مشابه می باشد. البته در برخی مقاطع در مورد سیستم نگهداری مورد نیاز، تفاوت های اندکی مشاهده می گردد که به دلیل ارجحیت روش های عددی به جهت بکار گیری حداقل فرضیات در این روش ها و دقیق تر بودن، بهتر است از نتایج این روش استفاده گردد.

منحنی مشخصه زمین (منحنی واکنش توده سنگ میزبان) یا منحنی GRC و منحنی مشخصه سیستم نگهداری در دستگاه فشار سیستم نگهداری - تغییر شکل شعاعی سنگهای اطراف تونل، برای سه مقطع ورودی، خروجی و مقطع حداکثر روباره، به دو روش تحلیلی و عددی رسم شد. نقطه تلاقی منحنی مشخصه سیستم نگهداری و منحنی مشخصه زمین، نقطه عملکردی است که بیان می کند به ازای مقدار مشخصی از تحمل بار سیستم نگهداری، تغییر شکل شعاعی سنگهای اطراف تونل چقدر می باشد. بنابراین با تحلیل چند نوع سیستم نگهداری، می توان برآوردی از سیستم نگهداری موقت تونل انجام داد. در این مورد نیز تکیه بر نتیجه روش عددی به دلایل ذکر شده در بالا، منطقی تر به نظر می رسد. البته تفاوت چشمگیری در منحنی های بدست آمده از روش تحلیلی و عددی دیده نمی شود و در این مورد نیز، همسویی روش های مختلف تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت تایید میگردد.

جهت شناسایی وضعیت نفوذ پذیری توده های سنگی در ترازهای مختلف گمانه ها، اقدام به انجام آزمایش لوژان با روش سینگل پکر در حین حفاری شده است، که نتایج غالبا "مبنی بر نفوذ

پذیری بسیار کم است. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات لوژان در تمام گمانه ها می توان اینطور استنباط کرد که در تمام طول مسیر تونل بدلیل عبور آن از تشکیلات سنگ آهک مارنی و بسته بودن درزه ها بوسیله رس یا کلسیت، نفوذپذیری بسیار پایین میباشد و لذا میتوان امیدوار بود که در مسیر تونل با هجوم ناگهانی آب برخورد نخواهد شد. از نتایج آزمایشات لوژان در عمق های کم می توان به این نتیجه رسید که آبهای زیرسطحی منطقه کلا" در لایه آبرفت رویی و قسمت های هوازده و ضعیف رویی سنگ بستر در جریان است و با توجه به نتایج بدست آمده و جنس غالب سنگ موجود (سنگ آهک مارنی) به هیچ عنوان نمی توان انتظار وجود شبکه های هدایت آب زیرزمینی (کارست) را در منطقه عبور تونل پیش بینی نمود. به همین دلیل در این پایان نامه مسئله آب در مدلسازی ها و تحلیل ها زیاد مورد توجه قرار نگرفته است، ولی در پروژه های مشابه اگر امکان برخورد با آب های زیر زمینی وجود داشت، حتما باید مورد توجه قرار گیرد، زیرا وجود آب و تاثیرات قابل توجه آن روی مقاومت توده سنگ و پایداری بلوک ها و پایداری تونل امری بسیار مهم می باشد.

در پروژه های تونلسازی، ارزیابی موقعیت و تعداد ناپیوستگی ها نقش مهمی را در تحلیل پایداری تونل و طراحی های لازم جهت تعیین سیستم نگهداری دایم و موقت ایفا میکند. این مشخصات شامل امتداد و شیب حقیقی ناپیوستگی ها و لایه بندی هستند که جهت بررسی پایداری تونل باید ابتدا شیب ظاهری این ناپیوستگیها در امتداد عمود بر محور تونل یعنی در سینه کارها محاسبه شود و سپس از آنها استفاده گردد. به همین دلیل در این پروژه در تعداد زیادی ایستگاه اقدام به برداشت خصوصیات ناپیوستگی ها شده است و سپس جهت استفاده در تحلیل ها، اقدام به محاسبه خصوصیات ظاهری آنها در امتداد سینه کارها، شده است.

شرایط ساختاری و زمین شناسی و ناپیوستگی های موجود در منطقه، در تطابق آن با اصول کلی عناصر مجزا، دلیل اصلی انتخاب نرم افزار UDEC در این تحقیق می باشد.

نرم افزار UDEC واکنش یک محیط ناپیوسته (به عنوان مثال سنگ تکتونیزه و شدیداً درزه دار) را در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی شبیه سازی می کند. این نرم افزار محیط سنگی را به

عنوان مجموعه ای از بلوکهای مجزا تعریف می کند که ناپیوستگی ها (مثل درزه ها) به عنوان شرایط مرزی بین بلوکی در آنها عمل می کنند و جابجاییهای برشی در امتداد این ناپیوستگی ها و نیز چرخش بلوک ها می تواند انجام گیرد. در این نرم افزار امکان تعریف بلوک ها به صورت صلب یا تغییر شکل پذیر وجود دارد. با توجه به هندسه مسیر و طول نسبتاً زیاد تونل نسبت به ابعاد آن، فرض رفتار کرنش صفحه ای، تقریب بسیار مناسبی از جواب واقعی خواهد بود. به همین دلایل، استفاده از این نرم افزار جهت تحلیل ها و طراحی سیستم نگهداری موقت در این تحقیق، تشخیص داده شد.

بدلیل تاثیر پذیری زیاد نرم افزار از پارامترها و اطلاعات ورودی، در انتخاب و تخمین این پارامترها دقت خاصی باید مبذول گردد. برخی از این پارامترهای ورودی مستقیماً در منطقه و یا آزمایشگاه قابل اندازه گیری می باشند، مانند: مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته ماده سنگ بکر و یا پارامترهای مربوط به ناپیوستگی ها مثل شیب و امتداد درزه ها و... که در گزارشات زمین شناسی و مطالعات ژئوتکنیکی پروژه موجود می باشد، اما برخی از پارامترهای ورودی به نرم افزار لازم است که توسط روابط و یا نرم افزارهایی که با استفاده از همین روابط کار می کنند، تعیین گردد. یکی از این نرم افزارها که برای تعیین یکسری ویژگیهای توده سنگ مانند مدول الاستیسیته توده سنگ و ... بکار می رود، نرم افزار RocLab می باشد که بر اساس معیار شکست هوک و براون کار می کند و از سری مجموعه نرم افزارهای Rocscience می باشد و در این تحقیق استفاده شد. نتیجه گیری نهایی در مورد سیستم نگهدارنده مورد نیاز برای قسمت های مختلف تونل انتقال آب خدنگستان، استفاده از پیچ سنگ های تزریقی به طول ۳ متر و قطر ۲۵ میلیمتر با فاصله داری ۱ تا ۱/۵ متر و شاتکریت با ضخامت های مختلف همراه با مش می باشد.

## ۷-۲- پیشنهادات

۱) از آنجا که داده های رفتار سنجی، ناشی از رفتار واقعی فضاهاى زیرزمینی و توده سنگ پیرامون آن در شرایط اجرایی می باشد، با آنالیز برگشتی این داده ها می توان پارامترهای ژئومکانیکی واقعی توده سنگ را ارزیابی نمود، به همین دلیل نصب سیستم های رفتار سنجی در زمان حفر تونل، پیشنهاد میگردد.

۲) به دلیل طول نسبتاً زیاد تونل (طول حدود ۱۲ کیلومتری)، در مورد روش حفاری با توجه به مزایای روش های حفر مکانیزه و نیمه مکانیزه نسبت به روش چال و انفجار که در حال حاضر در حفر این تونل بکار می رود، استفاده از ماشین حفر تونل (TBM)، پیشنهاد می گردد.

۳) انجام آزمایشهای برجا به منظور تعیین مقدار و راستای تنش های اصلی حداقل و حداکثر و مشخص کردن میزان دقیق  $K$  (نسبت تنش افقی به قائم) جهت انجام دقیق تر تحلیل ها، امر مهمی به نظر می رسد.

۴) تعیین زمان بهینه نصب سیستم نگهداری موقت بر اساس نتایج رفتار نگاری تونل، می تواند در مفید تر بودن سیستم نگهداری و حتی انتخاب سیستم نگهداری مناسب تر نقش مهمی ایفا کند.

# فهرست منابع

## فهرست منابع

- (۱) اکبری جور، حسین، ۱۳۷۸، گسترش یک سیستم تحلیل برگشتی به منظور تعیین مدول دگرشکلی و تنش های برجا با استفاده از روش المان محدود، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- (۲) امامی تبریزی، م، ۱۳۷۶، مطالعه و ارزیابی روشهای تعیین منحنی اندرکنش بین توده سنگ اطراف فضاهاى زیرزمینی و سیستم نگهدارنده، سمینار کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- (۳) ترابی، سید رحمان، ۱۳۸۰، مقدمه ای بر مکانیک سنگ، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- (۴) جعفری، احمد، ۱۳۸۴، کتاب تونل ایران، تهیه و تنظیم نشر فن مهندسی معدن - تهران.
- (۵) شرکت مهندسین مشاور زاینده آب، ۱۳۸۱، گزارش زمین شناسی، مطالعات مرحله اول سیستم انتقال آب خدنگستان.
- (۶) شرکت مهندسین مشاور زاینده آب، ۱۳۸۱، مطالعات ژئوتکنیک، تونل انتقال آب خدنگستان.
- (۷) ک. بایرون و ا. آریگلو، ترجمه: همتیان، جمال، ۱۳۷۶، طراحی سیستم های نگهداری در معادن، انتشارات موسسه نشر جهاد وابسته به جهاد دانشگاهی.
- (۸) مدنی، حسن، ۱۳۷۹، تونلسازی، جلد سوم، تحلیل پایداری، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- (۹) مدنی، حسن، ۱۳۸۱، تونلسازی، جلد چهارم، طراحی و اجرای سیستم نگهداری، انتشارات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۱۰) معظمی، مجید، ۱۳۸۲، اصول و طراحی نگهداری در تونلها، تالیف: فین، ژ، انتشارات دانشگاه صنایع و معادن ایران.

۱۱) وی. اس. وتوکوری و ک. کاتسویاما، ترجمه: فاروق حسینی، محمد، ۱۳۷۹، درآمدی بر مکانیک سنگ، انتشارات نشر کتاب دانشگاهی مرکز خدمات فرهنگی سالکان.

۱۲) هوک، کیسر، باودن، ترجمه: قارونی نیک، مرتضی، ۱۳۸۰، نگهداری حفاریات زیرزمینی در سنگ های سخت، موسسه علمی فرهنگی نص.

۱۳) هوک و براون، ترجمه: فهیمی فر، احمد، ۱۳۷۶، سازه های زیرزمینی در سنگ، انتشارات آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری.

۱۴) یاراحمدی، علیرضا، ۱۳۸۲، جزوه درسی نگهداری در معادن، انتشارات دانشگاه یزد.

15) Bieniawski Z. T, 1989, " Engineering Rock Mass Classifications ", Wiley – inter science Newyork, P.272.

16) Chang, Y., 1994, " Tunnel Support with Shotcrete in Weak Rock ".

17) Grimstad, E. and Barton, N., 1993, "Updating the Q system for NMT". In Proceedings of the international Symposium on Sprayed Concrete: " Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support ", Oslo , Norwegian concrete Assn.

18) Hock, E., Brown, E. T., 1982, " Underground Excavations in Rock ", IMM, London.

19) Hock, E. et al, 2002, " Hock – Brown Failure Criterion, 2000 Edition.

20) Hock, E.kaiser, P.K. Bawden, W.F., 1995, "Support of Underground Excavation in Hard Rocks ".



- 21) Itasca Consulting Group, 2004, " UDEC version 4.0 ", User manual.
- 22) Serafim, J. L. and Pereira, J. F., 1983, " Consideration of Geomechanics classification of Bieniawski, proc.Int, sym, Eng, geo and underground construction Lisbon, Vol.1, pp. II.33 – II.42.
- 23) Zhang, L., 2005, Engineering Properties of Rock, Elsevier Science, P 290,

پیوست ها



پیوست ۲) الف- جداول مربوط به رده بندی ژئومکانیکی سنگها (RMR). [15], [16]

الف) پارامترهای طبقه بندی و ارزش گذاری آنها

محدوده مقادیر					پارامتر	
برای این محدوده مقاومت فشاری تک محوره ترجیح داده می شود			۱ تا ۲	۲ تا ۴	بیش از ۸	شاخص مقاومت
۱ تا ۳	۱۰ تا ۲۰	۲۵ تا ۵۰	۵۰ تا ۱۰۰	۱۰۰ تا ۲۰۰	بیش از ۲۰۰	بار نقطه ای
۱ تا ۳	۱۰ تا ۲۰	۲۵ تا ۵۰	۵۰ تا ۱۰۰	۱۰۰ تا ۲۰۰	بیش از ۲۰۰	مقاومت فشاری
۱ تا ۳	۱۰ تا ۲۰	۲۵ تا ۵۰	۵۰ تا ۱۰۰	۱۰۰ تا ۲۰۰	بیش از ۲۰۰	تک محوری
۰	۱	۲	۴	۷	۱۲	ارزش عددی
کمتر از ۲۵٪			۲۵-۵۰٪	۵۰-۷۵٪	۷۵-۹۰٪	شاخص RQD
۳			۸	۱۳	۱۷	ارزش عددی
کمتر از ۰/۰۵ متر			۰/۰۵ تا ۰/۱	۰/۱ تا ۰/۳	۰/۳ تا ۱ متر	فاصله توری درزه ها
۵			۱۰	۲۰	۲۵	ارزش عددی
ضخامت مواد آکنده بیش از ۵ میلیمتر و بازشدگی بیش از ۵ میلیمتر، درزه ها ممتد			سطوح آینه ای با ضخامت کمتر از ۵ میلیمتر موازی آکنده ۱ تا ۵ میلیمتر، بازشدگی درزه ها ممتد	سطوح کمی جدایی دیواره کمتر از ۱ میلیمتر درزه ها نرم	سطوح کمی جدایی دیواره کمتر از ۱ میلیمتر درزه ها سخت	وضعیت ناپیوستگی
۰			۶	۱۲	۲۰	ارزش عددی
بیش از ۱۲۵ لیتر بر دقیقه			۱۲۵ تا ۲۵۰ لیتر بر دقیقه	کمتر از ۲۵ لیتر بر دقیقه	بدون آب یا	جریان آب در ۱۰ متر طول تونل
> ۰/۰۵			۰/۰۲-۰/۰۵	۰-۰/۰۲	۰	نسبت فشار در درز نسبت به تنش اصلی بزرگتر
یا			یا	یا	یا	شرایط عمومی
مشکلات فراوان در اثر آب			آب تحت فشار متوسط	فقط مرطوب	کاملاً خشک	ارزش عددی
۰			۴	۷	۱۰	

ب) تبدیل ارزش عددی برای جهت یابی درزه ها

خیلی مساعد	مساعد	متناسب	مساعد (مطلوب)	خیلی مساعد	راستا و جهت میل درزه ها
-۱۲	-۱۰	-۵	-۲	۰	تونل ها
-۲۵	-۱۵	-۷	-۲	۰	بسی ها
-۶۰	-۵۰	-۲۵	-۵	۰	شهرواتی ها

ج) رده و کلاس توده سنگ که بر اساس ارزش عددی کل تعیین می شود

ارزش عددی	۸۱-۱۰۰	۶۱-۸۰	۴۱-۶۰	۲۱-۴۰	۰-۲۰
کلاس	I	II	III	IV	V
شرح و توصیف	سنگ خیلی خوب	سنگ خوب	سنگ مناسب	سنگ ضعیف	سنگ خیلی ضعیف

د) نقش شیب و امتداد ناپیوستگی ها در تونلسازی

زاویه شیب ۰ تا ۲۰ درجه بدون توجه به امتداد	امتداد عمود بر محور تونل		امتداد موازی محور تونل			
	زاویه شیب هم جهت با پیشروی		زاویه شیب خلاف جهت با پیشروی			
	زاویه میل	زاویه میل	زاویه میل	زاویه میل	زاویه شیب	زاویه شیب
	۴۵-۹۰	۲۰-۴۵	۴۵-۹۰	۲۰-۴۵	۴۵-۹۰	۲۰-۴۵
	خیلی مساعد	مساعد	مناسب	نامساعد	خیلی نامساعد	مناسب
	نامساعد					

ه) شرایط ناپیوستگی ها

طول ناپیوستگی (گسترش ناپیوستگی)	کمتر از ۱ متر	۱ تا ۳ متر	۳ تا ۱۰ متر	۱۰ تا ۲۰ متر	بیش از ۲۰ متر
بازشدگی (شکاف)	ندارد	کمتر از ۰/۱ میلیمتر	۰/۱ تا ۱ میلیمتر	۱ تا ۵ میلیمتر	بیش از ۵ میلیمتر
زبری	خیلی زبر	زبر	کمی زبر	صاف	صیقلی
پزشدگی (حرد شدگی)	ندارد	پرکننده سخت کمتر از ۵ میلیمتر	پرکننده سخت بیش از ۵ میلیمتر	پرکننده نرم کمتر از ۵ میلیمتر	پرکننده نرم بیش از ۵ میلیمتر
هوازدهی	هوازده	کمی هوازده	هوازدهی متوسط	هوازدهی کمی زیاد	متلاشی شده

پیوست ۲) باجداول مربوط به رده بندی NGI (Q)

الف) امتیاز مربوط به پارامتر  $J_n$

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

ب) امتیاز مربوط به پارامتر  $J_r$

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

ج) امتیاز مربوط به پارامتر  $J_a$  (در شرایطی که سطوح درزه با هم تماس داشته باشند)

امتیاز	شرح
۰/۷۵	در صورت وجود ماده پرکننده، این مواد بخوبی به هم جوش خورده و سخت، ناتراوا و مستحکم باشند مثل کوارتز
۱	دیواره‌های درزه دگرسان نشده‌اند، تنها سطوح آن کمی دگرسان شده‌اند.
۲	دیواره‌های درزه کمی دگرسان شده، پوششی از کانی‌های مستحکم مثل ماسه، بدون وجود رس
۳	پوشش سیلتی یا ماسه‌های رسی همراه با کمی رس.
۴	پوشش کانیهای رسی و کم اصطکاک مثل کائولینیت یا میکا، کلریت، تالک و غیره و کمی رسهای آماسی

د) امتیاز مربوط به پارامتر  $J_w$

امتیاز	فشار تقریبی آب (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	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 همراه با شسته شدن مواد پر کننده بطور موضعی.
۰/۵	۲/۵ تا ۱۰	جریان آب با فشار زیاد، در سنگهای مستحکم درزه‌های فقد مواد پر کنندم.
۰/۳۳	۱۰ تا ۲/۵	جریان آب با فشار زیاد همراه با شسته شدن قابل ملاحظه مواد پر کنندم.
۰/۲ تا ۰/۱	بیشتر از ۱۰	جریان آب با فشار فوق العاده زیاد که در طول زمان تقلیل می یابد.
۰/۱ تا ۰/۰۵	بیشتر از ۱۰	جریان آب با فشار فوق العاده زیاد که در طول زمان تقلیل قابل ملاحظه‌ای نیابد.

ه) امتیاز مربوط به پارامتر SRF برای سنگهای روان و آماسی

امتیاز	شرح
۱۰ تا ۵	سنگهای روان (که سیلان آنها همراه با افزایش حجم نیست)
۲۰ تا ۱۰	سیلان و فشار اندک
	سیلان و فشار زیاد
۱۰ تا ۵	سنگهای آماسی (که سیلان آن همراه با افزایش حجم است)
۱۵ تا ۱۰	سیلان و فشار اندک
	سیلان و فشار زیاد

TABLE 3.1 Q-System: Support Measures for Q Range 10 to 1000\*

Support Category	Q	Conditional Factors		Span/ESR (m)	$P^0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Span ESR (m)	Type of Support	Notes (Table 5.6)
		RQD/ $J_n$	$J_1, J_2$					
1 <sup>c</sup>	1000-400				<0.01	20-40	sb (utg)	
2 <sup>c</sup>	1000-400				<0.01	30-60	sb (utg)	
3 <sup>c</sup>	1000-400				<0.01	46-80	sb (utg)	
4 <sup>c</sup>	1000-400				<0.01	65-100	sb (utg)	
5 <sup>c</sup>	400-100				0.05	12-30	sb (utg)	
6 <sup>c</sup>	400-100				0.05	19-45	sb (utg)	
7 <sup>c</sup>	400-100				0.05	30-65	sb (utg)	
8 <sup>c</sup>	400-100				0.05	48-88	sb (utg)	
9	100-40	≥20			0.25	8.5-19	sb (utg)	
		<20					B (utg) 2.5-3 m	
10	100-40	≥30			0.25	14-30	B (utg) 2-3 m	
		<30					B (utg) 1.5-2 m + clm	
11 <sup>c</sup>	100-40	≥30			0.25	23-48	B (tg) 2-3m	
		<30					B (tg) 1.5-2 m + clm	
12 <sup>c</sup>	100-40	≥30			0.25	40-72	B (tg) 2-3m	
		<30					B (tg) 1.5-2 m + clm	
13	40-10	≥10	≥1.5		0.5	5-14	sb (utg)	I
		≥10	<1.5				B (utg) 1.5-2 m	I
		<10	≥1.5				B (utg) 1.5-2 m	I
		<10	<1.5				B (utg) 1.5-2 m + S 2-3 cm	I
14	40-10	≥10		≥15	0.5	9-23	B (tg) 1.5-2 m + clm	I, II
		<10		≥15			B (tg) 1.5-2 m + S (mr) 5-10 cm	I, II
				<15			B (utg) 1.5-2 m + clm	I, III
15	40-10	>10			0.5	15-40	B (tg) 1.5-2 m + clm	I, II, IV
		<10					B (tg) 1.5-2 m + S (mr) 5-10 cm	I, II, IV
16 <sup>c,d</sup>	40-10	>15			0.5	30-65	B (tg) 1.5-2 m + clm	I, V, VI
		<15					B (tg) 1.5-2 m + S (mr) 10-15 cm	I, V, VI

\*After Barton et al. (1974).

<sup>b</sup>Approx.

<sup>c</sup>Original authors' estimates of support. Insufficient case records available for reliable estimation of support requirements. The type of support to be used in categories 1-8 will depend on the blasting technique. Smooth-wall blasting and thorough barring-down may remove the need for support. Rough-wall blasting may result in the need for single applications of shotcrete, especially where the excavation height is >25 m. Future case records should differentiate categories 1-8. Key: sb = spot bolting; B = systematic bolting; (utg) = untensioned, grouted; (tg) tensioned (expanding-shell type) for competent rock masses, grouted post-tensioned in very poor quality rock masses; S = shotcrete; (mr) = mesh-reinforced; clm = chain-link mesh; CCA = cast concrete arch; (sr) steel-reinforced. Bolt spacings are given in meters (m). Shotcrete or cast concrete arch thickness is given in centimeters (cm).

<sup>d</sup>See note XII in Table 5.6.

TABLE 3.2 Q-System: Support Measures for Q Range 1 to 10\*

Support Category	Q	Conditional Factors		Span/ESR (m)	$P^0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Span/ESR (m)	Type of Support	Notes (Table 5.6)
		RQD/ $J_n$	$J_1, J_2$					
17	10-4	>30			1.0	3.5-9	sb (utg)	I
		≥10, <30					B (utg) 1-1.5 m	I
		<10		≥6			B (utg) 1-1.5 m + S 2-3 cm	I
		<10		<6			S 2-3 cm	I
18	10-4	>5		≥10	1.0	7-15	B (tg) 1-1.5 m + clm	I, III
		>5		<10			B (utg) 1-1.5 m + clm	I
		<5		≥10			B (tg) 1-1.5 m + S 2-3 cm	I, III
		<5		<10			B (utg) 1-1.5 m + S 2-3 cm	I
19	10-4			≥20	1.0	12-29	B (tg) 1-2 m + S (mr) 10-15 cm	I, II, IV
				<20			B (tg) 1-1.5 m + S (mr) 5-10 cm	I, II
20 <sup>c</sup>	10-4			≥35	1.0	24-52	B (tg) 1-2 m + S (mr) 20-25 cm	I, V, VI
				<35			B (tg) 1-2 m + S (mr) 10-20 cm	I, II, IV
21	4-1	≥12.5	<0.75		1.5	2.1-6.5	B (utg) 1m + S 2-3 cm	I
		<12.5	<0.75				S 2.5-5 cm	I
			>0.75				B (utg) 1m	I
22	4-1	>10, <30	>1.0		1.5	4.5-11.5	B (utg) 1m + clm	I
		<10	>1.0				S 2.5-7.5 cm	I
		<30	<1.0				B (utg) 1 m + S (mr) 2.5-5 cm	I
		≥30					B (utg) 1 m	I
23	4-1			≥15	1.5	8-24	B (tg) 1-1.5 m + S (mr) 10-15 cm	I, II, IV, VII
				<15			B (utg) 1-1.5 m + S (mr) 5-10 m	I
24 <sup>c,d</sup>	4-1			≥30	1.5	18-46	B (tg) 1-1.5 m + S (mr) 15-30 cm	I, V, VI
				<30			B (tg) 1-1.5 m + S (mr) 10-15 cm	I, II, IV

\*After Barton et al. (1974).

<sup>b</sup>Approx.

<sup>c</sup>See note XII in Table 5.6.

<sup>d</sup>See footnote c in Table 5.2.



TABLE 5.5 Q-System: Support Measures for Q Range 0.1 to 1.0\*

Support Category	Q	Conditional Factors		Span/ESR (m)	P <sup>a</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )	Span/ESR (m)	Type of Support <sup>c</sup>	Notes (Table 5.6)
25	1.0-0.4	≥10 ≤10	>0.5		2.25	1.5-4.2	B (utg) 1 m + mr or clm	I
			>0.5				B (utg) 1 m + S (mr) 5 cm	I
			≤0.5				B (lg) 1 m + S (Mr) 5 cm	I
26	1.0-0.4				2.25	3.2-7.5	B (lg) 1 m + S (mr) 5-7.5 cm	VIII, X, XI
27	1.0-0.4			≥12	2.25	6-18	B (utg) 1 m + S 2.5-5 cm	I, IX
				<12			B (lg) 1 m + S (mr) 7.5-10 cm	I, IX
				>12			B (utg) 1 m + S (mr) 5-7.5 cm	I, IX
28 <sup>d</sup>	1.0-0.4			<12	2.25	15-38	CCA 20-40 cm + B (lg) 1 m	VIII, X, XI
				≥30			S (mr) 10-20 cm + B (lg) 1 m	VIII, X, XI
				≥20, <30			B (lg) 1 m + S (mr) 30-40 cm	I, IV, V, IX
				<20			B (lg) 1 m + S (mr) 20-30 cm	I, II, IV, IX
							B (lg) 1 m + S (mr) 15-20 cm	I, II, IX
29	0.4-0.1	>5 ≤5	>0.25		3.0	1.0-3.1	CCA (sr) 30-100 cm + B (lg) 1 m	IV, VIII, X, XI
			>0.25				B (utg) 1 m + S 2-3 cm	
			≤0.25				B (utg) 1 m + S (mr) 5 cm	
30	0.4-0.1	≥5 ≤5			3.0	2.2-6	B (lg) 1 m + S (Mr) 5 cm	
							B (lg) 1 m + S 2.5-5 cm	IX
							S (mr) 5-7.5 cm	IX
31	0.4-0.1	>4 ≤4, ≥1.5 ≤1.5			3.0	4-14.5	B (lg) 1 m + S (mr) 5-7.5 cm	VIII, X, XI
							B (lg) 1 m + S (mr) 5-12.5 cm	IX
							S (mr) 7.5-25 cm	IX
							CCA 20-40 cm + B (lg) 1 m	IX, XI
32 <sup>d</sup>	0.4-0.1			≥20	3.0	11-34	CCA (sr) 30-50 cm + B (lg) 1 m	VIII, X, XI
				<20			B (lg) 1 m + S (mr) 40-60 cm	II, IV, IX, XI
							B (lg) 1 m + S (mr) 20-40 cm	III, IV, IX, XI

\*After Barton et al. (1974).

<sup>a</sup>Approx.<sup>c</sup>For key, refer to Table 5.2, footnote c.<sup>d</sup>See note XII in Table 5.6.

TABLE 5.6 Q-System: Support Measures for Q Range 0.001 to 0.1\*

Support Category	Q	Conditional Factors		Span/ESR (m)	P <sup>a</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )	Span/ESR (m)	Type of Support <sup>c</sup>	Notes (Table 5.6)
33	0.1-0.01	≥2 ≤2			6	1.0-3.9	B (lg) 1 m + S (mr) 2.5-5 cm	IX
							S (mr) 5-10 cm	IX
							S (mr) 7.5-15 cm	VIII, X
34	0.1-0.01	≥2 ≤2	≥0.25		6	2.0-11	B (lg) 1 m + S (mr) 5-7.5 cm	IX
			>0.25				S (mr) 7.5-15 cm	IX
			<0.25				S (mr) 15-25 cm	IX
							CCA (sr) 20-60 cm + B (lg) 1 m	VIII, X, XI
35 <sup>d</sup>	0.1-0.01			≥15	6	6.2-28	B (lg) 1 m + S (mr) 30-100 cm	II, IX, XI
				≥15			CCA (sr) 60-200 cm + B (lg) 1 m	VIII, X, XI, XII
				<15			B (lg) 1 m + S (mr) 20-75 cm	IX, XI, XII
				<15			CCA (sr) 40-150 cm + B (lg) 1 m	VIII, X, XI, XII
36	0.01-0.001				12	1.0-2.0	S (mr) 10-20 cm	IX
							S (mr) 10-20 cm + B (lg) 0.5-1.0 m	VIII, X, XI
37	0.01-0.001				12	1.0-6.5	S (mr) 20-60 cm	IX
							S (mr) 20-60 cm + B (lg) 0.5-1.0 m	VIII, X, XI
38 <sup>e</sup>	0.01-0.001			≥10	12	4.0-20	CCA (sr) 100-300 cm	IX
				≥10			CCA (sr) 100-300 cm + B (lg) 1 m	VIII, X, II, XI
				<10			S (mr) 70-200 cm	IX
				<10			S (mr) 70-200 cm	VIII, X, III, XI

\*After Barton et al. (1974).

<sup>a</sup>Approx.<sup>c</sup>For key, refer to Table 5.2, footnote c.<sup>d</sup>See note XII in Table 5.6.<sup>e</sup>See note XIII in Table 5.6.

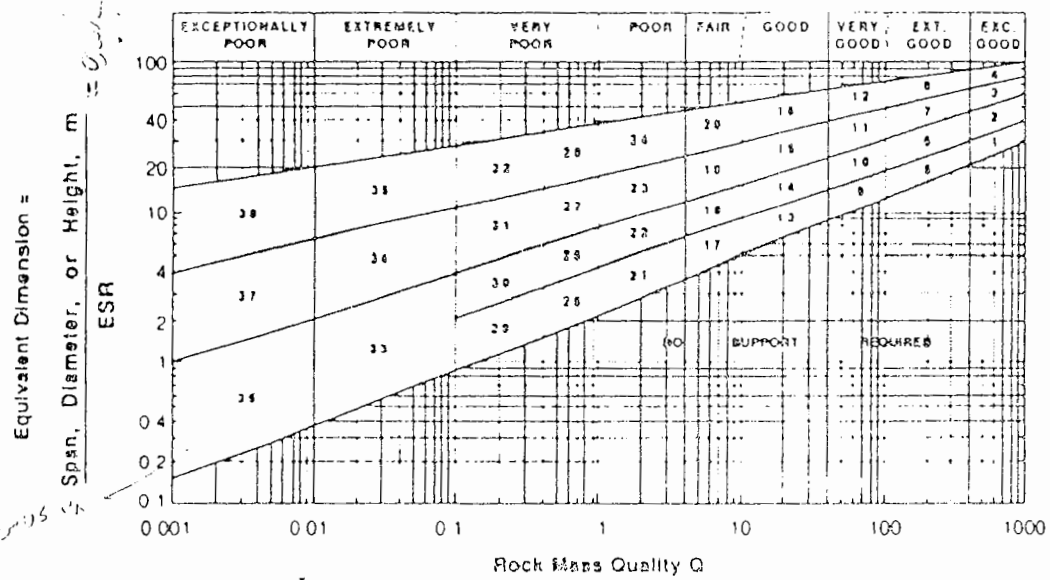


Figure 3.1 Q-system: equivalent dimension versus rock mass quality. (After Barton et al., 1974.)

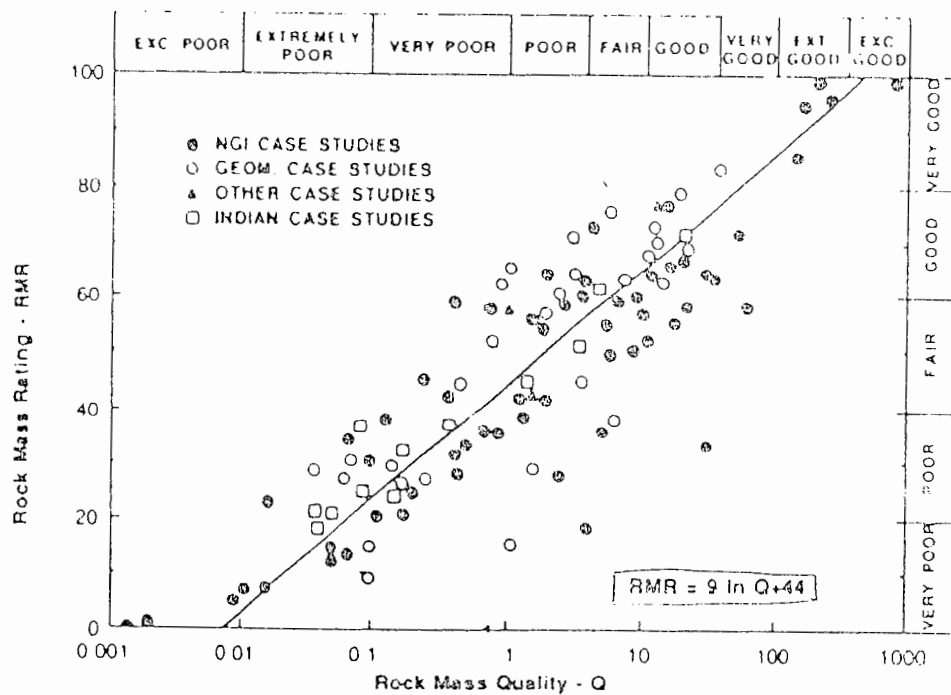


Figure 3.2 Correlation between the RMR and the Q-index. (After Bieniawski, 1976 and Jethwa et al., 1982.)

پیوست (۴) جدول ۴-۳ نتایج بدست آمده از آزمایشات لوزن در گمانه BKL

No.	depth (m)	Lug	CR %	RQD %	Flow Tape	Lithology
1	11.70-16.30	5.6	100	35-70	Turbulent	Gray, Marly Limestone Joint filling Calcite. Moderatly to highly weathered
2	16.0-21.0	14.79	100	18-50	Turbulent	same as above
3	20.55-25.55	2.25	100	30	Turbulent	same as above, slightly weathered
4	25.60-30.60	1.0	100	12-83	Dilation	same as above, Mod to slightly wtothered
5	30.50-35.50	0.11	100	60-80	Laminar	same as above, unweathered
6	35.00-40.00	0.05	100	73-77	Laminar	same as above
7	40.0-45.0	0.11	100	20-74	Laminar	Gray shaly Limestone. Unweathered, calcite fillings
8	45.00-50.00	1.0	95-100	30-77	Dilation	same as above
9	50.00-55.00	0.77	100	30-80	Laminar	same as above
10	55.0-57	0.82	100	40	Laminar	same as above

جدول ۴-ب - نتایج بدست آمده از آزمایشات لورن در گمانه BK2

No.	depth (m)	Lug	CR %	RQD %	Flow Tape	Lithology
1	7.15-12.15	31.7	100	75	Dilation	Dark gray, marly limestone. slightly weathered
2	12.0-17.0	1.7	100	50-85	Dilation	Light gray marly limestone slightly weathered to unweathered
3	17.0-22.0	0.57	100	33-58	Laminar	Brownish gray to gray, marly limestone mod. weathered to unweathered
4	22.0-27.0	1.16	100	30-50	Laminar	Dark gray marly limestone with stylolitic unweathered (fresh). no layering
5	27.0-32.0	2.2	100	10-85	Laminar	same as above
6	32.0-37.0	1.93	100	20-90	Turbulent	same as above. filled with calcite & clay, unweathered
7	37.0-42.0	0.63	90-100	0-35	laminar	same as above
8	42-47.10	4.2	100	10-85	Void filling	same as above
9	47.0-52.0	0.75	100	15-60	Dilation	same as above
10	52.0-57.15	0.57	100	30-65	laminar	same as above
11	57.15-62.25	0.99	100	0-50	Turbulent	same as above
12	62.25-67.75	4.0	100	22-82	Dilation	same as above
13	67.20-72.20	3.3	100	10-70	wash-out	same as above
14	72.20-77.2	0.59	100	20-50	laminar	same as above

جدول ۴-ج- نتایج بدست آمده از آزمایشات لوژن در گمانه BK3

No.	depth (m)	Lug	CR %	RQD %	Flow Tape	Lithology
1	48.10-53.10	0.42	100	82-94	laminar	Dark gray, marly limestone, slightly weathered to unweathered
2	58.50-63.50	0.62	100	40-60	Dilation	same as above, unweathered, filled with calcite and clay
3	68.0-73.0	0.56	100	32-50	void filling	same as above
4	75.30-80.30	0.54	100	30-65	laminar	same as above
5	79.70-84.70	0.85	100	62-93	void filling	same as above
6	85.50-90.50	0.68	100	52-65	void filling	same as above
7	89.90-94.90	0.65	100	78-85	Turbulent	same as above
8	94.0-99.0	0.68	100	81-96	void filling	same as above
9	99.0-104.0	0.52	100	24-90	void filling	same as above

جدول ۴- نتایج بدست آمده از آزمایشات لوژن در گمانه BK6

No.	depth (m)	Lug	CR %	RQD %	Flow Tape	Lithology
1	72.0-77.0	2.68	100	65-92	Laminar	Dark gray, marly limestone with calcite filling unweathered
2	77.0-82.0	0.84	100	0-90	Turbulent	same as above & calcite and clay filling
3	82.40-87.40	1.53	100	90-94	laminar	Dark gray marly limestone with calcite, unweathered
4	87.40-92.40	0.67	100	95	laminar	same as above
5	92.50-97.50	0.59	100	80-95	Laminar	same as above
6	97.40-102.4	0.69	66-100	30-40	laminar	Dark gray, marly limeston with shear breaks & calcite filling, unweathered
7	102.50-107.5	0.62	100	60-75	turbulent	same as above
8	107.0-113.0	0.71	100	50-79	Turbulent	Dark gray marly limeston with colcite, unweathered
9	113-118.20	0.71	100	30-80	Turbulent	Dark gray, marly limeston with shear breaks and calcite filling , No layering. unweathered

پیوست ۵) برنامه نوشته شده جهت مدلسازی part 1 توسط نرم افزار UDEC 4.0

```
config
round 0.040000003
edge 0.080000006
block -20.0,-20.0 -20.0,20.0 20.0,20.0 20.0,-20.0
crack -2.5,-2.5 2.5,-2.5
crack 2.5,-2.5 2.5,0.0
crack -2.5,-2.5 -2.5,0.0
arc (0.0,0.0) (2.5,0.0) 180.0 24
jset 30.0,0.0 60.0,0.0 0.0,0.0 1.3,0.7 0.0,0.0 0
jset 102.0,0.0 60.000004,0.0 0.0,0.0 1.3000001,0.0 0.0,0.0 0
gen edge 1.0 range -4.574258,5.009901 -5.1551156,4.719472
gen edge 2.0
group zone 'User:Marly Limestone'
zone model mohr density 0.0027 bulk 1173.8888 shear 880.4166 friction 38.0 cohesion 0.14
range group 'User:Marly Limestone'
joint model area jks 190.0 jkn 1900.0 nstable 0 jfriction 29.0 jcohesion 0.21 jtension 0 jdilation 0
zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -
2.5539575,2.784149 -2.5205295,-2.4812055
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -2.517299,-
2.4800322 -2.6134038,0.062210754
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -2.5890477,-
1.7980962 0.18279779,1.650452
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -1.9562865,-
1.0774516 1.6680287,2.0635045
```

```

joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -1.3762555,-
0.25134683 2.0371394,2.4941335
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -
0.1986168,0.65385306 2.2832134,2.6083822
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range
0.61869967,1.8051268 1.7647007,2.4853454
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range
1.6293598,2.2533326 1.0704211,1.8174307
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range
2.1039307,2.5081947 0.14764452,1.0792094
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range
2.4290993,2.5433478 -2.638262,0.15643299
set jmatdf=1
prop jmat=1 jks=190 jkn=1900 jfriction=29 jcohesion=0.21 nstable=0 jtension=0 jdilation=0
zdilation=0 jperm=0 ares=0 azero=0 empb=0 expa=0
change jmat=1 jcons=2
boundary stress 0.0,0.0,-0.53 range -20.910892,20.838285 19.458746,20.838285
boundary xvelocity 0.0 range -20.620462,-19.386139 -20.838285,20.69307
boundary xvelocity 0.0 range 19.313532,20.910892 -20.910892,21.056107
boundary yvelocity 0.0 range -21.128714,21.927393 -20.402641,-19.603962
set gravity=0.0 -9.81
solve ratio 1.0E-5
delete range -1.9711792,2.2630463 -2.504112,2.3392477
delete range -2.4911718,-1.837467 -2.4149704,-0.63213855
reset = disp
history ydis -0.0016646252,2.4699113
history xdis 2.4980705,-0.026654283
history ydis 0.64599514,2.3855612

```

(b)



```

solve step 120 ratio 1.0E-5
history ydis -0.0016646252,2.4699113
history xdis 2.4980705,-0.026654283
history ydis 0.64599514,2.3855612
solve step 120 ratio 1.0E-5
history ydis -0.0014302471,2.4648259
history xdis 2.4951782,-0.026707388
history ydis 0.6443284,2.378627
cable 0.0 2.4301648 0.0 5.4301648 6 5 4.906E-4 6
cable 1.4925771 1.9507139 3.610153 4.088267 6 5 4.906E-4 6
cable 2.4514794 0.39249754 5.36814 1.1316514 6 5 4.906E-4 6
cable -1.5239699 1.9307365 -2.8824148 4.6276493 6 5 4.906E-4 6
cable -2.4229407 0.492383 -5.419511 0.9119029 6 5 4.906E-4 6
property mat 5 cb_area 4.9E-4 cb_density 0.0075 cb_fstrain 1.0E10 cb_ycomp 10000.0 cb_yield
825 cb_ymod 210000.0 cb_thexp 0.0
property mat 6 cb_kbond 7012.0 cb_sbond 1.758
struct gen xc=0 yc=0 fang=-50 thet=280 thi=0.1 np=25 mat 7
property mat 7 st_density 0.0022 st_prat 0.25 st_ycomp 40.0 st_yield 2.0E-5 st_ymod 21000.0
st_yresid 10.0 st_thexp 1.0E-5 if_friction 45.0 if_cohesion 10000.0 if_tensile 10000.0 if_dilation
0.0 if_kn 1000.0 if_ks 1000.0
reset = disp
history ydis -0.0014302471,2.4648259
history xdis 2.4951782,-0.026707388
history ydis 0.6443284,2.378627
solve step 100000 ratio 1.0E-5

```

(c)

پیوست ۵) برنامه نوشته شده جهت مدلسازی part 3 توسط نرم افزار UDEC 4.0

```

config
round 0.040000003
edge 0.080000006
block -20.0,-20.0 -20.0,20.0 20.0,20.0 20.0,-20.0
crack -2.5,-2.5 2.5,-2.5
crack 2.5,-2.5 2.5,0.0
crack -2.5,-2.5 -2.5,0.0
arc (0.0,0.0) (2.5,0.0) 180.0 24
jset 37.0,0.0 59.999996,0.0 0.0,0.0 1.3000001,0.7 0.0,0.0 0
jset 61.0,0.0 60.000004,0.0 0.0,0.0 1.3,0.7 0.0,0.0 0
gen edge 1.0 range -5.227723,6.026403 -5.30033,5.30033
gen edge 2.0
group zone 'User:M Limestone'
zone model mohr density 0.00271 bulk 2949.4443 shear 2212.0833 friction 31.0 cohesion 0.9
range group 'User:M Limestone'
joint model area jks 570.0 jkn 5700.0 nstable 0 jfriction 29.0 jcohesion 0.21 jtension 0 jdilation 0
zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -2.5051816,-
2.4899905 -2.51521,0.11952934
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -2.4950075,-
2.4617488 0.20483328,0.4546778
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -2.4649937,-
2.4203787 0.4343982,0.61691445
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -2.4276807,-
2.1737802 0.6404386,1.2342248
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -2.3326788,-
1.6622534 1.2142987,1.8470598
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -1.7375821,-
1.1876826 1.8771913,2.0881116
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -1.3910701,-
0.14814651 2.1031775,2.5024195
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -
0.17827815,0.9215208 2.2613676,2.5099523
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range
0.81606066,1.6823406 1.8545926,2.472288
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range 1.5919464,2.07405
1.425219,1.8771912

```

(ع)

```

joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range
2.0062542,2.3452332 0.89038527,1.3574232
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range 2.119247,2.533555
-0.13408504,1.3950876
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range
2.4553392,2.5174854 -2.5517602,-0.39045376
joint model area jks 1000000.0 jkn 1000000.0 nstable 0 jfriction 0 jcohesion 1000000.0 jtension
1000000.0 jdilation 0 zdilation 0 jperm 0 ares 0 azero 0 empb 0 expa 0 range -
2.5781288,2.3310468 -2.5215266,-2.4864993
set jmatdf=1
prop jmat=1 jks=570 jkn=5700 jfriction=29 jcohesion=0.21 nstable=0 jtension=0 jdilation=0
zdilation=0 jperm=0 ares=0 azero=0 empb=0 expa=0
change jmat=1 jcons=2
boundary stress 0.0,0.0,-8.77 range -20.69307,20.620462 19.531355,20.620462
boundary xvelocity 0.0 range -20.838285,-19.531355 -20.9835,20.69307
boundary xvelocity 0.0 range 19.458746,20.838285 -20.9835,20.838285
boundary yvelocity 0.0 range -20.765678,20.838285 -20.475248,-19.386139
set gravity=0.0 -9.81
history unbal
solve ratio 1.0E-5
delete range -2.43571,2.449781 -2.5309052,2.0393925
reset = disp
history ydis 0.007989304,2.4103413
history xdis 2.5079005,-0.07401076
solve step 200 ratio 1.0E-5
solve step 20 ratio 1.0E-5
reset = disp
cable 0.0 2.378928 0.0 5.378928 6 5 4.906E-4 6
cable 0.9821057 2.1838179 2.2990997 4.8991013 6 5 4.906E-4 6
cable 1.7462873 1.6472647 4.08761 3.5495892 6 5 4.906E-4 6
cable 2.2990997 0.8668238 5.144457 1.8748933 6 5 4.906E-4 6
cable 2.4942098 0.0 5.5021586 0.0 6 5 4.906E-4 6
cable -0.9821057 2.1838179 -2.2990997 4.8991013 6 5 4.906E-4 6
cable -1.7462873 1.6472647 -4.08761 3.5495892 6 5 4.906E-4 6
cable -2.2990997 0.8668238 -5.144457 1.8748933 6 5 4.906E-4 6
cable -2.4942098 0.0 -5.5021586 0.0 6 5 4.906E-4 6
property mat 5 cb_area 4.9E-4 cb_density 0.0075 cb_fstrain 1.0E10 cb_ycomp 10000.0 cb_yield
825 cb_ymod 210000.0 cb_thexp 0.0
property mat 6 cb_kbond 7012.0 cb_sbond 1.758
struct gen xc=0 yc=0 fang=-50 thet=280 thi=0.15 np=25 mat 7
property mat 7 st_density 0.0022 st_prat 0.25 st_ycomp 40.0 st_yield 2.0E-5 st_ymod 21000.0
st_yresid 10.0 st_thexp 1.0E-5 if_friction 45.0 if_cohesion 10000.0 if_tensile 10000.0 if_dilation
0.0 if_kn 1000.0 if_ks 1000.0
history ydis 0.009730426,2.3886049
history xdis 2.4906042,-0.08069567
solve step 100000 ratio 1.0E-5

```

(e)

**Abstract:**

Zayanderood river is the most important river in dry region in center of Iran, which needs more water resources. So, after building of first and second Kohrang tunnels, building of third Kohrang tunnel, Cheshmelangan tunnel and finally Khadangstan water conveyance tunnel, increase the annual water inflow.

Khadangstan water conveyance complex include, five tunnels with total length of 9600 m and two channels with total length of 2550 m.

This tunnel has a horseshoe section with 5 m height and 5 m width in invert. In this thesis stability analysis and primary support system design implement by using of experimental methods (RMR , Q), analytical methods (analysing Rock-support system interaction) and numerical methods (by using of UDEC 4.0).

According to the results, for primary support system, compound of Shotcrete (with 5- 17.5 cm thickness) and Rocbolts (with 3 m length, 25 mm diameter and 1.5 m spacing) are introduced and finally, the safety factor of the support system was calculated.