



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن

# طراحی سیستم نگهداری تونل در تشکیلات مارنی مطالعه موردی: تونل انتقال آب بابلک (سد مخزنی البرز)

نگارنده:

سعید پورمهدی

استاد راهنما:

دکتر سید رحمان ترابی

استاد مشاور:

مهندس سید محمد اسماعیل جلالی

(بهار ۱۳۸۴)

الحَمْدُ لِلَّهِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ

## تقدیم به پدر و مادرم

## تشکر و قدردانی

از استاد راهنمای خود جناب آقای دکتر سید رحمان ترابی که اینجانب را در راه رسیدن به کمال مقصود راهنمایی نموده‌اند، تشکر می‌کنم.

از آقایان مهندس سید محمد اسماعیل جلالی و مهندس علیرضا اصغری، اساتید مشاور علمی و صنعتی اینجانب، که در نهایت تواضع هدایت کننده اینجانب در جهت مدلسازی و جمع‌آوری اطلاعات لازمه و تدوین پایان‌نامه بوده‌اند، سپاسگزارم.

جا دارد که از مهندس عبدالرضا یوسفی و مهندس آرش فتحی و دیگر عزیزانی که بنحوی در گردآوری پایان‌نامه به اینجانب کمک کردند، قدردانی نمایم.

در پایان از اساتید محترم دانشگاه صنعتی شاهرود، آقایان دکتر کاکلی و دکتر مرادزاده که کار داوری این تحقیق را بعهدہ داشتند، متشکر و سپاسگزارم.

## چکیده

سد البرز روی رودخانه بابل در فاصله ۴۰ کیلومتری شهرستان بابل استان مازندران واقع شده است. تونل انتقال آب بابلک به منظور انتقال آب رودخانه بابلک به پشت مخزن سد البرز و تامین بخشی از آب مورد نیاز این سد باید احداث گردد. از مشخصات این تونل طول ۲/۶ کیلومتری و عرض حفاری ۴/۲ متری با مقطع نعل اسبی است که با اجرای سیستم نگهداری دائمی، شکل نهایی آن دایروی می‌شود. از آنجا که تونل در تشکیلات مارنی احداث می‌شود، طراحی سیستم نگهداری تونل در این تشکیلات در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است.

جهت تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل از روشهای تجربی (RMR و Q)، تحلیلی (تحلیل اندرکنش سنگ - سیستم نگهداری) و عددی (نرم افزار FLAC3D) استفاده شده است. بر اساس نتایج، ترکیبی از شاتکریت به همراه توری سیمی با ضخامتهای مختلف (۷/۵ سانتی متر برای زون ورودی تونل و ۷/۵ تا ۱۵ سانتی متر برای زون خروجی تونل) و پیچ سنگ ۳ متری با فاصله‌داری ۱/۵×۱/۵ به عنوان سیستم نگهداری موقت و بتن مسلح به ضخامت ۴۰ سانتی متر به عنوان سیستم نگهداری دائمی پیشنهاد گردیده است.

صفحه	عنوان
۱	فصل اول - کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- ویژگی‌های تونل انتقال آب بابلک و سد البرز
۹	۳-۱- مروری بر کارهای انجام شده
۱۰	۴-۱- اهداف تحقیق و سازماندهی پایان نامه
۱۱	فصل دوم- زمین‌شناسی مهندسی و بررسی ژئومکانیکی ساختگاه تونل انتقال آب
۱۲	۱-۲- مقدمه
۱۲	۲-۲- سنگ‌شناسی مارن
۱۳	۳-۲- زمین‌شناسی منطقه طرح
۱۵	۴-۲- ژئومورفولوژی در محدوده احداث تونل انتقال آب
۱۵	۵-۲- چینه‌شناسی در محدوده احداث تونل انتقال آب
۱۶	۶-۲- زمین‌شناسی ساختمانی مسیر تونل انتقال آب
۱۸	۷-۲- وضعیت تورم لایه‌های مارنی
۲۰	۸-۲- بررسی گمانه‌های اکتشافی
۲۶	فصل سوم- برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس طبقه‌بندی توده‌سنگ
۲۷	۱-۳- مقدمه
۲۷	۲-۳- طبقه‌بندی توده‌سنگ
۳۲	فصل چهارم- برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس تحلیل اندرکنش سنگ...
۳۳	۱-۴- مقدمه
۳۳	۲-۴- محاسبه جابجایی زمین

۳۹	۳-۴- منحنی مشخصه سیستم نگهداری
۴۵	۴-۴- تحلیل منحنی عکس العمل سیستم نگهداری بر روی منحنی مشخصه زمین ...
۵۱	فصل پنجم- برآورد سیستم نگهداری موقت بر اساس روش عددی
۵۲	۱-۵- مقدمه
۵۲	۲-۵- روشهای عددی
۵۳	۳-۵- نرم افزار FLAC3D
۵۶	۴-۵- تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت تونل انتقال آب بابلک
۸۶	۵-۵- جمع بندی از نتایج مدلسازی عددی برای سیستم نگهداری موقت
۸۷	فصل ششم- برآورد سیستم نگهداری دائم بر اساس روش عددی
۸۸	۱-۶- مقدمه
۸۸	۲-۶- اصول شبیه سازی و اهداف آن در طراحی نگهداری دائمی تونل انتقال آب ...
۹۰	۳-۶- نتایج مدلسازی نگهدارنده دائمی برای تونل انتقال آب بابلک
۹۲	۴-۶- مدلسازی نگهداری دائمی برای تونل انتقال آب در زون $A (K=1/5)$
۹۹	۵-۶- آرماتور پیشنهادی برای مسیر تونل انتقال آب
۱۰۰	نتایج و پیشنهادات
۱۰۴	مراجع و منابع
۱۰۶	پیوستها

## فهرست اشکال

## صفحه

- شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی و راههای ارتباطی تونل انتقال آب بابلک ۴
- شکل ۱-۴- منحنی سیستم نگهداری ۳۹
- شکل ۲-۴- منحنی سیستم نگهداری و زمین برای توده سنگهای زون B ۴۶
- شکل ۳-۴- منحنی سیستم نگهداری و زمین برای توده سنگهای زون A ۴۷
- شکل ۴-۴- منحنی سیستم نگهداری و زمین برای توده سنگهای زون A (زون حداکثر ... ۴۸
- شکل ۱-۵- وضعیت تنشها در مدل ۶۲
- شکل ۲-۵- وضعیت مرزها در مدل ۶۲
- شکل ۳-۵- المان بندی مدل در نرم افزار ۶۳
- شکل ۴-۵- وضعیت جابجایی ها پس از حفر تونل و قبل از نصب نگهدارنده ۶۳
- شکل ۵-۵- حداکثر جابجایی قائم در سقف در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای ... ۶۴
- شکل ۶-۵- منحنی تراز جابجایی قائم در اطراف تونل در زون A قبل از نصب ... ۶۴
- شکل ۷-۵- حداکثر جابجایی افقی در دیواره در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ... ۶۵
- شکل ۸-۵- منحنی تراز جابجایی افقی در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای  $K=1/5$  ۶۵
- شکل ۹-۵- منحنی تراز تنش افقی در اطراف تونل در زون A قبل از نصب نگهدارنده ... ۶۶
- شکل ۱۰-۵- منحنی تراز تنش قائم در اطراف تونل در زون A قبل از نصب نگهدارنده ۶۶
- شکل ۱۱-۵- شمای مدل سه بعدی در مسیر تونل ۶۸
- شکل ۱۲-۵- وضعیت تونل در گام پنجم پیشروی و نصب نگهدارنده در گام چهارم ۶۹
- شکل ۱۳-۵- حداکثر جابجایی قائم در سقف در زون A (قبل از نصب نگهدارنده) ... ۷۶
- شکل ۱۴-۵- منحنی تراز جابجایی قائم در زون A (به ازای هر گام پیشروی) ... ۷۶
- شکل ۱۵-۵- حداکثر جابجایی افقی در دیواره در زون A (قبل از نصب نگهدارنده) ... ۷۹

- شکل ۵-۱۶- منحنی تراز جابجایی افقی در زون A (به ازای هر گام پیشروی) ... ۷۹
- شکل ۵-۱۷- شمای وضعیت تونل در حفر گام دوم پیشروی و نصب نگهدارنده برای ... ۸۰
- شکل ۵-۱۸- حداکثر جابجایی قائم در سقف در زون A (پس از نصب نگهدارنده) ... ۸۰
- شکل ۵-۱۹- حداکثر جابجایی افقی در دیواره در زون A (پس از نصب نگهدارنده) ... ۸۱
- شکل ۵-۲۰- منحنی تراز نیروی محوری بر لایه شاتکریت به ضخامت ۷/۵ سانتیمتر ... ۸۱
- شکل ۵-۲۱- منحنی تراز لنگر خمشی بر لایه شاتکریت به ضخامت ۷/۵ سانتیمتر در ... ۸۲
- شکل ۵-۲۲- حداکثر نیروی محوری بر پیچ‌سنگها در زون A به ازای هر گام پیشروی ۸۲
- شکل ۶-۱- شماتیک تنشها، نیروها و لنگر بر نگهدارنده دائمی تونل ۸۹
- شکل ۶-۲- وضعیت المان‌بندی اطراف تونل ۹۳
- شکل ۶-۳- وضعیت بردارهای جابجایی اطراف تونل در زون A به ازای  $K=1/5$  ۹۴
- شکل ۶-۴- جابجایی قائم در سقف در زون A پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای ... ۹۴
- شکل ۶-۵- منحنی تراز جابجایی قائم در زون A پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای ... ۹۵
- شکل ۶-۶- جابجایی افقی در دیواره در زون A پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای ... ۹۵
- شکل ۶-۷- منحنی تراز جابجایی افقی در زون A پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای ... ۹۶
- شکل ۶-۸- منحنی تراز نیروی محوری بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در زون A ... ۹۶
- شکل ۶-۹- منحنی تراز لنگر خمشی بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در زون A ... ۹۷
- شکل ۶-۱۰- منحنی تراز نیروی برشی بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در زون ... ۹۷
- شکل ۶-۱۱- منحنی تراز تنش مرزی نرمال بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در ... ۹۸
- شکل ۶-۱۲- منحنی تراز تنش مرزی برشی بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در ... ۹۸

صفحه	فهرست جداول
۶	جدول ۱-۱- برآورد آبدهی رودخانه بابلک در محل احداث تونل و محل اتصال آن به ...
۱۷	جدول ۱-۲- شیب و امتداد درزه‌ها در مسیر تونل انتقال
۱۷	جدول ۲-۲- وضعیت کلی درزه‌ها در مسیر تونل
۱۹	جدول ۳-۲- میانگین نتایج آزمایش حد روانی، حد خمیری و دامنه خمیری
۲۰	جدول ۴-۲- متراژ حفاری گمانه‌ها
۲۳	جدول ۵-۲- نتایج RQD در مسیر تونل انتقال
۲۴	جدول ۶-۲- پارامترهای ژئوتکنیکی مسیر تونل انتقال
۲۹	جدول ۱-۳- مقداردهی پارامترها در روش RMR برای دو زون سنگی
۳۱	جدول ۲-۳- مقداردهی پارامترها بر اساس روش Q برای دو زون ورودی و خروجی تونل
۴۵	جدول ۱-۴- اطلاعات لازم برای رسم منحنی مشخصه زمین برای سه مقطع
۵۷	جدول ۱-۵- اطلاعات لازم مدل موهر-کولمب برای سه مقطع
۵۸	جدول ۲-۵- میزان حداکثر جابجایی‌ها در سقف و دیواره تونل برای سه مقطع و به ...
۷۲	جدول ۳-۵- میزان جابجایی قائم در سقف و جابجایی افقی در دیواره قبل از نصب ...
۷۳	جدول ۴-۵- خروجی مستقیم نرم افزار پس از نصب نگهدارنده به ازای هر گام ...
۷۴	جدول ۵-۵- نتایج محاسبه شده پس از نصب نگهدارنده به ازای هر گام ...
۷۵	جدول ۶-۵- میزان جابجایی‌ها پس از نصب نگهدارنده در شرایط کرنش صفحه‌ای و به ...
۹۱	جدول ۱-۶- نتایج استخراج شده برای تونل انتقال آب با پوشش بتنی به ضخامت ...

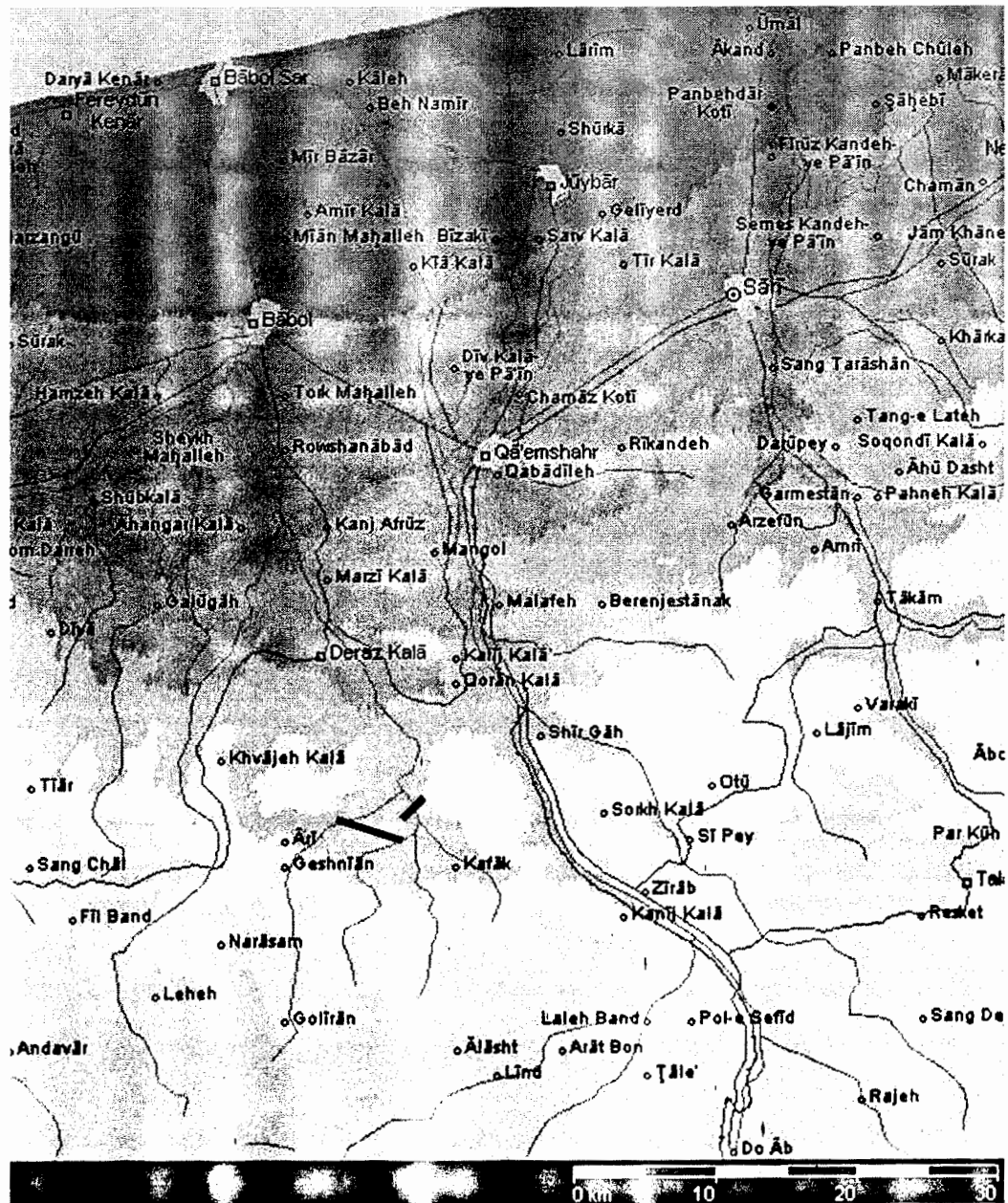
# فصل اول

## کلیات

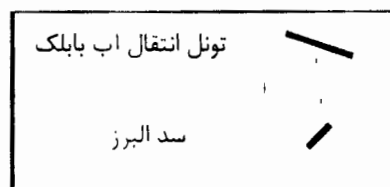
- از تغییراتی که در مسیر انتقال باعث ایجاد جریان گردابی مغشوش، ضربات هیدرولیکی و یا افت فشار خواهد شد، خودداری گردد [۱۷].
- از تغییرات ناگهانی در سطح مقطع پرهیز شود و قوسهای تونل بر مبنای اصول هیدرولیک ساخته شود [۱۷].

### ۱-۲- ویژگی‌های تونل انتقال آب بابلک و سد البرز

تونل انتقال آب بابلک، آب رودخانه بابلک را که پشت سد انحرافی بابلک جمع می‌شود به مخزن سد البرز هدایت می‌کند. موقعیت جغرافیایی و راههای ارتباطی تونل انتقال آب بابلک در شکل ۱-۱ آمده است.



شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی و راههای ارتباطی تونل انتقال آب بابلک



## ۱-۲-۱- تونل انتقال آب بابلک

به منظور تامین بخشی از آب مورد نیاز مخزن سد البرز، سدی انحرافی بر روی رودخانه بابلک در ۷۰۰ متری بالادست روستای تمر در نظر گرفته شده است. این سد انحرافی توسط تونلی آب رودخانه بابلک را به رودخانه بابل در بالادست محل سد اصلی البرز منتقل خواهد کرد.

راستای این تونل شمال غربی- جنوب شرقی و به طول ۲۶۰۰ متر می باشد. دهانه ورودی در ۷۰۰ متری بالادست روستای تمر و دهانه خروجی آن در محل روستای گالشکلا قرار خواهد گرفت. دسترسی به محل سد انحرافی و دهانه ورودی تونل از طریق کیلومتر ۴۳ جاده آسفalte از شهر بابل و یا کیلومتر ۲۷ جاده آسفalte از شهر شیرگاه و کیلومتر ۵ جاده آسفalte منشعب از جاده اصلی امکان پذیر است و دسترسی به خروجی تونل انتقال از طریق کیلومتر ۴۴ جاده آسفalte از شهر بابل و کیلومتر ۲۸ جاده آسفalte شهر شیرگاه و کیلومتر ۷ جاده خاکی از محل سد تا روستای گالشکلا، صورت می گیرد [۲].

طرح اولیه سد انحرافی بر روی رودخانه تراز و تونلی به طول ۵/۷ کیلومتر از این سد انحرافی تا مخزن سد البرز بود، اما به دلیل عدم توجیه اقتصادی با این طرح موافقت نشد [۲].

آزیموت تونل انتقال آب ۳۱۰ درجه از محل سد انحرافی بابلک تا بالادست شاخه باختری مخزن سد البرز پیش بینی شده است. با توجه به کمی ضخامت روباره بخش ابتدایی این مسیر از محل سد انحرافی تا ورودی تونل به طول ۱۲۰ متر به صورت کانال خواهد بود. تراز ورودی تونل ۳۰۷ متر و خروجی آن ۳۰۳ متر از سطح دریای آزاد است و شیب تونل ۰/۱۵۳ درصد می باشد [۲].

از آنجا که تراز تاج سد انحرافی بابلک از تراز سقف ورودی تونل بالاتر است، لذا به صراحت نمی توان گفت که این تونل آزاد عمل می کند و تحت فشار نخواهد بود ( هر چند که گزارش هیدرولوژی این رودخانه تحت فشار بودن تونل را نقض می کند). بنابراین بهتر است که در طراحی سیستم نگهداری، عامل تحت فشار بودن تونل را نیز در نظر گرفت.

## ۱-۲-۲- هیدرولوژی رودخانه بابلک

بعد از مطالعه رژیم آبدهی برای پتانسیل آبی رودخانه بابلک، احداث تونل انتقال به مخزن سد البرز محرز شد. میزان متوسط آبدهی این رودخانه ۲/۴ متر مکعب بر ثانیه مطابق جدول ۱-۱ است. حداکثر دبی آب (در طی یک دوره ۲۰ ساله) در فروردین ماه بوده که آنهم از ۴/۵ متر مکعب بر ثانیه تجاوز نمی‌کند. نقشه موقعیت جغرافیایی حوزه‌های آبریز منطقه از جمله محل سد البرز، رودخانه بابلک و تونل انتقال آب در پیوست شماره ۱ آمده است [۳].

جدول ۱-۱- برآورد آبدهی رودخانه بابلک در محل احداث تونل و محل اتصال آن به رودخانه بابل و سد البرز [۳].

رودخانه	ایستگاه	آبدهی (متر مکعب بر ثانیه)
بابل	قران تالار	۸/۵۱۹
بابلک	در محل تونل انتقال	۲/۳۹۴
بابلک	در محل اتصال به رودخانه بابل	۲/۷۹۴
بابل	سد البرز	۴/۴۳

## ۱-۲-۳- ساختگاه سد البرز

سد البرز روی رودخانه بابل (بابلرود) در فاصله ۴۰ کیلومتری شهرستان بابل استان مازندران در طول و عرض جغرافیایی  $36^{\circ} 14'$  و  $52^{\circ} 48'$  واقع شده است.

سد البرز یک سد خاکی سنگریزه‌ای<sup>۱</sup> با هسته رسی و ارتفاع ۷۸ متر و طول تاج ۸۳۱ متر می‌باشد. این سد بر روی یال جنوبی یک تاق‌دیس جای می‌گیرد. این یال به طور عمده از توده سنگهای مارنی کرتاسه تشکیل شده و بخشی از آن توسط نهشته‌های<sup>۲</sup> جوان پوشیده شده است. ارتفاع بستر رودخانه از سطح دریا ۲۳۱ متر و پهنای آن ۵۰ متر می‌باشد. پهنای دره در تراز نرمال

<sup>۱</sup> Rock fill

<sup>۲</sup> Deposit

بستر رودخانه از سطح دریا ۲۳۱ متر و پهنای آن ۵۰ متر می باشد. پهنای دره در تراز نرمال مخزن (ارتفاع ۳۰۱ متر از سطح دریا) حدود ۸۲۳ متر است. سنگ پی سد البرز از مارنهای توده‌ای کرتاسه بالایی تشکیل شده است. رخنمون این لایه ها در تکیه‌گاه راست و در محل محور سد نمایان است. در میان لایه‌های مارنی، لایه‌هایی به ضخامت نیم متر که بطور تقریبی به ماسه‌سنگ مارنی تبدیل شده‌اند، مشاهده می‌شود. از ویژگی‌های مهم زمین‌شناسی در این محل وجود گسلهای متعددی است که از محور سد یا با فاصله نزدیک از آن عبور می‌نماید. مهمترین این گسلها، گسله‌ای است که در فاصله ۵۰۰ متری پایین‌دست محور سد با راستای تقریبی شرقی- غربی از روستاهای نفت‌چال و پاشاکلا از دو سمت رودخانه عبور می‌کند. این گسل توسط گسلهای جوانتر شمال شرقی- جنوب غربی قطع شده است [۴].

#### ۱-۲-۴- ساختگاه سد انحرافی بابلک

این سد بتنی بر روی رودخانه بابلک به منظور انتقال آب این رودخانه به مخزن پشت سد با طول ۵۰ متر و عرض ۲۸ متر و ارتفاع ۲/۵ متر باید ساخته شود. موقعیت سد انحرافی با توجه به اختلاف ارتفاع لازم نسبت به محل خروجی تونل و نیز با در نظر گرفتن کوتاه‌ترین و بهترین شرایط موجود بر روی رودخانه بابلک در فاصله ۷۰۰ متری بالادست روستای تمر بر روی یال شمالی یک ناودیس در نظر گرفته شده است. سنگهای تشکیل‌دهنده در این محل بیشتر از جنس مارن و ماسه‌سنگ مارنی سبز تا خاکستری روشن همراه با میان لایه‌های کنگلومرایی مربوط به دوره میوسن می‌باشند. قسمت اعظم سد کاملاً پوشیده شده است اما رخنمون کوچکی از این نهشته‌ها در بالادست محور سد در ساحل راست قابل مشاهده است [۲].

#### ۱-۲-۵- حفاری در تونل انتقال آب بابلک

اگر سیستم چالزنی و آتشباری برای حفر تونل به کار رود از آنجا که آتشباری باعث توسعه درزه‌های موجود در سنگ خواهد شد و در کاهش مقاومت سنگ نیز موثر است، با وجود آب زیرزمینی

در منطقه، همواره با مشکل ریزش سنگ مواجه هستیم. بنابراین برای بالا بردن ایمنی در زمان حفر بهتر است از وسائل حفاری مکانیزه استفاده کنیم. دستگاه حفار بازویی<sup>۳</sup> که حفر تونل سرریز سد البرز هم توسط آن انجام شد، وسیله‌ای مناسب برای حفر تونل انتقال آب بابلک می‌باشد. عرض حفاری ۴/۲ متر با مقطع نعل اسبی در نظر گرفته شد. این مقطع حفاری با توجه به دبی کم آب در تونل، ابعاد دستگاه حفار و جانمایی همزمان آن با ماشین‌آلات دیگر، مناسب تشخیص داده شد.

#### ۱-۲-۶- سنگ‌شناسی در محدوده احداث تونل انتقال آب بابلک

سنگهای تشکیل‌دهنده مسیر از جنس مارن، ماسه‌سنگ مارنی همراه با میان لایه‌های کنگلومرا مربوط به دوره میوسن است.

بطور کلی وجود کانیهای رسی و میزان رطوبت در تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ نقش مهمی دارند. در مارنها خاصیت تورمی هم مشاهده می‌شود و بر همین اساس باید آزمایش فشار تورمی بر نمونه‌ها صورت گیرد. مشخص شده است که تورم به درصد آب، تخلخل، دانسیته، میزان هوازدگی و از همه مهمتر به مقدار کانی‌های رسی وابسته است [۴].

پارامترهای مقاومتی سنگهای رسی تابع میزان و نوع کانیهای رسی و سطوح ضعیف موجود در آنها می‌باشند. با توجه به وجود کانیهای رسی در منطقه مورد مطالعه، عاملی چون رطوبت می‌تواند تاثیر زیادی در تعیین ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ داشته باشد. رطوبت در سنگهای رسی می‌تواند منجر به شکستن پیوند بین دانه‌ها شود و سبب ایجاد درزه و ترک در آنها گردد. در اثر جذب آب و افزایش میزان رطوبت، سنگ متورم می‌شود و پس از شکسته شدن پیوند بین آنها سبب ایجاد سطح ضعیف در سنگ می‌گردد. ضمناً دو مکانیزم رهایی تنش ناشی از حفر تونل و تورم می‌توانند در توسعه درزه و ترکها موثر باشند [۴].

<sup>3</sup> Road header

نظر به اینکه مارن دارای خواصی چون هوازدهی سریع، رخنمون ضعیف، مقاومت‌های مختلف در شرایط خشک و اشباع (به دلیل وجود درصد‌های متفاوتی از آهک و کانیهای رسی)، تورم سنگ، لغزندگی بلوکهای سنگی پس از جذب آب به دلیل وجود رس می‌باشد؛ این خواص در کنار شرایط آب و هوایی پر باران منطقه مشکلاتی را در روند اجرایی پروژه حفر تونل سر ریز سد- که ساختگاهی مشابه نسبت به تونل انتقال آب بابلک دارد- ایجاد کرده است [۵]:

- سطوح رخنمون شده به سرعت هوازده می‌شوند که گاه سطح آماده شده تونل جهت بتن‌پاشی چندین بار بایستی تمیزکاری شود.
- نفوذ ناپذیری سنگ عملکرد زهکشها را مشکل می‌سازد و با وجود احداث تعداد فراوانی از چالهای زهکش، گاه آب زیرزمینی توانسته بر اثر خاصیت متورم‌شوندگی مارن، سبب بلند کردن شاتکریت و خمش در توری سیمی گردد.

### ۱-۳- مروری بر کارهای انجام شده

حفر و تحکیم تونل سرریز سد البرز و شفت اصلی آن تا پایان سال ۱۳۸۲ صورت گرفته است. قرار است تجهیز کارگاه و آماده‌سازی تونل انتقال از اوائل سال ۱۳۸۴ صورت گیرد تا در نهایت حفاری و اجرای سیستم نگهداری تونل تا سال ۱۳۸۵ پایان پذیرد.

از آنجا که فاصله تونل تا ساختگاه سد نیز کمتر از ۵ کیلومتر است می‌توان اطلاعات زمین‌شناسی و مکانیک‌سنگی حاصل از این ساختگاه را به مسیر تونل تعمیم داد اما چون جنس سازند تونل انتقال آب با جنس سازند ساختگاه سد اندکی فرق می‌کند از اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی ساختگاه سد البرز با دقت خاصی در راستای اهداف این تحقیق استفاده شده است.

با ایلن حال، شرکت مهندسی مشاور مه‌اب‌قدس در سال ۱۳۷۷ اقدام به تهیه گزارش زمین‌شناسی (مطالعات مرحله اول سیستم انتقال آب بابلک) کرده است. در این گزارش علاوه بر

اطلاعات زمین‌شناسی، نتایج آزمایشهای حاصل از حفر گمانه‌های مسیر تونل نیز آمده است. ضمناً یادآوری می‌گردد که در زمان تدوین این تحقیق هیچگونه مطالعات ژئومکانیکی و تحلیل پایداری بر روی تونل انتقال آب بابلک صورت نگرفته است.

#### ۱-۴- اهداف تحقیق و سازماندهی پایان‌نامه

هدف محقق نشان دادن کاربرد نرم‌افزار عددی  $FLAC3D^4$  در تحلیل سیستم نگهداری موقت و دائمی تونلها می‌باشد که با داشتن اطلاعات زمین‌شناسی و مکانیک‌سنگی تونل انتقال آب بابلک به آنالیز پایداری و طراحی سیستم نگهداری این تونل ختم می‌شود.

از آنجا که تونل در تشکیلات مارنی میوسن حفر می‌شود باید ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی ساختگاه تونل در این تشکیلات بررسی شود. این بررسی در فصل دوم آمده است. در فصل سوم رده‌بندی مهندسی سنگ صورت گرفته است. فصل چهارم به آنالیز تحلیلی اختصاص دارد. در فصل پنجم بر اساس تحلیل عددی، طراحی سیستم نگهداری موقت انجام شده است و در نهایت، در فصل ششم، طراحی سیستم نگهداری دائم صورت گرفته است.

---

<sup>4</sup> Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions

## فصل دوم

زمین شناسی مهندسی و بررسی  
ژئومکانیکی ساختگاه تونل انتقال آب

## ۲-۱- مقدمه

در این فصل پس از بررسی سنگ‌شناسی مارن به موضوعاتی چون زمین‌شناسی منطقه، ژئومورفولوژی، چینه‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی پرداخته شده است. سپس وضعیت تورم در لایه‌های مارنی بررسی و در نهایت اطلاعات حاصل از حفر گمانه‌های اکتشافی تحلیل می‌شود. این اطلاعات شامل آزمایشهایی چون آزمایش نفوذپذیری، کیفیت سنگ در گمانه‌ها، آزمایش مقاومت فشاری تک محوره و سه محوره، آزمایش مقاومت کششی و آزمایش برش مستقیم و ... می‌باشد که در زیر درباره آنها مفصلاً صحبت شده است.

## ۲-۲- سنگ‌شناسی مارن

مارنها<sup>۱</sup> مخلوطی از رس و کربنات کلسیم با سنگ‌شدگی ناقص هستند و زمانی که سخت‌شدگی و سنگ‌شدگی آنها پیشرفت نماید واژه سنگ مارن<sup>۲</sup> به آنها اطلاق می‌گردد. مقدار کربنات کلسیم هم در مارنها ۲۵ تا ۶۵ درصد گزارش شده که به همان نسبت مقدار رس آنها متغیر خواهد بود [۶].

مارنها سنگهای آهکی رست‌دار سخت‌شده هستند که می‌توان آنها را به آسانی خرد نمود. حالت خاکی دارند و به زبان می‌چسبند! تشخیص مطمئن این سنگ منوط به استفاده از وسیله کالسی‌متر<sup>۳</sup> می‌باشد. اگر مارن مواد آلی داشته باشد، مارن سیاه و اگر مختصری پیریت داشته باشد، مارن آبی می‌شود. اکسیدهای آهن مارن را به رنگ قرمز یا زرد و غیره در می‌آورند. تشکیلات مارنی در ساختمان زمین‌شناسی دوران سوم ایران اهمیت دارد [۷].

<sup>۱</sup> Marnes or marls

<sup>۲</sup> Marlstone

<sup>۳</sup> Calcimetre

عموماً واژه کلی مارن هم برای مارن و هم برای مارن‌سنگ استفاده می‌شود. اما واقعیت آنستکه مارن‌سنگ سختی بیشتری نسبت به ترکیب مشابه خود یعنی مارن دارد و رفتاری سنگ‌گونه دارد و دارای تورق بیشتری نسبت به مارن می‌باشد. سطح شکست آنها نیز به صورت بلوکی نیمه‌صدفی است. اما مارن بیشتر رفتار خاک‌گون دارد و چنانچه مقدار رس آن بالا باشد از خود خاصیت خمیری نشان می‌دهد.

در مارن‌ها، در اثر آزادسازی تنش ناشی از حفر فضا، تغییر شکل پلاستیک صورت می‌گیرد. در این حالت درزه‌های موجود در سنگها بسته می‌شوند. لذا می‌توان در مدلسازی عددی، سنگ را به صورت محیط پیوسته در نظر گرفت. همچنین به دلیل پایین بودن مقاومت و خاصیت شبه‌پلاستیکی مارن امکان درزه‌داری پایین است. بنابراین نباید برای این‌گونه سنگها تحلیل گوه‌ای بکار برد.

## ۲-۳- زمین‌شناسی منطقه طرح

رشته کوه البرز که حوزه فرونشست خزر را از فلات مرکزی جدا نموده است حاصل حرکات فشاری در دوره کوهزایی آلپ است. این حرکات نهشته‌های اوائل دوران سوم را تحت تاثیر قرار داده است و تغییر شکلهایی را به صورت یکسری تاقدیس و ناودیس با امتداد شرقی- غربی در منطقه طرح به وجود آورده است. گسل‌های منطقه‌ای و زونهای گسلی مثل گسل شمال البرز با امتداد شرقی- غربی و طول ۴۰۰ کیلومتر از جنوب محور سد البرز می‌گذرد و گسل خزر به طول ۶۰۰ کیلومتر شمال البرز را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۲].

تراز رودخانه بابلک در محل سد انحرافی ۳۰۷/۵ متر، تراز تونل انتقال آب در دهانه ورودی و خروجی به ترتیب ۳۰۷ و ۳۰۳ متر و تراز نرمال مخزن سد البرز ۳۰۱ متر می‌باشد. قدیمی‌ترین رخنمون‌ها در منطقه طرح مربوط به دوره پرمین شامل ماسه‌سنگ و شیل و آهک سازندهای دورود و روته است که با دگرشیبی موازی روی نهشته‌های قدیمی‌تر قرار گرفته‌اند.

نهشته‌های کرتاسه بالا در منطقه دارای گسترش زیادی است و ضخامت آن به حدود ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر می‌رسد. این نهشته‌ها شامل مارنهای توده‌ای است که گاهی لایه‌های نازک آهک نیز در آن مشاهده می‌شود. نهشته‌های مزبور پی سد البرز را تشکیل می‌دهند. نهشته‌های پالئوژن در این ناحیه از البرز شناخته نشده و نهشته‌های نئوژن در منطقه مورد مطالعه، بیشتر از مارن و ماسه‌سنگ و گاهی همراه با میکروکنگلومرا تشکیل شده است. پی محل سد انحرافی و مسیر تونل انتقال آب نیز از این گونه سنگها تشکیل شده است. نهشته‌های آبرفتی کواترنر دارای گسترش نسبتاً زیادی در منطقه هستند و پادگانه‌های آبرفتی در ترازهای مختلف را تشکیل می‌دهند. این نهشته‌ها شامل پادگانه‌های آبرفتی در بلندیها، پادگانه‌های آبرفتی جوان در ساحل رودخانه و آبرفت بستر رودخانه است. دانه‌های تشکیل دهنده این نهشته‌ها بیشتر قلوه‌سنگ، شن، ماسه و گاهی تخته سنگ است. آبرفتهای جوان بیشتر دارای سیلت و ماسه و آبرفتهای کهن بیشتر دارای سیمان رسی است. ضخامت این نهشته‌ها بین ۵ تا ۱۵ متر متغیر است. نهشته‌های آبستنی نیز که حاصل هوازگی مارن و ماسه‌سنگ است با ضخامت ۱۵ تا ۲۰ متر در منطقه طرح وجود دارد [۲].

به لحاظ زمین‌ساختی، حرکات فشاری، موجب چین‌خوردگی، گسلش معکوس، و بالاآمدگی کوه‌های البرز و تالش نسبت به فرورفتگی خزر شده است. در اثر این چین‌خوردگی یکسری تاقدیس و ناودیس باریک و فشرده با امتداد تقریباً شرقی - غربی پدید آمده‌اند. فرونشست مزبور نیز تاکنون ادامه یافته است. فعالیت‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد که منطقه هنوز هم تحت تاثیر نیروهای فشاری است و در طول گسلهای معکوس اصلی تغییر شکل صورت می‌گیرد. گسلهای شمال البرز و خزر گسلهایی معکوس و با شیب زیاد به سمت جنوب هستند و به نظر می‌رسد که بلوک جنوبی در امتداد گسل شمال البرز به صورت معکوس روی قسمت مرکزی متمایل شده و نهشته‌های تریاس و ژوراسیک را بالا آورده و در کنار نهشته‌های جوانتر کرتاسه و میوسن قرار داده است و بلوک مرکزی در امتداد گسل خزر در مجاورت فرونشست خزر قرار گرفته است [۲].

## ۲-۴- ژئومورفولوژی در محدوده احداث تونل انتقال آب

تونل انتقال آب به جز در قسمتهای ورودی و خروجی هر یک به طول حدود ۱۰۰ و ۱۲۰ متر که کمترین ضخامت روباره و ناکافی برای اجرای تونل را دارند، در بقیه قسمتها از زیر روباره‌ای با ضخامتهای مختلف عبور خواهد کرد. بیشترین روباره در مترائ ۱۷۵۰+ متر نسبت به دهانه ورودی تونل، ضخامتی حدود ۱۸۵ متر و کمترین روباره در مترائ ۶۰+ متر (نسبت به دهانه تونل) حدود ۸ متر ضخامت دارد. تقریباً تمامی مسیر از خاکهای فرسایشی برجا و نهشته‌های دامن‌های پوشیده شده است و هیچگونه رخنمون سنگی در این مسیر دیده نمی‌شود. نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی نشان می‌دهد که این مسیر از ناودیزی که نهشته‌های ماسه‌سنگی، ماری، کنگلومرای و گاهی میان‌لایه‌هایی از میکروکنگلومرا تشکیل شده است، عبور می‌کند. محور این ناودیس با راستای تقریباً شرقی- غربی در نزدیکی مترائ ۷۵۰ متری از دهانه ورودی تونل زاویه‌ای حدود ۵۰ درجه با امتداد تونل می‌سازد [۲].

در میان این نهشته‌های رسوبی لایه‌های سست و ضعیفی وجود دارد که در برابر پدیده‌های فرسایش مقاومت کمتری از خود نشان داده و دره‌ها و آبراهه‌های کوچک و بزرگی در این مسیر تشکیل داده است. بزرگترین آنها در مترائ ۱۵۰۰ متری از دهانه ورودی تونل وجود دارد. ضخامت روباره در این قسمت در حدود ۱۵۰ متر است. شیب توپوگرافی در محل ورودی و خروجی تونل ملایم و در حدود ۱۰ درجه است [۴].

## ۲-۵- چینه‌شناسی در محدوده احداث تونل انتقال آب

بر اساس بررسی‌های صحرایی و کارهای اکتشافی انجام‌شده، نهشته‌های رسوبی مسیر تونل به ترتیب از جدید به قدیم به صورت زیر رده‌بندی می‌شوند [۲]:

### نهشته‌های دامنه‌ای و خاکهای فرسایشی (Q2)

نهشته‌های رسوبی فوق‌الذکر در نتیجه هوازدگی پی سنگ مارنی و ماسه‌سنگی در این گستره بوجود آمده است. جنس سنگها بیشتر از رس سیلت‌دار، سیلت رسی و ماسه‌ای و گاهی تکه‌سنگهای زاویه‌دار ماسه‌سنگی است. ضخامت این نهشته‌ها بین ۴/۵ تا ۱۰/۵ متر متغیر است.

### نهشته‌های آبرفتی بستر جاری رودخانه (Qal)

نهشته‌های مزبور شامل آبرفتهای بستر کنونی رودخانه است. این آبرفتها در نزدیکی ورودی تونل انتقال آب رودخانه بابلک و در نزدیکی خروجی این تونل در شاخه سبزرود بیشتر شامل قلوه‌سنگ و شن ماسه‌دار است که گاهی قطعات تخته‌سنگ در آن دیده می‌شود. ضخامت این نهشته‌ها حدود ۳/۵ تا ۵/۵ متر است. جنس آنها بیشتر ماسه‌سنگ و آهک است.

### پادگانه آبرفتی (Qt4)

عناصر تشکیل دهنده این پادگانه آبرفتی نیز شامل شن ماسه‌دار همراه با قلوه‌سنگ است و ضخامت آن بطور متوسط حدود ۵ متر است.

### نهشته‌های دوره میوسن (MN)

نهشته‌های مسیر تونل از این نهشته‌ها تشکیل شده‌اند که شامل ماسه‌سنگ، ماسه‌سنگ مارنی، مارن ماسه‌ای، مارن و کنگلومرا به رنگهای خاکستری و قرمز مربوط به دوره میوسن می‌باشند که میان‌لایه‌های میکروکنگلومرا نیز در آنها مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که پلان زمین‌شناسی و پروفیل تونل انتقال آب بابلک در پیوست ۲ آمده است.

## ۲-۶- زمین‌شناسی ساختمانی مسیر تونل انتقال آب

به لحاظ ساختاری مسیر تونل از یالهای شمالی و جنوبی یک ناودیس عبور می‌کند شیب متوسط این لایه‌ها در یالهای این ناودیس با توجه به اطلاعات بدست آمده از گمانه‌ها بطور متوسط ۳۵ درجه

است. بدیهی است که این شیب در محور ناودیس ملایم‌تر و نزدیک به افق می‌شود. در سطح زمین با توجه به پوشیده بودن این مسیر آثار گسل به چشم نمی‌خورد ولی به علت نزدیکی زون گسل شمال البرز وجود زونهای خرد شده در مسیر تونل به دور از واقعیت نیست. با توجه به نبود رخنمون سنگی، امکان درزه‌نگاری در مسیر تونل انتقال آب وجود نداشت. ولی به علت نزدیک بودن محل سد البرز به این مسیر، ویژگی‌های هندسی درزه‌های اندازه‌گیری شده در محل سد مزبور به مسیر تونل تعمیم داده شد. این درزه‌ها و ویژگی‌های مهندسی آنها به شرح جدول ۱-۲ می‌باشد:

جدول ۱-۲- شیب و امتداد شیب درزه‌ها در مسیر تونل انتقال [۴] و [۲]

شیب (درجه)	شیب (درجه)	امتداد شیب (درجه)
لا یه بندی قسمت خروجی تونل	۳۲	۳۵۵
درزه ۱	۶۰	۳۳۰
درزه ۲	۷۰	۲۵۰
درزه ۳	۷۱	۲۲۰

ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی این درزه‌ها در جدول ۲-۲ آمده است:

جدول ۲-۲- وضعیت کلی درزه‌ها در مسیر تونل [۴] و [۲]

تداوم درزه‌ها	۱-۳ متر
بازشدگی	۱-۵ میلیمتر (سطحی) و ۱/۱۰ تا ۱ میلیمتر (عمیق)
زبری	صاف
پرشدگی (در صورت وجود)	۵ میلیمتر
هوازدگی	کم تا متوسط
وضعیت آب در ناپیوستگی‌ها	مرطوب

## ۷-۲- وضعیت تورم لایه‌های مارنی

فرایند تورم‌زدایی (آماس‌پذیری) از واکنش‌های شیمیایی- فیزیکی و رهایی تنش در حضور آب می‌باشد [۸]. در مارن به علت وجود کانیهای رسی، آب به سطوح خارجی کانیهای رسی می‌چسبد و به صفحات قابل انبساط (لایه‌های متورم‌شونده) موجود در آنها جذب می‌شود. این جذب موجب افزایش حجم آنها شده و به صورت کرنش و فشار تورمی بروز می‌نماید.

فشار تورم بستگی به فاصله بین ذرات داشته و همچنین تابعی از فاصله میان صفحات قابل انبساط (لایه‌های متورم‌شونده) می‌باشد.

رهاسازی تنش در سنگهای تورم‌زا باعث عوامل زیر می‌گردد [۸]:

- باعث ایجاد فشار منفذی منفی در حفره‌ها می‌گردد که به نوبه خود جریان آب را به همراه دارد و باعث افزایش حجم می‌شود.

- باعث افزایش شکافها می‌گردد و موجب ترک خوردن جسم شده که به نوبه خود حرکت و جریان آب را تسهیل نموده و باعث افزایش حجم می‌گردد.

هر چه سنگها قابلیت نفوذپذیری کمتری داشته باشند نفوذ آب در زمان رهاسازی تنش ناشی از حفر تونل زمان قابل ملاحظه‌ای را نیاز دارد و لذا تورم دارای یک روند کند می‌باشد [۸].

نتایج زیر در مورد روند تورم در منطقه گرفته شده است:

- آزمایشهای لوژن (که شرح آن خواهد آمد) نشان می‌دهد که مارن دارای نفوذپذیری کم می‌باشد، لذا روند تورم در آن بسیار کند صورت می‌گیرد.

- آزمایش‌های دیفرانکتومتری (XRD) نشان می‌دهد که مارن منطقه دارای کانی ایلیت می‌باشد. کانی ایلیت از جمله کانیهای رسی است که از نظر تورمی حد فاصل بین کائولینیت (خاک با تورم کم) و مونت‌موریلونیت (متورم شونده‌ترین خاک در طبیعت که از تورم بسیار بالا در اثر جذب آب برخوردار است) می‌باشد.

• با توجه به ویژگی‌های مارنهای ساختگاه و خصوصیات خاک‌گون مصالح و به منظور تعیین میزان فشار تورمی، آزمایش فشار تورمی در ساختگاه سد البرز صورت گرفته است که میانگین فشار تورمی آن  $2/58$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌باشد. لذا این آزمایش نیز نشان می‌دهد که تورم در منطقه کم خواهد بود.

• آزمایش تعیین حدود اتربرگ در منطقه تونل انتقال صورت گرفته و نتایج آن در جدول ۲-۳ آمده است.

جدول ۲-۳- میانگین نتایج آزمایش حد روانی، حد خمیری و دامنه خمیری\*

حد روانی (LL)	۳۹
حد خمیری (PL)	۱۹
دامنه خمیری (PI)	۲۰

طبق آیین‌نامه آشتو و روش USBR (روش هولتز و گیبس) که در پیوست ۳ آمده است،

توده سنگهای ساختگاه در رده تورمی پایین تا متوسط قرار می‌گیرند.

• از آنجا که مارن در اثر جذب آب دارای خاصیت تورمزایی می‌باشد، باید به رسهای منطقه اجازه داده شود که تغییر شکل و جابجایی ناشی از تورم صورت گیرد. وقفه زمانی بین حفاری تونل و عملیات اجرای نگهداری دائم (بتن ریزی)، زمان مناسبی برای انجام شدن تمام جابجایی‌های تورمی است.

\* در تهیه این جدول از منبع ۲ استفاده شده است. لازم به ذکر است که دامنه خمیری تغییراتی از ۱۰ تا ۳۰ دارد.

## ۸-۲- بررسی گمانه‌های اکتشافی

هدف از حفر گمانه‌های اکتشافی، شناسایی وضعیت، ضخامت، جنس، مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگهایی است که تونل از آنها عبور می‌کند. به کمک این گمانه‌ها اطلاعاتی در مورد وضعیت آبهای زیرزمینی منطقه نیز حاصل می‌شود. این اهداف با انجام آزمایشهای مختلف بر روی نمونه‌های حاصل از حفر گمانه‌ها، موسوم به مغزه و نیز انجام بعضی از آزمایشهای برجا در داخل گمانه حاصل می‌شود [۹].

به منظور بررسی وضعیت توده در زیر زمین تعداد ۳ حلقه گمانه به عمق ۵۶ متر در محور سد انحرافی و ۹ حلقه گمانه به عمق ۷۳۴ متر در راستای تونل انتقال آب به مشخصات جدول ۲-۴ حفر شده است.

جدول ۲-۴- مترای حفاری گمانه‌ها [۲]

شماره گمانه	موقعیت	عمق (متر)	حفاری در آب رفت (متر)	حفاری در سنگ (متر)
B1	ساحل راست سد انحرافی	۱۲	۳	۹
B2	ساحل چپ سد انحرافی	۲۴	۱۲/۴۰	۱۱/۶۰
B3	بستر رودخانه بابلک	۲۰	۶	۱۴
B4	مسیر تونل انتقال	۳۰	۸/۲۵	۲۱/۷۵
B5	مسیر تونل انتقال	۳۵	۱۶	۱۹
B6	مسیر تونل انتقال	۲۵	۶/۵	۱۸/۵
B7	مسیر تونل انتقال	۸۰	۶	۷۴
B8	مسیر تونل انتقال	۱۴۰	۱۰/۵	۱۲۹/۵
B9	مسیر تونل انتقال	۱۵۵/۵	۷	۱۴۸/۵
B10	مسیر تونل انتقال	۱۷۵	۴۷	۱۲۸
B11	مسیر تونل انتقال	۷۰	۵/۲۰	۶۴/۸
B12	مسیر تونل انتقال	۳۳/۵	۹	۲۴/۵

## ۲-۸-۱- هیدروژئولوژی

آبده بودن زمین به مقدار قابل ملاحظه در ساختگاه تونل می‌تواند باعث عوامل زیر شود [۱۰]:

- باعث ناپایداری قسمت حفاری می‌گردد.
- جریان آب در سنگهای شکافدار باعث ایجاد فضای خالی و لق شدن سنگها می‌شود.
- سنگ حفاری شده در مجاورت آب سریعاً فاسد می‌شود (خواص فیزیکی و شیمیایی خود را از دست می‌دهد).

• سبب افزایش فشار در سنگهایی که در مجاورت آب متورم می‌گردند، می‌شود (مخصوصاً در مارنها).  
بنابراین باید بررسی‌های هیدروژئولوژیکی همزمان با بررسی‌های زمین‌شناسی انجام شود و منظور از آنها عبارت است از شناسایی [۱۰]:

- لایه‌های آبده و زمین‌های ناتراوا
- رژیم هیدرولیکی (سفره آب زیرزمینی، جریان آب در زیر زمین و ...)
- تراوایی لایه‌های زمین
- شبکه‌های کارستی (آب در سنگهای آهکی) در صورت وجود

یک نوع از آزمایشاتی که اطلاعاتی مفید درباره درک محیط هیدروژئولوژی بنای مورد نظر می‌دهد، آزمایشهای اندازه‌گیری تراوایی به صورت درجا و در داخل گمانه است که معروفترین این آزمایشها، آزمایش لوژن- که تراوایی را با تزریق آب اندازه‌گیری می‌کند- و لوفران می‌باشد.

روش تراوایی‌سنجی لوژن مبتنی بر این است که داخل گمانه (به قطر ۷۰ تا ۸۰ میلیمتر) آب را با فشار یک مگاپاسکال بر روی طولی معادل یک متر وارد می‌کنند و بده نفوذی از ورای جداره‌های گمانه را اندازه‌گیری می‌کنند. این آزمایش برای تخمین فرار آب در زمینهای سنگی و ترکهای همگن و نسبتاً ریز نتایج خوبی را می‌دهد [۱۰]. نتایج این آزمایشات، تعیین نفوذپذیری منطقه بر اساس رده‌بندی آفتس می‌باشد (که در پیوست ۴ آمده است) و نتیجه اینکه توده سنگهای ساختگاه تونل در

رده نفوذپذیری بسیار کم تا کم قرار می‌گیرند و فقط در قسمت‌های ابتدایی و انتهای مسیر تونل، به دلیل پوشیده بودن زمین از نهشته‌های دانه‌ای خاک‌های فرسایشی برجا و نهشته‌های آبرفتی، نفوذپذیری کم تا متوسط می‌باشد. از آنجا که در این قسمت از مسیر کانال حفر خواهد شد، نگرانی خاصی وجود ندارد.

نتایج زیر در مورد هیدروژئولوژی منطقه بدست آمده است:

- با توجه به نفوذپذیری کم در مسیر تونل، جریان شدید و ناگهانی در زمان حفاری به داخل تونل محتمل نیست؛ ولی امکان نشت جزئی آب در بعضی از مقاطع وجود دارد.
- در روش‌های تجربی می‌توان نقش آب را در امتیازدهی پارامترها در نظر گرفت اما در روش‌های عددی به دلیل مشکل بودن مدلسازی آب در منطقه، از نقش فشار آب منفذی صرف‌نظر شده است.
- حضور آب در مارن‌ها و ماسه‌سنگ‌ها از مقاومت فشاری آنها در اثر اشباع شدن می‌کاهد. در واقع آب موجود در درزه‌ها و شکاف‌ها است که موجب کاهش مقاومت می‌شود.
- بررسی‌های صحرایی و زمین‌شناسی نشان داد که حفره کارستی و پدیده کارستی شدن در منطقه وجود ندارد.
- تنش در توده سنگ‌های ساختگاه به مراتب خیلی بیشتر از فشار آب زیرزمینی است (فشار آب زیرزمینی با تقریب بسیار خوبی در حد صفر است) و خطرات ناشی از تنش موثر- همان تنشی که از اختلاف تنش برجا و فشار منفذی بدست می‌آید- چندان زیاد نیست. از این رو آب زیرزمینی بیشتر نقش یک مزاحم را ایفا می‌کند تا تهدیدی جدی در وضعیت پایداری و نگهداری تونل.
- با توجه به شیب اندک تونل و وجود نشت‌های جزئی آب زیرزمینی، بهتر است حفاری از دهانه خروجی تونل صورت گیرد که در صورت برخورد با این آب‌ها نیازی به خروج آب‌های نفوذی توسط پمپ نباشد و آب بطور طبیعی زهکشی شود.

## ۲-۸-۲- نتایج کیفیت مغزه

نتایج میانگین کیفیت مغزه‌ها (RQD) در مسیر تونل انتقال مطابق جدول ۲-۵ آمده است. لازم به ذکر است که سه گمانه اول در راستای محور سد انحرافی حفاری شده‌اند.

جدول ۲-۵- نتایج RQD در مسیر تونل انتقال [۲]

شماره گمانه	میانگین کل RQD	کیفیت
B1	۶۳	متوسط
B2	۷۱	متوسط
B3	۵۳	متوسط
B4	۹۹	عالی
B5	۴۲	بد
B6	۵۳	متوسط
B7	۵۷	متوسط
B8	۴۷	بد
B9	۱۹	خیلی بد
B10	۴۰	بد
B11	۵۵	متوسط
B12	۵۵	متوسط

## ۲-۸-۳- پارامترهای ژئوتکنیکی مسیر تونل انتقال

توده سنگهای مسیر تونل انتقال آب به دو زون خروجی A و ورودی B تقسیم می‌شوند. از آنجا که جنس اکثر سنگها در مسیر تونل یکی است، این تقسیم بندی، بر اساس وضعیت لایه بندی سنگها در اطراف تونل صورت گرفته است. زون ورودی B از ۰ تا ۶۰۰ متری تونل و زون خروجی A از ۶۰۰ تا

۲۶۰۰ متری تونل را شامل می‌شود. میانگین پارامترهای ژئوتکنیکی مسیر تونل انتقال بر اساس این تقسیم بندی در جدول ۲-۶ آمده‌اند.

جدول ۲-۶ - پارامترهای ژئوتکنیکی مسیر تونل انتقال \* [۴ و ۲]

پارامتر	زون ورودی B	زون خروجی A
دانسیته خشک ( $g/cm^3$ )	۲/۲۸	۲/۰۱
دانسیته اشباع ( $g/cm^3$ )	۲/۴۳	۲/۲۲
جذب آب %	۶/۵	۱۱/۶۴
تخلخل %	۱۴/۸۷	۲۲/۴۱
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۳۴
مدول الاستیک سنگ سالم (GPa)	۱/۴	۱
مقاومت فشاری خشک (Mpa)	۱۶/۷	۱۲/۷
مقاومت فشاری اشباع (Mpa)	۶/۵	۵/۲

#### ۲-۸-۴- نتایج مقاومت کششی در شرایط اشباع

مقدار میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها نیز برای دو زون A و B به ترتیب برابر ۰/۳ مگاپاسکال و

۰/۴ مگاپاسکال می‌باشد [۲].

#### ۲-۸-۵- نتایج آزمایش سه محوره

آزمایش مقاومت فشاری سه محوره برای ماسه سنگ مارنی در گمانه‌های مسیر زون خروجی تونل جهت تعیین C (چسبندگی) و  $\phi$  (زاویه اصطکاک داخلی) سنگ سالم (ماده سنگ) بکار رفت. مقدار میانگین C و  $\phi$  به ترتیب، ۱/۳۸ مگاپاسکال و ۶۵ درجه محاسبه شد [۲].

\* مسیر تونل قطعاً از یک نوع سنگ نیست، این اطلاعات که از آزمایش گمانه‌ها گرفته شده است مربوط به نهشته‌های میوسن می‌باشد. در زون خروجی A جنس اکثر سنگهای مسیر تونل مارن (با درصد رس زیاد)، مارن ماسه‌ای، مارن سیلتی، ماسه سنگ مارنی و جنس اکثر سنگهای مسیر تونل در زون ورودی B مارن (با درصد رس کمتر)، مارن آهکی، آهک ماسه‌ای صدف دار، ماسه سنگ آهکی و ماسه سنگ مارنی می‌باشد. جزئیات در منبع ۲ آمده است.

## ۲-۸-۶- نتایج آزمایش برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم از نوع اره بر (Saw Cut) برای توده سنگ بکار رفت. مقدار میانگین  $C$  و  $\phi$  به ترتیب برای زون خروجی ۰/۰۶ مگاپاسکال و ۲۵ درجه و برای زون ورودی ۰/۰۸ مگاپاسکال و ۳۲ درجه تخمین زده شدند.

## فصل سوم

برآورد سیستم نگهداری موقت بر  
اساس طبقه‌بندی مهندسی سنگ

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل، پس از تقسیم‌بندی مسیر تونل به دو زون ورودی و خروجی، اقدام به طبقه‌بندی مهندسی سنگ با دو روش کاربردی RMR و Q شده است. سپس بر اساس این طبقه‌بندی، برای سیستم نگهداری موقت، طرح پیشنهادی ارائه می‌گردد.

### ۳-۲- طبقه‌بندی مهندسی سنگ

محققین بسیاری در زمینه طبقه‌بندی توده سنگها کار کرده‌اند و اساس کار همه آنها نیز امتیازدهی و عددی کردن ویژگی‌های ژئوتکنیکی موثر بر رفتار توده سنگ و سپس ترکیب این امتیازات و تعیین یک امتیاز کلی می‌باشد که با استفاده از آن نوع نگهداری تونل در آن توده مشخص می‌شود [۱۱].

روشهای تجربی، روشهای ساده و کم هزینه‌ای را برای پیش‌بینی خصوصیات رفتاری توده‌سنگ و تخمین شاخصهای مکانیکی آنها ارائه می‌دهند. رده‌بندی توده سنگ، یکی از رهیافت‌های محققان و مهندسان مکانیک سنگ برای دستیابی به موارد فوق است. منظور از رده‌بندی قرار دادن سنگها در گروه‌های مختلف با توجه به خصوصیات ذاتی، رفتاری و شاخص‌های مکانیکی آنها در ارتباط با نوع سازه مورد نظر است [۱۲].

مهمترین روشهای رده‌بندی توده‌سنگها، روش ژئومکانیکی (RMR) و رده‌بندی بر اساس شاخص کیفیت تونل‌سازی Q می‌باشند. که طبقه‌بندی تونل انتقال آب بر اساس این دو روش انجام گرفته است (در امتیازدهی پارامترها و تعیین کلاس توده‌سنگ از جداول پیوست ۵ استفاده شده است).

### ۳-۲-۱- روش RMR

در سال ۱۹۷۶ میلادی، بینیاوسکی<sup>۱</sup> از مرکز مطالعات علمی و صنعتی آفریقای جنوبی (CSIR) طبقه‌بندی جدیدی از سنگها را بر مبنای ویژگی‌های ژئومکانیکی آنها ارائه داد که به روش RMR یا CSIR معروف است و به عنوان یکی از موفق‌ترین سیستمهای رده‌بندی سنگها در مسائل تونل‌سازی بکار می‌رود [۱۳]. این روش در سال ۱۹۸۹ اصلاح شد و آنچه در امتیازدهی تونل انتقال آب بکار رفته است بر مبنای روش اصلاحی است.

همانند اوری که گفته شد، توده‌سنگهای مسیر تونل انتقال آب، به دو زون کلی خروجی A و ورودی B تقسیم می‌شوند. سنگهای این دو زون نیز خود بر دو سری می‌باشند. سری ۱ سنگهایی هستند که هوازدگی در آنها کمتر اتفاق افتاده است و سنگ از یک حالت متراکم برخوردار است و سری ۲ سنگهایی هستند که به علت هوازدگی از درزه‌داری بیشتری برخوردارند و نقش سنگهای ضعیف و خرد شده را ایفا می‌کنند. امتیازدهی مقدار RMR با توجه به مقادیر میانگین این دو سری برای هر یک از زونها به شرح جدول ۳-۱ است:

<sup>۱</sup> Bieniawski

جدول ۳-۱- مقداردهی پارامترها در روش RMR برای دو زون سنگی\*

زون	RQD	مقاومت توده سنگ	فاصله داری درزه‌ها	وضعیت ناپیوستگی	آب زیرزمینی	تعدیل ارزش	RMR
ورودی B	۸	۲	۲۵	۱۲	۷	-۲	۵۲
خروجی A	۳	-	۲۰	۶	۷	-۲	۳۴

نتایج زیر از مقدار RMR حاصل شده است:

زون ورودی B در رده سنگهای مناسب و کلاس III و زون خروجی A در رده سنگهای ضعیف و کلاس IV قرار می‌گیرند. طبق دستورالعمل انتخاب سیستم نگهداری برای تونلهایی با دهانه ۱۰ متر بر اساس شاخص RMR سیستم نگهداری پیشنهادی به صورت زیر است [۱۸]:

زون B	۵ تا ۱۰ سانتی‌متر شاکریت در تاج و ۳ سانتیمتر در دیواره با پیچ‌سنگ ۴ متری با فاصله‌داری ۱/۵×۲ به همراه توری فلزی
زون A	۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر شاکریت در تاج و ۱۰ سانتیمتر در دیواره با پیچ‌سنگ ۴ متری با فاصله‌داری ۱×۱/۵ به همراه توری فلزی

\* در تهیه این جدول از منابع ۲ و ۵ استفاده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه امکان حفاری از دو سر تونل وجود دارد و زمان تکمیل پروژه نیز کوتاه است، لذا حفاری از دو سمت تونل صورت می‌گیرد و به این خاطر، مقدار تعدیل ارزش برای هر دو زون یکسان در نظر گرفته شده است.

- زمان پابرجایی برای تونل با عرض ۴/۲ متر برای زون ورودی B یک هفته و برای زون خروجی A دو تا سه ساعت بدست آمد.

- بار موثر بر سیستم نگهداری بر اساس فرمول انال<sup>۲</sup> (۱۹۸۳) در رده‌بندی ژئومکانیکی به صورت رابطه (۱-۳) است [۱۴]:

$$P = \frac{100 - RMR}{100} \times \gamma \times B \quad (1-3)$$

که P فشار موثر بر سیستم نگهداری بر حسب تن بر متر مربع، B عرض تونل بر حسب متر و  $\gamma$  وزن مخصوص سنگ بر حسب تن بر متر مکعب می‌باشد. این فشار برای توده سنگهای زون ورودی B و زون خروجی A به ترتیب برابر ۴/۸ و ۶/۱ تن بر متر مربع برآورد شد.

### ۳-۲-۲- روش Q

این روش در سال ۱۹۷۴ توسط بارتن<sup>۳</sup> و همکارانش از انستیتو ژئوتکنیکی نیروژ (NGI) ارائه شد [۱۶]. اساس این روش بر مبنای محاسبه مقدار Q و سپس ارائه سیستم نگهداری می‌باشد. مقدار Q از رابطه (۲-۳) محاسبه می‌شود.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2-3)$$

که در آن، RQD شاخص کیفیت سنگ،  $J_n$  تعداد دسته درزه‌ها،  $J_r$  عدد زبری درزه‌ها،  $J_a$  عدد هوازدگی درزه‌ها،  $J_w$  عدد کاهش آب درزه‌ها، SRF ضریب کاهش تنش می‌باشد. امتیازدهی پارامترها در این روش برای دو زون مسیر تونل انتقال آب مطابق جدول ۲-۳ است.

<sup>۲</sup> Unal

<sup>۳</sup> Barton

جدول ۳-۲- مقاداردهی پارامترها بر اساس روش Q برای دو زون ورودی و خروجی تونل\*

زون	RQD	Jn	Jr	Jw	Ja	SRF	Q	ESR	اندازه معادل	کلاس سنگ
B	۴۹	۶	۲	۱	۲	۵	۱/۶۳	۱/۶	۲/۷	۲۱
A	۳۵	۹	۱/۵	۰/۱۶۶	۴	۱۰	۰/۱۰	۱/۶	۲/۷	۳۰

نتایج زیر از مقدار Q حاصل شده است:

• توده سنگهای زون ورودی B، در کلاس ۲۱ و در رده سنگهای ضعیف قرار می‌گیرند. سیستم نگهداری موقت شامل حداکثر تا ۵ سانتی متر شاتکریت و پیچ‌سنگ به فواصل ۱ تا ۱/۵ متر می‌باشد [۱۵].

• توده سنگهای زون خروجی A، در کلاس ۳۰ و در رده سنگهای خیلی ضعیف قرار می‌گیرند. سیستم نگهداری موقت شامل ۵ تا ۷/۵ سانتی متر شاتکریت به همراه توری فلزی و پیچ‌سنگ به فواصل ۱ تا ۱/۵ متر می‌باشد [۱۵].

بنابراین، نتایجی که از روشهای تجربی حاصل شده است نشان می‌دهد که زون ورودی تونل در رده سنگهای ضعیف قرار دارد و نیاز به ۵ سانتیمتر شاتکریت به همراه پیچ‌سنگ به فواصل ۱ تا ۱/۵ متر می‌باشد و توده سنگهای زون خروجی تونل در رده سنگهای خیلی ضعیف قرار دارد و لازم است ۵ تا ۷/۵ سانتیمتر شاتکریت به همراه پیچ‌سنگ به فواصل ۱ تا ۱/۵ متری اجرا گردد.

\* در تهیه این جدول از منابع ۷ و ۴ استفاده شده است. ضمناً منظور از ESR ضریب پایداری فضا است که برای تونلهای انتقال آب برابر ۱/۶ می‌باشد و اندازه معادل حفاری نیز از تقسیم عرض حفاری بر این ضریب بدست می‌آید.

## فصل چهارم

برآورد سیستم نگهداری موقت

بر اساس تحلیل اندرکنش

سنگ-سیستم نگهداری

#### ۴-۱- مقدمه

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

#### ۴-۲- محاسبه جابجایی‌های زمین

برای پیش‌بینی نگهداری لازم، باید از طریق مدل‌های تحلیلی یا عددی شناختی از جابجایی‌های زمین که در اثر حفاری بوجود می‌آید کسب شود. البته دوری یا نزدیکی نتایج حاصل از این روشها به واقعیت، بستگی به شناخت ما از زمین مربوطه و انتخاب مدل مناسب دارد. به نظر می‌رسد که مدل‌های خطی، در طراحی وسائل نگهداری تونل چندان به کار نیایند، اما جهت درک ساز و کار تغییر شکلها بسیار مفید می‌باشند [۱۱].

بطور کلی مدل‌های مورد استفاده به دو دسته تقسیم می‌شوند. مدل‌هایی که زمین را یک محیط پیوسته و مدل‌هایی که آنرا به صورت اجتماعی از قطعات ناپیوسته در نظر می‌گیرند [۱۱]:

##### مدل‌های محیط پیوسته

در شرایط زیر می‌توان از مدل‌های محیط پیوسته استفاده نمود:

۱- زمین، همگن و یکپارچه باشد.

۲- ناپیوستگی‌های موجود تاثیری بر رفتار سازه زیرزمینی نداشته باشد.

۲ توده سنگ بسیار پر درز و شکاف باشد که در این صورت می‌توان توده مزبور را یک توده پیوسته معادل تعریف و قانون رفتاری برای آن شبیه‌سازی کرد.

روش تحلیلی و روش عددی، از روشهایی هستند که بر اساس مدل‌های محیط پیوسته کار می‌کنند.

### مدل مکانیک بلوکها

این مدل‌ها که در حقیقت مدل‌های محیط ناپیوسته هستند توده سنگ را به صورت اجتماعی از بلوکها که به وسیله درزه‌های طبیعی محدود شده‌اند، شبیه‌سازی می‌کنند. در این مدل‌ها بلوکهای مزبور معمولاً صلب و درزه‌ها تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند. روش دینامیکی (روشی که توسط کاندال<sup>۱</sup> (۱۹۷۱) پیشنهاد شد و در برنامه‌های UDEC و 3DEC مورد استفاده قرار گرفت) و روش استاتیکی از روشهایی هستند که بر اساس مدل مکانیک بلوکها کار می‌کنند.

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

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

در یک فضای الاستیک همگن ایزوتروپ که در نقطه‌ای از آن فشار همه جانبه  $P$  وجود دارد، تونلی با مقطع دایره‌ای به شعاع  $r_i$  حفر می‌شود و سیستم نگهداری نصب می‌شود که فشار  $P_i$  را به

<sup>۱</sup> Cundall

صورت شعاعی به محیط اطراف تونل اعمال می‌کند) در وضعیت تونل بدون سیستم نگهداری  $P_i = 0$  است). هدف تعیین ضخامت منطقه پلاستیک دهانه تونل بر حسب مشخصاتی چون  $P$ ،  $P_0$  (میدان هیدرواستاتیک تنش زمین)،  $\delta_c$  (مقاومت فشاری تک محوره سنگ) و  $C$ ،  $\phi$ ،  $s$  (پارامترهای مقاومتی سنگ) و  $r_i$  می‌باشد. آنگاه بر اساس این ضخامت، تغییر شکل شعاعی منطقه پلاستیک حساب می‌شود که خود تابعی از تمام کیفیت‌های ذکر شده است. بنابراین می‌توان منحنی مشخصه زمین (تغییر شکل شعاعی - فشار سیستم نگهداری) را برای یک تونل معین با خواص معلوم زمین بدست آورد.

#### ۴-۲-۱- فرضیات اساسی در رسم منحنی مشخصه زمین

- ۱- هندسه تونل: تونل را با مقطع دایره به شعاع  $r_i$  در نظر می‌گیرند. طول تونل به گونه‌ای است که مساله را می‌توان به صورت دوبعدی در نظر گرفت.
- ۲- میدان تنش در جا: تنشهای افقی و قائم باهم برابر و مساوی  $P_0$  است.
- ۳- فشار سیستم نگهداری: فرض می‌شود که سیستم نگهداری نصب شده فشار  $P_i$  را به صورت شعاعی و یکنواخت به دیواره‌ها و جدار تونل اعمال می‌کند.
- ۴- خصوصیات توده سنگ اصلی: توده سنگ اصلی الاستیک فرض شده و معیار شکست این توده سنگی با رابطه (۴-۱) بیان می‌شود:

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

که در آن:

$\sigma_1$  = تنش اصلی ماکزیمم در لحظه شکستگی نهایی

$\sigma_3$  = تنش اصلی مینیمم

$\sigma_c$  = مقاومت فشاری تک محوری سنگ

$m$  و  $s$  = مقادیر ثابتی که به خواص توده سنگ بستگی دارند.

« خصوصیات توده سنگ شکسته: فرض می‌شود که توده سنگی شکسته که تونل را در بر گرفته است، پلاستیک کامل باشد و از معیار شکست زیر پیروی کند:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_r \sigma_c \sigma_3 + s_r \sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (۲-۴)$$

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

« کرنش‌های حجمی: در منطقه الاستیک، کرنشهای حجمی با ثوابت الاستیک  $E$  و  $\nu$  مشخص می‌شوند. در لحظه شکست و شکست کامل، سنگ افزایش حجم می‌دهد و کرنشهای حجمی با استفاده از قانون جریان در تئوری پلاستیسیته، محاسبه می‌شوند.

« رفتار وابسته به زمان: فرض می‌شود که توده سنگهای اصلی و شکسته هیچکدام رفتار وابسته به زمان از خود نشان نمی‌دهند.

« گسترش منطقه پلاستیک: فرض می‌شود که منطقه پلاستیک تا شعاع  $r_p$  گسترش یابد که این گسترش به فشار  $P_0$ ، فشار سیستم نگهداری  $P_i$  و خصوصیات مصالح سنگی الاستیک و پلاستیک بستگی دارد.

« تقارن شعاعی: در تمام این بحث‌ها، مسئله به صورت متقارن حول محور تونل تحلیل می‌شود. اگر وزن سنگ در منطقه شکسته در تحلیل منظور شود، این تقارن ساده‌کننده از بین خواهد رفت. از آنجا که وزن سنگ شکسته در طراحی سیستم نگهداری فوق‌العاده مهم است، بعد از اتمام تحلیل اصلی، اثر وزن را بطور تقریبی منظور می‌کنند [۱۵ و ۲۰].

#### ۴-۲-۲-۴- مراحل رسم منحنی مشخصه زمین

اطلاعات مورد نیاز [۱۵ و ۱۸]:

$\sigma_c$  = مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر

$s$  و  $m$  = ثابتهای توده سنگ اصلی

$E$  = مدول الاستیسیته توده سنگ اصلی

$U$  = ضریب پواسون توده سنگ اصلی

$m_r, s_r$  = ثابتهای توده سنگ شکسته

$\gamma_r$  = وزن مخصوص توده سنگ شکسته

$P_0$  = اندازه تنش درجا

$r_i$  = شعاع تونل

$P_i$  = فشار داخلی سیستم نگهداری

ابتدا باید سه پارامتر  $M$  و  $D$  و  $N$  را محاسبه کرد [۱۵ و ۱۸]:

$$M = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{m}{4} \right)^2 + \frac{mP_0}{\sigma_c} + s \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{m}{8} \quad (۳-۴)$$

$$D = \frac{-m}{m + 4 \left[ \frac{m}{\sigma_c} (P_0 - M\sigma_c) + s \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (۴-۴)$$

$$N = 2 \left[ \frac{P_0 - M\sigma_c}{m_r \sigma_c} + \frac{s_r}{m_r^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۵-۴)$$

فشار بحرانی از رابطه (۶-۴) بدست می آید [۱۵ و ۱۸]:

$$P_{icr} = P_0 - M\sigma_c \quad (۶-۴)$$

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

با [۱۴ و ۱۶]:

$$U_i = r_i \times \frac{(1+\nu)}{E} (P_0 - P_i) \quad (۷-۴)$$

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

زیر محاسبه می شود [۱۵ و ۱۸]:

$$\frac{U_c}{r_i} = \frac{(1+\nu)}{E} M\sigma_c \quad (۸-۴)$$

$$\frac{r_e}{r_i} = \exp\left(N - 2\left(\frac{P_i}{m_r \sigma_c} + \frac{s_r}{m_r^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \quad (9-4)$$

به ازای  $\frac{r_e}{r_i}$  بزرگتر از  $\sqrt{3}$ :

$$R = 1.1 \times D \quad (10-4)$$

و به ازای  $\frac{r_e}{r_i}$  کوچکتر از  $\sqrt{3}$ :

$$R = 2 \times D \times \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) \quad (11-4)$$

$$e_{av} = \frac{2\left(\frac{U_e}{r_e}\right)\left(\frac{r_e}{r_i}\right)^2}{\left[\left(\frac{r_e}{r_i}\right)^2\left(1 + \frac{1}{R}\right)\right]} \quad (12-4)$$

$$A = \left(2\left(\frac{U_e}{r_i}\right) - e_{av}\right) \times \left(\frac{r_e}{r_i}\right)^2 \quad (13-4)$$

$$U_i = r_i \times \left(1 - \left[\frac{1 - e_{av}}{1 + A}\right]^{\frac{1}{2}}\right) \quad (14-4)$$

$R$ ،  $e_{av}$  و  $A$  پارامترهایی هستند که در محاسبه  $U_i$  بکار می روند.

$r_e$ ، شعاع منطقه الاستیک و  $U_e$ ، جابجایی شعاعی در مرز الاستیک است.

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

## ۳-۴- منحنی مشخصه سیستم نگهداری

این منحنی با فرض آنکه صلیبیت سیستم نگهداری ثابت است، خطی فرض می‌شود و حال آنکه در عمل اینطور نیست. در شکل ۱-۴ خط سیستم نگهداری رسم شده است. در این شکل:

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

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

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

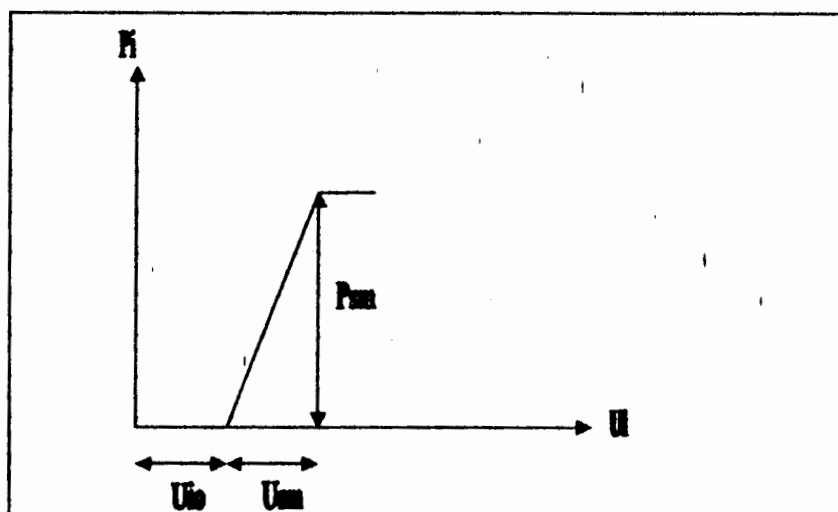
می باشد. در این حالت تغییر شکل نهایی تونل برابر است با:

$$U_i = U_{io} + U_{ie} \quad (۱۵-۴)$$

که  $U_{ie}$  تغییر شکل الاستیک سیستم نگهداری است و برابر است با [۱۵]:

$$U_{ie} = \frac{P_{sm} \times r_i}{k_c} \quad (۱۶-۴)$$

در رابطه بالا  $r_i$  شعاع تونل و  $k_c$  سختی سیستم نگهداری است.



شکل ۱-۴- منحنی سیستم نگهداری [۱۵]

بنابراین برای رسم خط سیستم نگهداری، علاوه بر مشخص بودن تغییر شکل شعاعی اولیه (که در قسمت ۳-۴-۱ درباره آن صحبت می‌شود) باید  $P_{\text{سم}}$  و  $k$  را نیز محاسبه کرد. این محاسبات برای شاتکریت، پیچ‌سنگ و سیستم ترکیبی شاتکریت و پیچ‌سنگ فرق می‌کند که در مباحث بعدی به آن پرداخته می‌شود.

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

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

همگرایی بعد از حفاری فوراً متوقف نمی‌شود. در واقع همگرایی قبل از رسیدن جبهه‌کار به مقطع مورد نظر شروع و پس از حفاری مقطع مورد نظر و رد شدن از آن نیز ادامه می‌یابد. همگرایی تابع سرعت پیشروی جبهه‌کار و توقف‌های احتمالی در کار بوده و سرعت همگرایی نیز تابع خواص رئولوژیک زمین است. برای تعیین خواص رئولوژیک زمین باید در آزمایشگاه بر روی نمونه‌ها آزمون وارفنگی یا خزش انجام داد که مستلزم صرف زمان زیادی است [۱۱].

از آنجا که مدلسازی معادلات خزش مشکل است و همچنین تجربه نشان داده است که در هنگام حفاری مشابه در ساختگاه سد به علت ریزشی بودن تونل فوراً نیاز به اجرای سیستم نگهداری است، پس می‌شود که از تاثیر زمان صرف‌نظر کرد و می‌توان گفت که تغییر شکل شعاعی تونل، تابعی از فاصله و جبهه کار پیشروی تا سیستم نگهداری و سرعت پیشروی می‌باشد.

طبق نظر چانگ<sup>۲</sup> (۱۹۹۴)، همگرایی ( $U(x)$ ) در مقطعی که به فاصله  $X$  از سینه‌کار قرار دارد

برابر است با [۲۱]:

<sup>۲</sup> Chang

$$U(x) = U_{total} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{U_{io}}{U_{total}} \right) \left( 1 + 1.19 \frac{X}{R_p} \right)^2 \right] \quad (17-4)$$

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

بر اساس گفته پانت و گونت<sup>۲</sup> (۱۹۸۳)،  $\frac{U_{io}}{U_{total}}$  مقداری ثابت و برابر ۰/۲۸ می‌باشد (یعنی ۲۸ درصد کل جابجایی بعد از حفر انجام خواهد شد). آقای چانگ رابطه مستقلی جهت محاسبه  $\frac{U_{io}}{U_{total}}$

ارائه کرده است [۲۱]:

$$\frac{U_{io}}{U_{total}} = 0.279 \left( \frac{R_p}{R_i} \right)^{0.203} \quad (18-4)$$

که  $R_p$  شعاع منطقه پلاستیک اطراف تونل و  $R_i$  شعاع تونل می‌باشد.

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

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

۲ همگرایی بحرانی  $U_{crit}$ ، مقدار همگرایی است که فشار کلی وسیله نگهداری حداقل خواهد بود.

در هنگام نصب سیستم نگهداری باید دقت شود که رابطه زیر برقرار باشد:

$$U_{io} + U_{sm} < U_{crit} \quad (19-4)$$

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

<sup>۲</sup> Guenot, A. P. et al, M.

## ۴-۳-۲- سیستم نگهداری موجود برای شاتکریت

صلبیت سیستم نگهداری از رابطه (۲۰-۴) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$K_c = \frac{E_c [r_i^2 - (r_i - t_c)^2]}{(1 + \nu_c) [(1 - 2\nu_c)r_i^2 + (r_i - t_c)^2]} \quad (20-4)$$

که در آن:

$E_c$  = مدول الاستیسیته بتن

$\nu_c$  = ضریب پواسون بتن

$r_i$  = شعاع تونل

$t_c$  = ضخامت شاتکریت

وجود توری سیمی نقش مهمی در کنترل و توزیع تنشها و ترکها در پوشش ایفا می‌کند، اما در افزایش صلبیت نقش چندانی ندارد. حداکثر فشار سیستم نگهداری که به وسیله پوشش شاتکریت ایجاد می‌شود از رابطه (۲۱-۴) بدست می‌آید:

$$P_{\text{sum}} = \frac{1}{2} \sigma_c \left[ 1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] \quad (21-4)$$

که در آن  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک‌محوره شاتکریت است.

## ۴-۳-۳- سیستم نگهداری برای پیچ‌سنگ تزریقی

مفاهیم مربوط به اندرکنش سیستم نگهداری-سنگ را نمی‌توان برای پیچ‌سنگهای تزریقی بکار برد، علت آنستکه این سیستم‌ها مستقل از سنگ عمل نمی‌کنند و لذا تغییر شکلهایی که در توده‌سنگ و سیستم نگهداری اتفاق می‌افتد را نمی‌توان از یکدیگر مجزا کرد. به عقیده هوک و براون عمل تقویت‌کنندگی پیچ‌سنگهای تزریقی در توده‌های سنگی به علت تقویت درونی توده سنگ است که تا حد زیادی مشابه نقش میلگردها در بتن مسلح است. به علت به هم دوختن توده سنگ و جدایی بلوکهای منفرد، سیستم‌های تزریقی، اتساع در توده سنگ اطراف تونل را محدود می‌کنند. این امر

موجب می‌شود که ثابتهای توده سنگ اصلی  $m$  و  $s$  در تبدیل به  $m_r$  و  $s_r$  کمتر کاهش یابند (لازم به ذکر است که با افزایش اندکی در مقدار  $m_r$  و  $s_r$  تغییر شکل شدیداً کاهش می‌یابد) [۱۵].

از آنجا که اثر تزریق برای محاسبه مستقیم خط عکس‌العمل پیچ‌سنگ تزریقی بر پایه تحلیل اندرکنش سنگ - سیستم نگهداری ممکن نیست، می‌توان فرض کرد که تزریق باعث اتصال سنگها به هم و افزایش مقاومت کششی آنها می‌شود. بنابراین در تحلیل پیچ‌سنگ تزریقی، با افزایش مقادیر  $m_r$  و  $s_r$  می‌توان از روابط تحلیلی پیچ‌سنگ غیر تزریقی استفاده کرد. این روابط در زیر آمده‌اند [۱۵]:

$$\frac{1}{K_b} = \frac{S_c S_l}{r_i} \left[ \frac{4l}{\pi d_b^2 E_b} + Q \right] \quad (22-4)$$

که در آن :

$K_b$  = صلبیت پیچ‌سنگ

$S_c$  = فاصله‌داری محیطی پیچ‌سنگها

$S_l$  = فاصله‌داری طولی پیچ‌سنگها

$l$  = طول پیچ‌سنگ

$d_b$  = قطر پیچ‌سنگ

$E_b$  = مدول الاستیسیته پیچ‌سنگ

$Q$  = ثابت بار - تغییر شکل برای بخش گیرش و زاس پیچ‌سنگ

$r_i$  = شعاع تونل

$$P_{stm} = \frac{T_{bf}}{S_c S_l} \quad (23-4)$$

که در آن :

$P_{stm}$  = حداکثر فشار سیستم نگهداری پیچ‌سنگ

$T_{bf}$  = بار گسیختگی نهایی حاصل از آزمون بیرون‌کشی

## ۴-۳-۴- سیستم نگهداری ترکیبی

اگر دو سیستم پیچ سنگ و شاکریت با هم ترکیب شوند، صلبیت سیستم نگهداری ترکیبی مساوی جمع صلبیت افزایش سیستم‌هاست. در سیستم‌های ترکیبی فرض بر این است که دو سیستم به طور همزمان با هم نصب می‌شوند و واکنش‌ها نسبت به تغییر شکل تونل به طور همزمان است. ترتیب محاسبات برای رسم منحنی سیستم نگهداری به شرح زیر است [۱۵]:

ابتدا باید سه پارامتر زیر را محاسبه کرد:

$$U_{\max 1} = \frac{r_i P_{sm1}}{K_1} \quad (24-4)$$

$$U_{\max 2} = \frac{r_i P_{sm2}}{K_2} \quad (25-4)$$

$$U_{12} = \frac{r_i P_i}{(K_1 + K_2)} \quad (26-4)$$

که در روابط بالا:

$$K_1 = \text{سختی سیستم نگهداری اول}$$

$$K_2 = \text{سختی سیستم نگهداری دوم}$$

$$P_{sm1} = \text{حداکثر فشار سیستم نگهداری اول}$$

$$P_{sm2} = \text{حداکثر فشار سیستم نگهداری دوم}$$

حال برای وضعیت  $U_{12} < U_{\max 1} < U_{\max 2}$  خواهیم داشت:

$$U_i = U_{10} + \frac{P_i \times r_i}{(K_1 + K_2)} \quad (27-4)$$

و برای وضعیت  $U_{12} > U_{\max 1} < U_{\max 2}$  خواهیم داشت:

$$P_{\max 12} = U_{\max 1} \frac{(K_1 + K_2)}{r_i} \quad (28-4)$$

و در مورد وضعیت  $U_{12} > U_{\max 2} < U_{\max 1}$  خواهیم داشت:

$$P_{\max 12} = U_{\max 2} \frac{(K_1 + K_2)}{r_i} \quad (۲۹-۴)$$

#### ۴-۴- تحلیل منحنی عکس العمل سیستم نگهداری بر روی منحنی مشخصه

##### زمین مسیر تونل انتقال آب

رسم منحنی مشخصه زمین در توده سنگهای مسیر تونل انتقال آب، بر سه مقطع یعنی زون

ورودی B (در فاصله ۵۰۰ متری از دهانه ورودی تونل)، زون خروجی A (در فاصله ۲۳۰۰ متری از

دهانه ورودی تونل) و مقطع حداکثر روباره در زون خروجی A (فاصله ۱۷۰۰ متری از دهانه ورودی

تونل) صورت گرفته است. در این تحلیلها از اطلاعات جدول ۴-۱ استفاده شده است.

جدول ۴-۱- اطلاعات لازم برای رسم منحنی مشخصه زمین برای سه مقطع مورد نظر\*

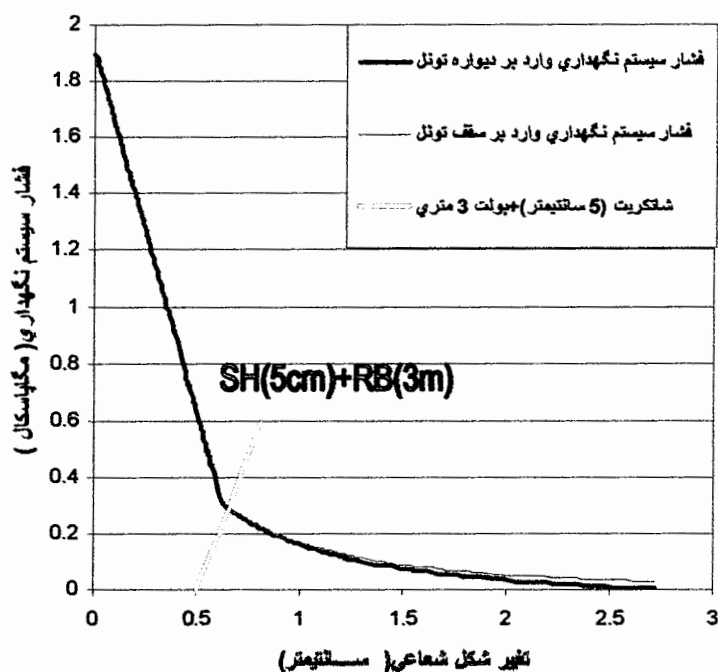
	زون خروجی A	مقطع حداکثر روباره	زون ورودی B
RMR	۳۴	۳۴	۵۲
مدول الاستیک توده سنگ (گیگاپاسکال)	۰/۵	۰/۷	۰/۷
مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	۵/۲	۵/۲	۶/۵
S) پارامتر هوک و برلون	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۷
M) پارامتر هوک و برلون	۴-۵	۵	۵-۷
دانسیته (گرم بر سانتی متر مکعب)	۲/۲۲	۲/۲۲	۲/۴۳
ضریب پواسون	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۳
حداکثر روباره (متر)	۱۰۰	۱۸۰	۸۰

\* چگونگی محاسبه بعضی از پارامترهای جدول در پیوست ۶ آمده است

در مورد سیستم نگهداری واضح است که شاتکریت لازم است، چرا که علاوه بر وظیفه جلوگیری از ریزش سنگهای خرد شده به داخل تونل و پایداری موقت تا نصب نگهدارنده دائمی، سطح حفاری شده را در برابر هوازدگی حفاظت می‌نماید. از آنجا که شاتکریت در مارن نقش نگهداری غیر فعال را ایفا می‌کند، به نظر می‌رسد که استفاده از پیچ‌سنگ نیز ضرورت داشته باشد. مشخصات پیچ‌سنگها به پیشنهاد مهندسین اجرایی ساختگاه سد، ۳ متر طول با قطر ۲۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

منحنی سیستم نگهداری و منحنی مشخصه زمین برای توده‌سنگهای زون B مطابق شکل ۲-۴

می‌باشد:

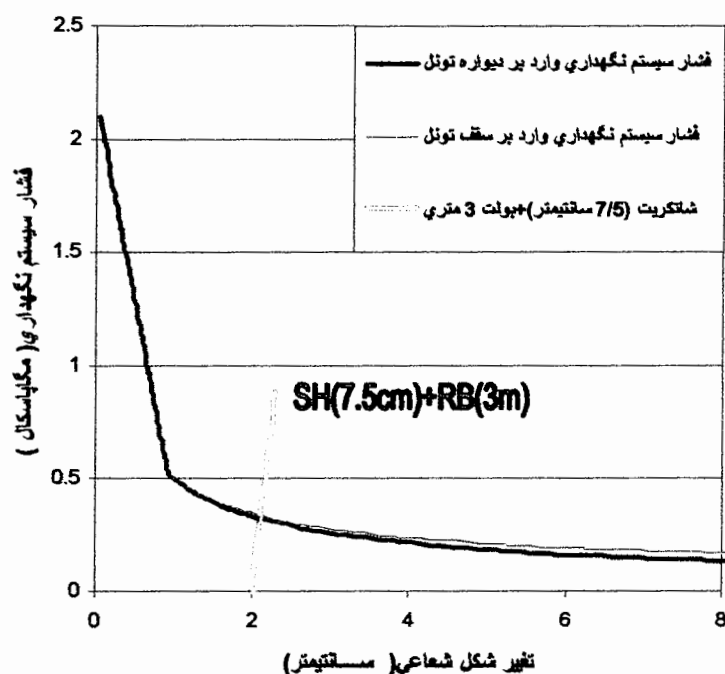


شکل ۲-۴- منحنی سیستم نگهداری و زمین برای توده‌سنگهای زون B

با استفاده از نتایجی که از روش طراحی تجربی بدست آمد، با اجرای سیستم نگهداری ۵ سانتیمتر شاتکریت و پیچ سنگ ۳ متری با فاصله‌داری  $1/5 \times 1/5$ ، در توده سنگهای زون B و با فرض اینکه تغییرشکل شعاعی اولیه سنگهای اطراف تونل ۰/۵ سانتیمتر باشد، تغییرشکل شعاعی کلی در ۰/۶۶ سانتیمتری متوقف می‌شود. در این حالت فشار وارد بر سیستم نگهداری ۰/۳ مگاپاسکال و ضریب اطمینان سیستم نگهداری برابر ۲ خواهد بود. لازم به ذکر است که تغییرشکل شعاعی در دیواره تونل در ۲/۷ سانتیمتری و در سقف تونل در ۳ سانتیمتری، بدون اجرای سیستم نگهداری، متوقف خواهد شد (مراحل رسم منحنیها در پیوست ۷ آمده است).

منحنی سیستم نگهداری و منحنی مشخصه زمین برای توده سنگهای زون A مطابق شکل

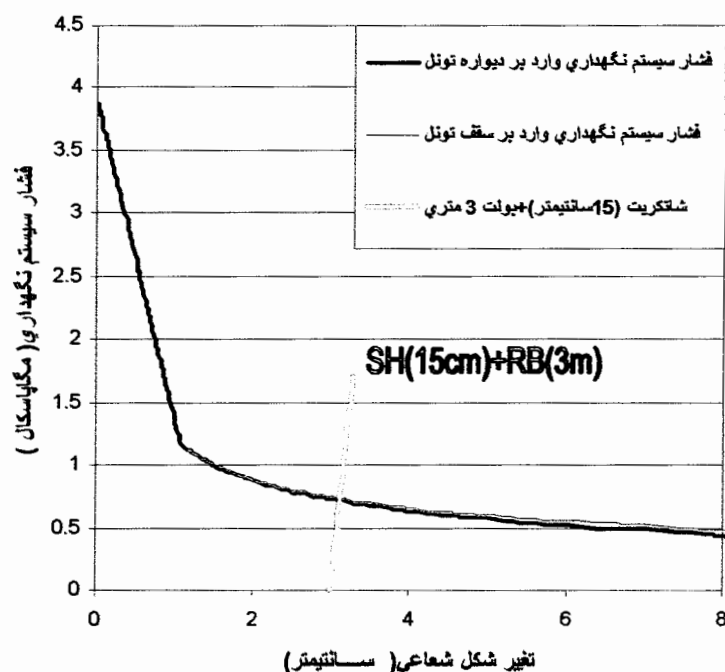
۳-۴ می‌باشد:



شکل ۳-۴- منحنی سیستم نگهداری و زمین برای توده سنگهای زون A

با استفاده از نتایجی که از روش طراحی تجربی بدست آمد، با اجرای سیستم نگهداری ۷/۵ سانتیمتر شاتکریت و پیچ سنگ ۳ متری با فاصله‌داری ۱/۵×۱/۵، در توده سنگهای زون A و با فرض اینکه تغییرشکل شعاعی اولیه سنگهای اطراف تونل ۲ سانتیمتر باشد، تغییرشکل شعاعی کلی در ۲/۱ سانتیمتری متوقف می‌شود. در این حالت فشار وارد بر سیستم نگهداری ۰/۳۳ مگاپاسکال و ضریب اطمینان سیستم نگهداری ۲/۷ خواهد بود. لازم به ذکر است که تغییرشکل شعاعی در دیواره تونل در ۱۵ سانتیمتری و در سقف تونل در ۱۷ سانتیمتری، بدون اجرای سیستم نگهداری، متوقف خواهد شد) اجرای ۷/۵ سانتی متر شاتکریت، نقطه عملکرد بهتری را نسبت به اجرای ۵ سانتی متر شاتکریت در منحنی سیستم نگهداری نتیجه می‌دهد).

منحنی سیستم نگهداری و منحنی مشخصه زمین برای توده سنگهای زون خروجی A (مقطع حداکثر روباره) مطابق شکل ۴-۴ می‌باشد:



شکل ۴-۴- منحنی سیستم نگهداری و زمین برای توده سنگهای زون خروجی A (مقطع حداکثر روباره)

با اجرای سیستم نگهداری ۱۵ سانتیمتر شاتکریت و پیچ سنگ ۳ متری با فاصله‌داری  $1/5 \times 1/5$ ، در مقطع حداکثر روباره و با فرض اینکه تغییر شکل شعاعی اولیه سنگهای اطراف تونل ۳ سانتیمتر باشد، تغییر شکل شعاعی کلی در  $3/1$  سانتیمتری متوقف می‌شود. در این حالت فشار وارد بر سیستم نگهداری  $0/7$  مگاپاسکال و ضریب اطمینان سیستم نگهداری  $2/4$  خواهد بود. لازم به ذکر است که تغییر شکل شعاعی در دیواره و سقف تونل، در ۲۸ سانتیمتری بدون اجرای سیستم نگهداری متوقف خواهد شد (اجرای شاتکریت با ضخامت ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر نقطه عملکرد مناسبی را نتیجه نمی‌دهد. ضمناً یادآوری می‌شود که در این مقطع نمی‌توان از نتایج طراحی تجربی سود جست).

بطور خلاصه بر اساس تحلیل اندرکنش سنگ - سیستم نگهداری می‌توان گفت که، اجرای شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر و به همراه پیچ سنگ ۳ متری با فاصله‌داری  $1/5$  در  $1/5$  متر، طرحی مناسب به عنوان سیستم نگهداری موقت برای مسیر ورودی تونل انتقال آب (زون B) به نظر می‌رسد. همچنین برای مسیر خروجی تونل (زون A)، نیاز به اجرای  $7/5$  تا ۱۵ سانتی‌متر شاتکریت می‌باشد که با پیچ سنگ ۳ متری با فاصله‌داری  $1/5$  در  $1/5$  متر مهار شود (البته واضح است که هر چه در این زون روباره افزایش یابد و به مقطع حداکثر روباره نزدیکتر شویم، اجرای ضخامت شاتکریت به ۱۵ سانتی‌متر خواهد رسید).

ضمناً، تغییر شکل شعاعی اولیه در هر سه مقطع مورد بحث بر طبق فرمولهای چانگ و پانت (روابط  $4-17$  و  $4-18$ ) بر اساس پیشروی به ازای هر گام حفاری  $1/5$  تا ۲ متر در هر شیفت (نظر به تجربیات مهندسين اجرایی در ساختگاه سد با توجه به سرعت پیشروی دستگاه حفار و ریزشی بودن مسیر) در نظر گرفته شده است.\*

---

\* میزان جابجایی کل شعاعی در هر گام پیشروی را می‌توان از نتایج روشهای عددی (نرم افزار) بدست آورد و سپس از فرمولها برای محاسبه تغییر شکل شعاعی اولیه استفاده کرد. هر چند که بهتر است در زمان حفر تونل از نتایج رفتارسنجی مسیر تونل برای محاسبه تغییر شکل شعاعی اولیه استفاده کرد.

از آنجا که در رسم منحنی مشخصه زمین و سیستم نگهداری فرضیاتی چون وجود تنش هیدرواستاتیک، دایروی بودن مقطع تونل و ... شده است نمی‌توان زیاد به نتایج این روش تکیه کرد و لذا ضرورت دارد که از روشهای مدلسازی عددی در راستای بهتر مدل کردن تونل در منطقه سود جست و محدودیتها و فرضیات را به حداقل رسانید.

## فصل پنجم

برآورد سیستم نگهداری موقت  
بر اساس روش عددی

## ۵-۱- مقدمه

در این فصل پس از بررسی کلیاتی در مورد روشهای عددی تحلیل تنش در تونلها، به تشریح نرم افزار FLAC3D پرداخته شده و در نهایت برای مسیر تونل تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت صورت گرفته است.

## ۵-۲- روشهای عددی

در جاهایی که روشهای تحلیلی قادر به حل واقعی مساله توزیع تنشها و تغییرشکلهای نیستند، قابلیت روشهای عددی آشکار می گردد. در این روشها معادلات مربوطه از طریق شرایط تعادل و قانون رفتاری اتخاذ شده به طور گام به گام حل می شوند [۱۱].

به طور کلی روشهای تحلیل تنش در حفاریات زیرزمینی را به دو گروه کلی 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 [۱۳]. این گروه شامل روشهایی چون: روش عناصر محدود<sup>۳</sup>، روش تفاوتهای محدود<sup>۴</sup> و روش عناصر مجزا<sup>۵</sup> می باشد.

۲- روشهای مرزی<sup>۶</sup> یا انتگرالی<sup>۷</sup>، فقط مرز خارجی حفاریات 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> می باشد [۱۳].

<sup>۱</sup> Domain

<sup>۲</sup> Differential

<sup>۳</sup> Finite elements

<sup>۴</sup> Finite difference

<sup>۵</sup> Distinct elements

<sup>۶</sup> Boundary

<sup>۷</sup> Integral

<sup>۸</sup> Boundary elements

نرم افزار بکار رفته برای تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل انتقال آب بابلک FLAC3D می باشد. این نرم افزار بر اساس روش تفاوت های محدود کار می کند که توده سنگی را به عنوان یک محیط پیوسته در نظر می گیرد.

### ۵-۳- نرم افزار FLAC3D

FLAC3D یک برنامه سه بعدی تفاوت محدود صریح<sup>۱</sup> برای محاسبات مهندسی ژئومکانیکی است و اساس کارش بر مبنای فرمولاسیون عددی برنامه دوبعدی FLAC می باشد که رفتار سه بعدی خاک و سنگ و مواد دیگری که به هنگام رسیدن به حد تسلیم از خود رفتار پلاستیک نشان می دهند را شبیه سازی می کند. مواد با المانهای چند وجهی معرفی می شوند که با شبکه سه بعدی گسترش یافته اند و کاربر با تعدیل آنها می تواند شکل مورد نظر خود را بسازد. هر المان بر طبق قانون تنش- کرنش خطی یا غیر خطی در برابر محدودیتهای مرزی و نیروهای اعمالی از خود واکنش نشان می دهد. مواد در اثر تنش اعمالی می توانند تسلیم شوند و شبکه ( در یک وضعیت کرنش بزرگ) تغییر شکل یابد [۲۲].

FLAC3D همانند روش المان محدود، معادلات تفاضلی را به معادلات ماتریسی برای هر المان معنی می کند. اگرچه معادلات FLAC3D از روش تفاوت محدود مشتق شده است، نتیجه المان ماتریسی برای یک ماده الاستیک همانند روش المان محدود است. با این وجود FLAC3D در موارد ذیل فرق قائل می شود [۲۲]:

(۱) شمای mixed discretization - که توسط مارتی و کاندال<sup>۲</sup> بیان شد- برای مدلسازی بارهای تخریبی پلاستیک و جریان پلاستیک استفاده می شود. این روش بر این باور است که از روش reduced integration - روشی که در المان محدود بکار می رود- قابل توجیه تر است.

<sup>۱</sup> Explicit finite difference

<sup>۲</sup> Marti & Cundall

۲) معادلات دینامیکی کامل از حرکت استفاده می‌شود، حتی هنگامی که سیستم مدلسازی اساساً استاتیک باشد. این قضیه باعث می‌شود که FLAC3D مسائل ناپایدار را نیز حل کند.

۳) شمای حل صریح<sup>۱۱</sup> استفاده می‌شود (در مقایسه با روشهای معمول مجازی). این خاصیت باعث کاهش زمان حل مساله غیر خطی نسبت به روش خطی می‌گردد (روشهای مجازی زمان زیادتری را برای حل مسائل غیر خطی بکار می‌برند). بعلاوه لازم نیست هر ماتریسی را ذخیره کنیم و این یعنی که: الف) المانهای بیشتری در زمان نسبتاً مناسب می‌توانند مدل شوند. ب) شبیه‌سازی کرنش بزرگ، به اندازه اجرای کرنش کوچک زمان گیر نیست چراکه هیچ ماتریس سختی نیست که به فرم شکل جدید در آید.

۴) FLAC3D یک نرم‌افزار قوی در حل مدل‌های ترکیبی بدون در نظر گرفتن هرگونه تعدیل در الگوریتم حل می‌باشد.

و از معایب این نرم‌افزار کند عمل کردن اجرای شبیه‌سازی خطی در مقایسه با روشهای المان محدود می‌باشد. در واقع FLAC3D وقتی موثر است، که برای مسائل کرنش بزرگ یا مسائل غیرخطی بکار رود و یا موقعیتهایی که از لحاظ فیزیکی ناپایدار باشند.

انواع مدل‌های FLAC3D (به استثنای مدل تهی، بقیه برای توده سنگ و خاک بکار

می‌روند) [۲۲]:

گروه مدل تهی:

• مدل تهی<sup>۱۲</sup>

گروه مدل الاستیک:

• مدل الاستیک<sup>۱۳</sup>

<sup>۱۱</sup> Explicit solution scheme

<sup>۱۲</sup> (Null model) این مدل برای ایجاد فضای خالی (مثلاً یک فضای استخراج شده) بکار می‌رود.

<sup>۱۳</sup> Elastic, isotropic model

• مدل الاستیک ارتوتروپیک<sup>۱۴</sup>

• مدل الاستیک ایزوتروپ عرضی<sup>۱۵</sup>

گروه مدل پلاستیک:

• مدل دراگر- پراگر<sup>۱۶</sup>

• مدل موهر- کولمب<sup>۱۷</sup>

• مدل درزه دار پلاستیک<sup>۱۸</sup>

• مدل کرنش نرم شوندگی و کرنش سخت شوندگی<sup>۱۹</sup>

• مدل درزه دار پلاستیک با کرنش نرم شوندگی و کرنش سخت شوندگی دوخطی<sup>۲۰</sup>

• مدل تسلیم مضاعف<sup>۲۱</sup>

• مدل اصلاح شده برای توده رسی<sup>۲۲</sup>

مدل بکار رفته در این تحقیق مدل موهر- کولمب می باشد. که بعنوان یک مدل مرسوم- که شکستگی های برشی در خاک و سنگ را در نظر می گیرد- استفاده می شود. این مدل پلاستیک برای موادی که تسلیم می شوند( زمانی که در معرض بارگذاری برشی قرار می گیرند)، کاربرد دارد اما تنش تسلیم فقط به تنشهای اصلی حداقل و حداکثر مربوط می شود و تنش اصلی متوسط تاثیری در تسلیم

<sup>14</sup> Elastic, orthotropic model

<sup>15</sup> Elastic, transversely model

<sup>16</sup> Draker - Prager model

<sup>17</sup> Mohr – Coulomb model

<sup>18</sup> Ubiquitous – joint model

<sup>19</sup> Strain – hardening/ softening model

<sup>20</sup> Bilinear strain – hardening/softening – ubiquitous – joint model

<sup>21</sup> Double – yield model

<sup>22</sup> Modified Cam – clay model

ندارد. در این مدل باید مشخصات مصالح از قبیل وزن مخصوص سنگ، مدول برشی، مدول حجمی، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مقاومت کششی و زاویه اتساع<sup>۲۳</sup> تعیین گردد.

#### ۵-۴- تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت تونل انتقال آب بابلک

در این قسمت به تحلیل سه مقطع یعنی مقطع زون ورودی B ( عمق ۸۰ متری در فاصله ۵۰۰ متری از دهانه ورودی تونل)، مقطع زون خروجی A ( عمق ۱۰۰ متری در فاصله ۲۳۰۰ متری از دهانه ورودی تونل) و مقطع حداکثر روباره ( زون خروجی A در عمق ۱۸۰ متری و فاصله ۱۷۰۰ متری از دهانه ورودی تونل) پرداخته می شود. اطلاعات لازم برای این سه مقطع در جدول ۵-۱ آمده است. ضمناً مدول برشی و مدول حجمی توده سنگ از فرمولهای زیر بدست می آیند:

$$S = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (۱-۵)$$

که در آن:

S، مدول الاستیسیته برشی و E، مدول الاستیک توده سنگ و  $\nu$ ، ضریب پواسون است و:

$$B = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (۲-۵)$$

که B، مدول حجمی می باشد.

<sup>۲۳</sup> (angle of dilatancy) - بازشدگی دو صفحه درز را اتساع گویند و زاویه اتساع، زاویه ای است که از آزمون مقاومت برشی مستقیم بر روی سطح ناپیوستگی بدست می آید ( در راهنمای نرم افزار پیشنهاد شده است که در صورت عدم اندازه گیری این پارامتر، این زاویه صفر درجه یا یک هشتم زاویه اصطکاک داخلی در نظر گرفته شود.

جدول ۵-۱- اطلاعات لازم مدل موهر کولمب برای سه مقطع

مقطع حداکثر روباره	زون خروجی A	زون ورودی B	
۱۸۰	۱۰۰	۸۰	عمق (متر)
۰/۷	۰/۵	۰/۷	مدول الاستیک توده سنگ ( گیگاپاسکال)
۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳	نسبت پواسون
۲۲۲۰	۲۲۲۰	۲۴۳۰	دانسیته (کیلوگرم بر متر مکعب)
۰/۶۵	۰/۵۲	۰/۵۸	مدول حجمی ( گیگاپاسکال)
۰/۲۶	۰/۱۸	۰/۲۷	مدول برشی ( گیگاپاسکال)
۰/۳	۰/۳	۰/۴	مقاومت کششی ( مگاپاسکال)
۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۸	چسبندگی ( مگاپاسکال)
۲۷	۲۵	۳۲	زلویه اصطکاک داخلی ( درجه)

## ۵-۴-۱- تعیین K بحرانی در مدلسازی نگهداری موقت

یکی از اطلاعات موردنیاز در مدلسازی تعیین تنشهای برجا ( چه تنشهای قائم و چه تنشهای افقی) می باشد. تنش قائم در صورتی که شرایط تنش ثقلی حاکم باشد بر اساس وزن مخصوص توده سنگ یا خاک و ارتفاع روباره قابل محاسبه است و تنش افقی نسبتی از تنش قائم است. رابطه این دو تنش به صورت زیر است:

$$\sigma_H = K \times \sigma_V$$

که :

$$\sigma_H = \text{تنش افقی}$$

$$\sigma_V = \text{تنش قائم}$$

$$K = \text{نسبت تنش افقی به تنش قائم}$$

از آنجا که تنشهای برجا در منطقه اندازه گیری نشده اند، برای کنترل پایداری تونل نسبت به مقادیر مختلف  $K$  اقدام به آنالیز حساسیت شده است. به این ترتیب که مدلسازی در تمام زونهای مسیر تونل به ازای  $K$  های مختلف ۰/۲۵، ۰/۵، ۱۰/۷۵، ۱/۲۵ و ۱/۵ انجام شده است. نتایج در جدول ۲-۵ آمده است.

جدول ۲-۵- میزان حداکثر جابجاییها در سقف و دیواره تونل برای سه مقطع و به ازای  $K$  های مختلف در شرایط

کرنش صفحهای

	$K$	جابجایی قائم در سقف (سانتیمتر)	جابجایی افقی در دیواره (سانتیمتر)
زون A	۰/۲۵	۲۵/۶	۲۲/۵
	۰/۵	۲۲/۵	۲۲/۸
	۰/۷۵	۱۹/۷	۱۹/۴
	۱	۲۲/۱	۱۹/۳
	۱/۲۵	۲۶/۵	۲۱/۳
	۱/۵	۳۲/۴	۲۵/۲
زون حداکثر دیواره	۰/۲۵	۳۰	۲۹
	۰/۵	۲۲/۷	۲۵/۸
	۰/۷۵	۲۱	۲۲/۶
	۱	۲۶/۱	۲۴/۲
	۱/۲۵	۳۱/۱	۲۶/۸
	۱/۵	۳۷	۳۱/۲
زون B	۰/۲۵	۴	۲/۶
	۰/۵	۲/۵۸	۲/۷۱
	۰/۷۵	۲/۷۹	۱/۹۳
	۱	۳/۵۶	۳/۲۹
	۱/۲۵	۴/۶۳	۳/۷۴
	۱/۵	۵/۷۸	۴/۲۸

۵-۴-۱-۱- مراحل تحلیل تنش در زون خروجی A به ازای  $K=1/5$ \*

\* مقادیر جابجایی، قبل از نصب نگهدارنده برای کل مسیر تونل به ازای کلهای مختلف در جدول ۵-۲ آمده است.

منظور از کرنش صفحه‌ای برقراری رابطه  $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = 0$  در تئیسور کرنش است. معمولاً مسائلی که در آن یک بعد نسبت به دو بعد دیگر خیلی بزرگ باشد را در این حالت تحلیل می‌کنند. در این صورت تغییرات هر پارامتر مدل نسبت به محور سوم برابر صفر است.

مدل در راستای ضخامت ( تا شرایط کرنش صفحه‌ای برقرار شود) نیز به صورت غلتکی فرض می‌شود (شکل ۵-۲-ب). وضعیت المان‌بندی سنگهای اطراف تونل در شکل ۵-۳ آمده است.

پس از اعمال شرایط مرزی و حفر تونل، اقدام به حل مساله تا رسیدن به یک جواب همگرایی می‌شود. وضعیت جابجایی‌ها و تنشهای اطراف تونل در اشکال ۵-۴ تا ۵-۱۰ آمده است.

شکل ۵-۴ وضعیت جابجاییها را پس از حفر تونل و قبل از نصب نگهدارنده نشان می‌دهد. در این شکل، مقدار حداکثر بردار جابجایی  $32/4$  سانتی‌متر می‌باشد.

شکل ۵-۵ حداکثر جابجایی قائم در سقف تونل در زون A قبل از نصب نگهدارنده را به ازای  $K=1/5$  نشان می‌دهد که مقدار آن  $32/4$  سانتی‌متر می‌باشد ( لازم به ذکر است که در هیستوگرام‌های رسم شده FLAC3D در این پایان‌نامه، محور قائم، جابجایی بر حسب متر و محور افقی تعداد تکرارهای مدل می‌باشد. چنانچه منحنی مجانب افقی پیدا کند نشان دهنده آنست که به جواب همگرا نزدیک شده است).

شکل ۵-۶ منحنی تراز جابجایی قائم در اطراف تونل در زون A قبل از نصب نگهدارنده را به ازای  $K=1/5$  نشان می‌دهد که مقدار حداکثر جابجایی در سقف است و برابر  $32/4$  سانتی‌متر می‌باشد.

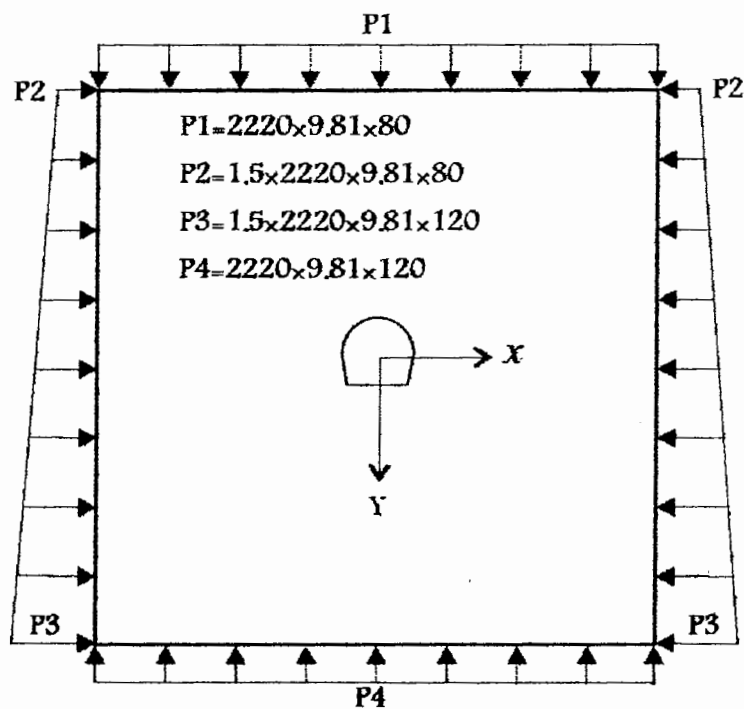
شکل ۵-۷ حداکثر جابجایی افقی در دیواره تونل در زون A قبل از نصب نگهدارنده را به ازای  $K=1/5$  نشان می‌دهد که مقدار آن  $25/2$  سانتی‌متر می‌باشد.

شکل ۵-۸ منحنی تراز جابجایی افقی در اطراف تونل در زون A قبل از نصب نگهدارنده را به ازای  $K=1/5$  نشان می‌دهد که مقدار حداکثر جابجایی در دو طرف دیواره است و برابر  $25/2$  سانتی‌متر می‌باشد.

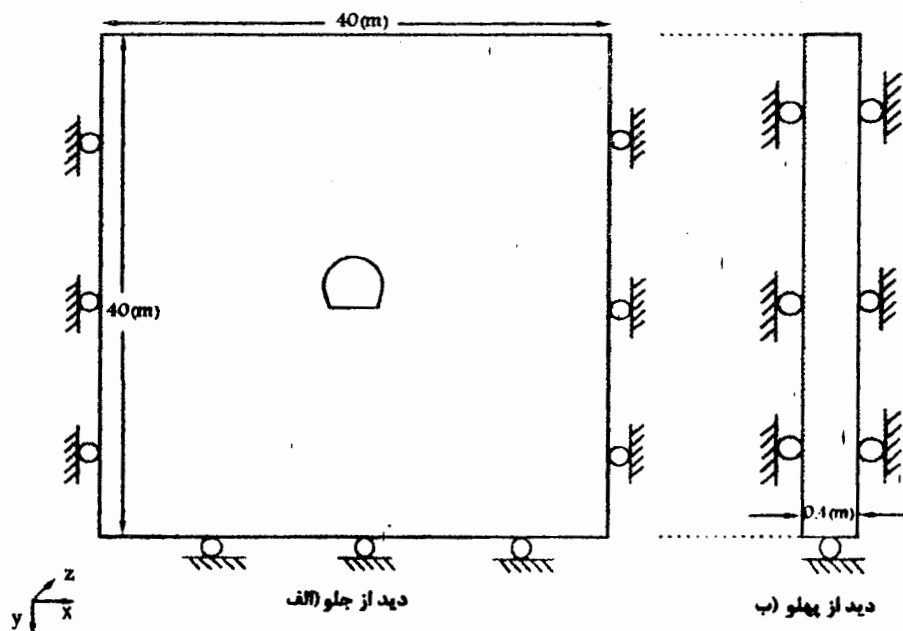
شکل ۵-۹ منحنی تراز تنش افقی در اطراف تونل در زون A قبل از نصب نگهدارنده را به ازای  $K=1/5$  نشان می‌دهد که این مقدار در اطراف تونل برابر  $10^4 \times 1/34$  پاسکال می‌باشد.

شکل ۵-۱۰ منحنی تراز تنش قائم در اطراف تونل در زون A قبل از نصب نگهدارنده را به ازای

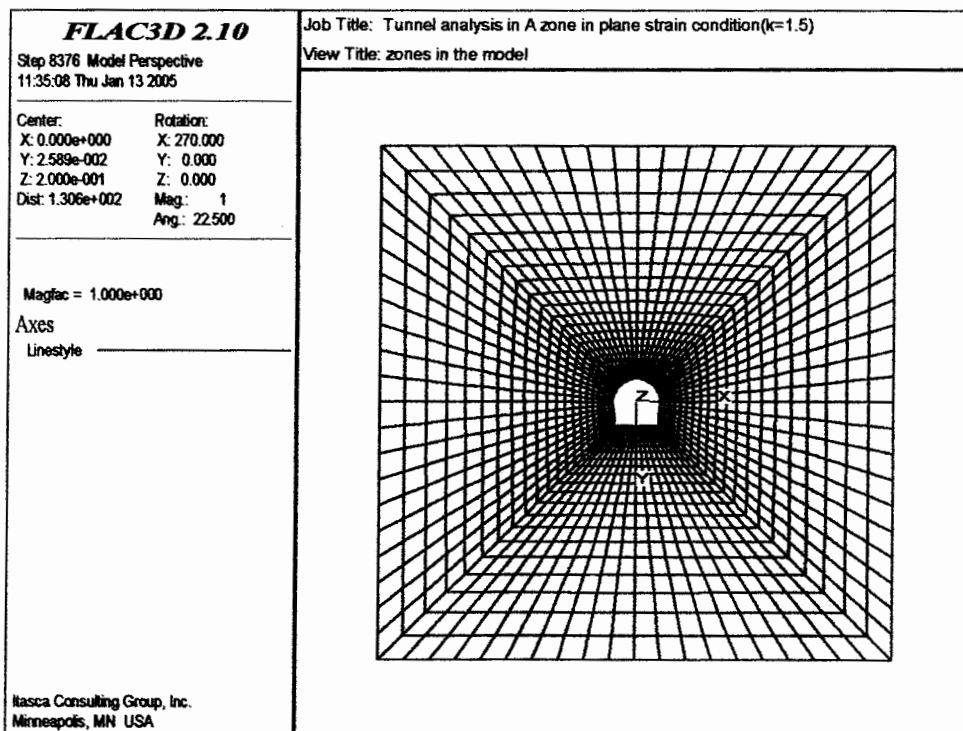
$K=1/5$  نشان می‌دهد که این مقدار در اطراف تونل برابر  $1/41 \times 10^4$  پاسکال می‌باشد.



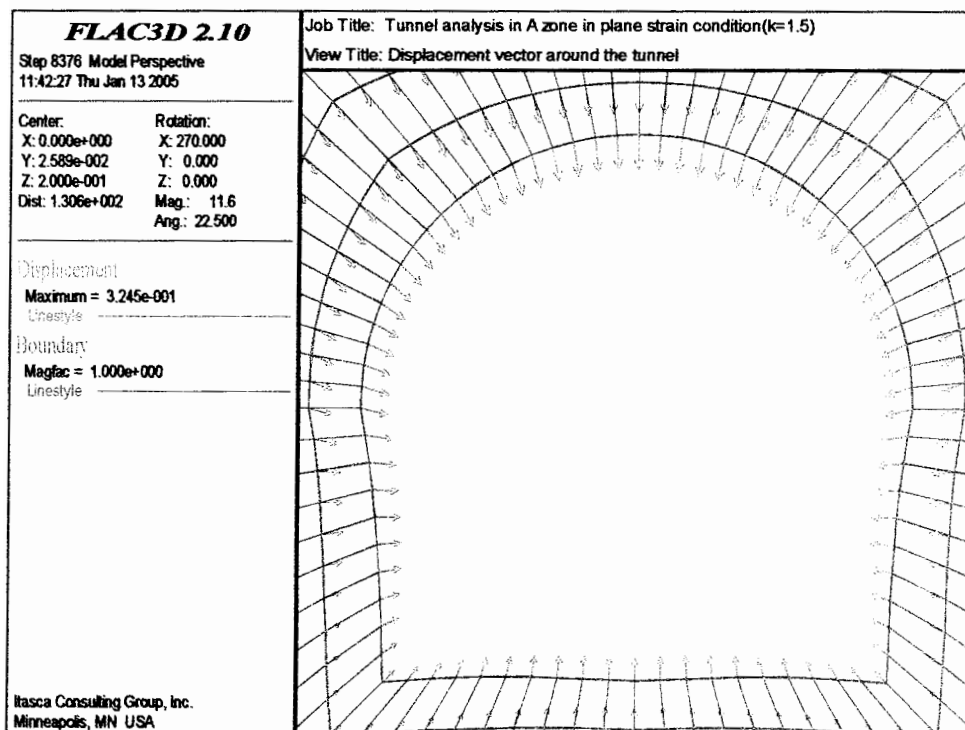
شکل ۵-۱- وضعیت تنشها در مدل



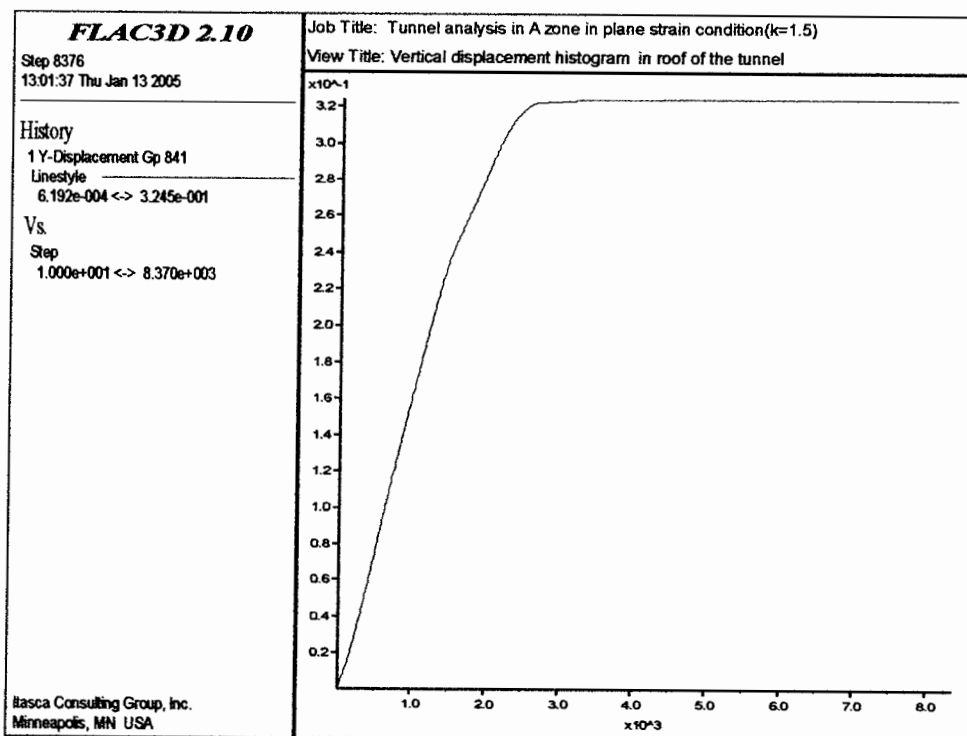
شکل ۵-۲- وضعیت مرزها در مدل



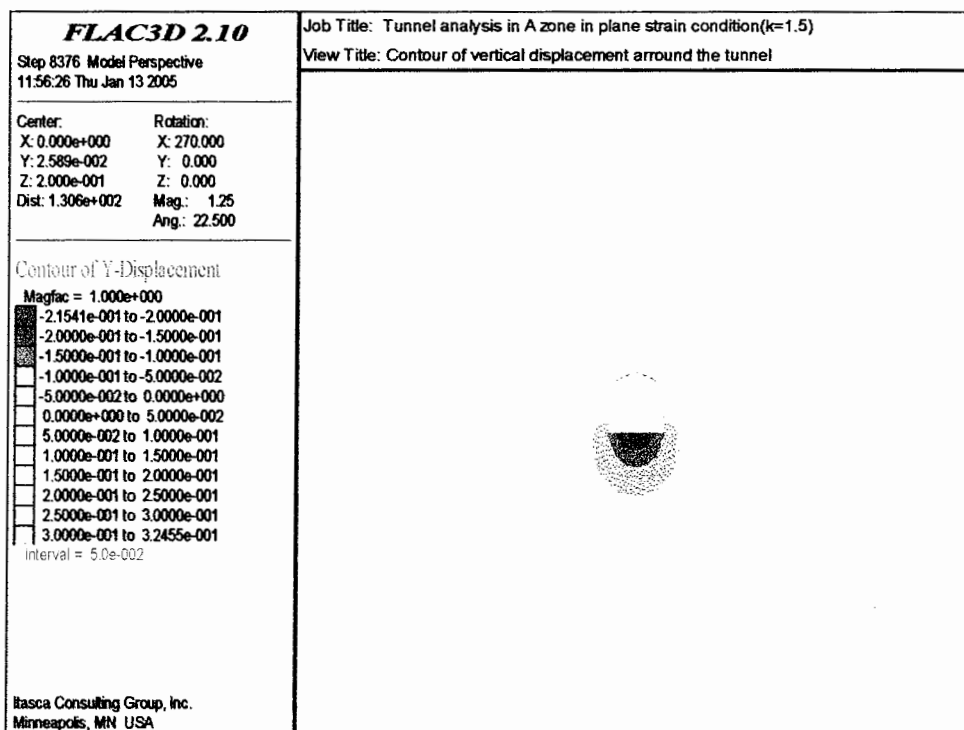
شکل ۳-۵- المان بندی مدل در نرم افزار



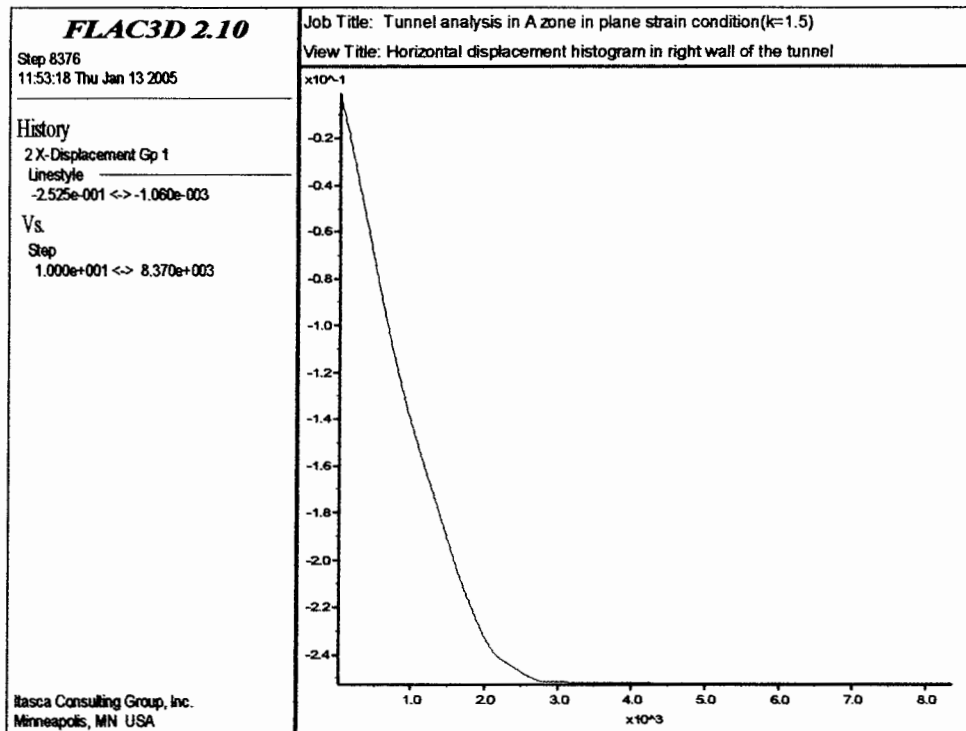
شکل ۴-۵- وضعیت جابجاییها پس از حفر تونل و قبل از نصب نگهدارنده



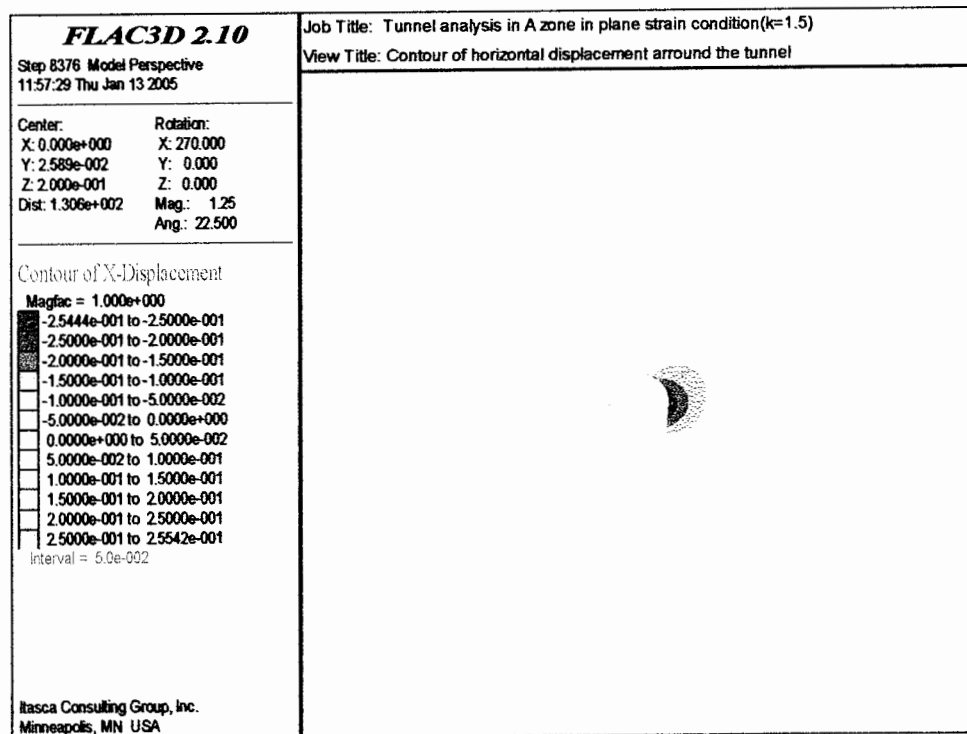
شکل ۵-۵- حداکثر جابجایی قائم در سقف در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای  $K = 1/5$



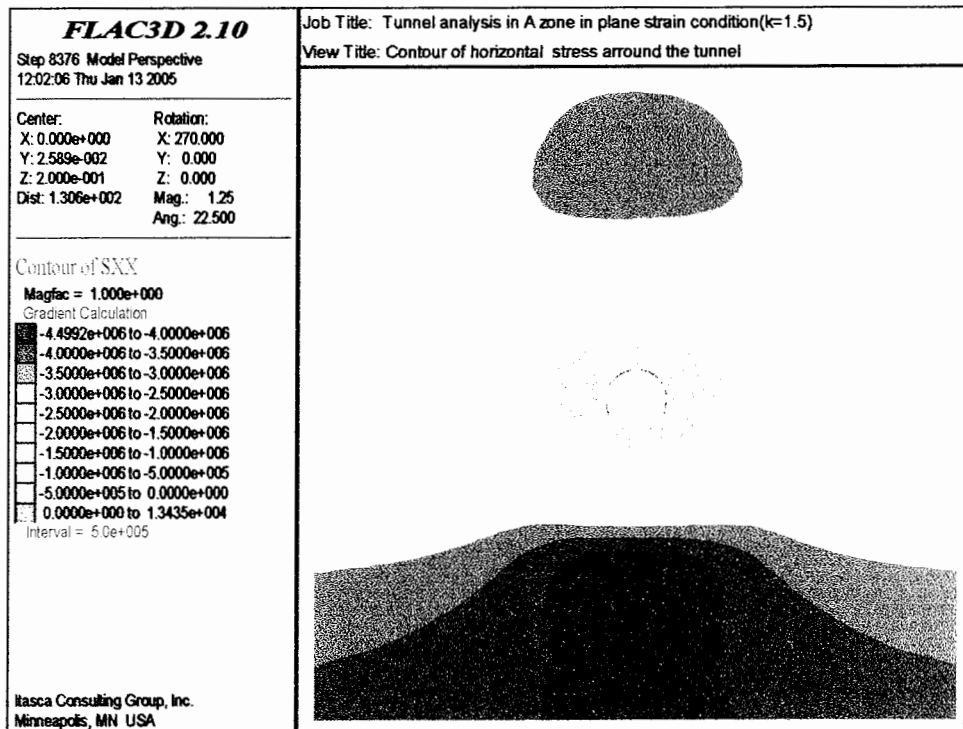
شکل ۵-۶- منحنی تراز جابجایی قائم در اطراف تونل در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای  $K = 1/5$



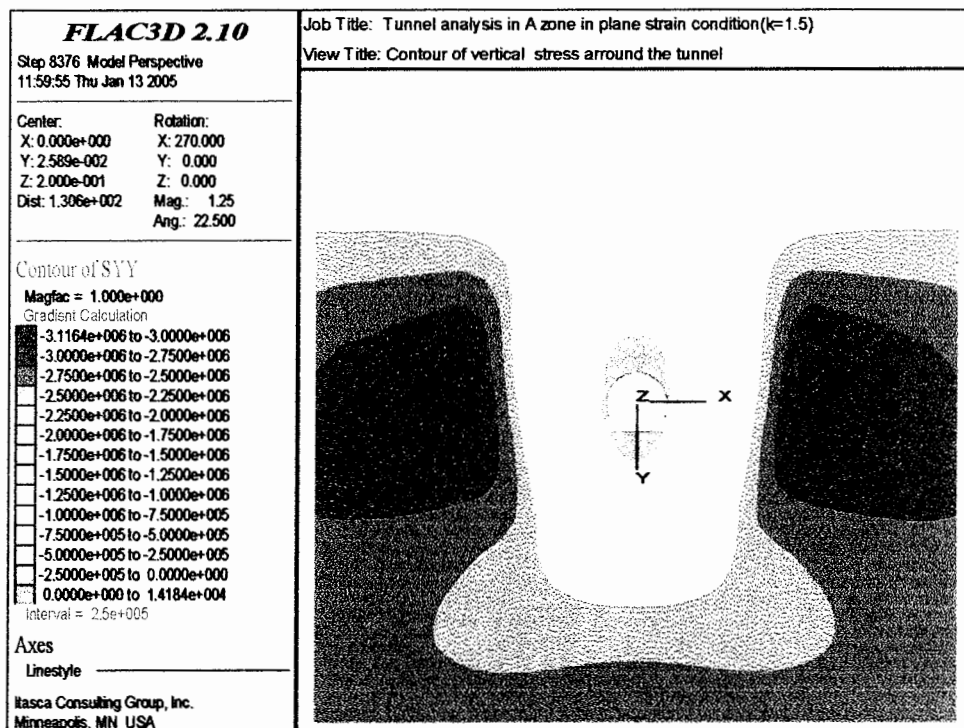
شکل ۵-۷- حداکثر جابجایی افقی در دیواره در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای  $K = 1/5$



شکل ۵-۸- منحنی تراز جابجایی افقی در اطراف تونل در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای  $K = 1/5$



شکل ۵-۹- منحنی تراز تنش افقی در اطراف تونل در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای  $K = 1/5$



شکل ۵-۱۰- منحنی تراز تنش قائم در اطراف تونل در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای  $K = 1/5$

۵-۴-۲- تحلیل تنش در حالت سه بعدی قبل و بعد از نصب سیستم نگهداری موقت در

### تونل انتقال آب بابلک\*

مراحل مدلسازی و شبیه سازی در مسیر تونل در قسمت ۵-۴-۲-۱ و تشریح المانهای نگهدارنده بکار رفته در نرم افزار در قسمت ۵-۴-۲-۲ آمده است. خلاصه نتایج کل مدلسازی ها در مسیر تونل در قسمت ۵-۴-۲-۳ و جزئیات نتایج مدلسازی در زون A نیز در قسمت ۵-۴-۲-۴ آمده است.

### ۵-۴-۲-۱- مراحل مدلسازی در مسیر تونل انتقال آب بابلک

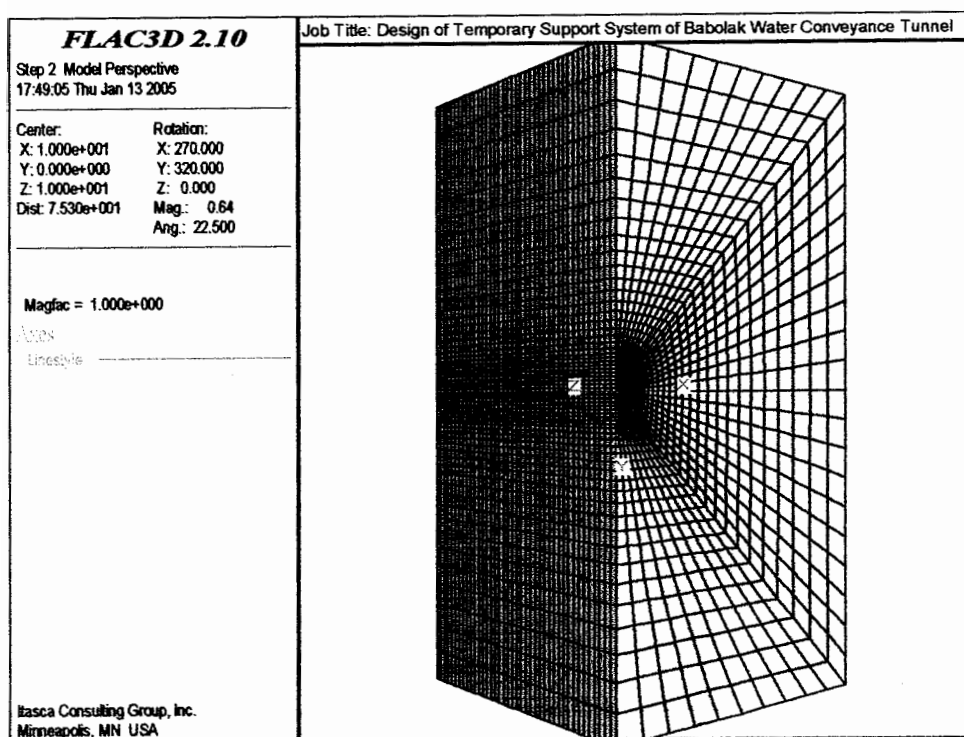
مقطع تونل نعل اسبی اصلاح شده و به عرض حفاری  $4/2$  متر می باشد. اندازه مدل  $40$  در  $40$  در  $40$  متر در نظر گرفته می شود تا وضعیت تنش در توده سنگ به حالت دست نخورده قبل از احداث تونل تبدیل شود. به دلیل تقارن مدل نسبت به صفحات  $x=0$  و  $z=0$ ، می توان نصف مدل را ساخت که در شکل ۵-۱۱ دیده می شود (علت استفاده از ربع مدل به خاطر مشاهده بهتر اشکال و نتایج و همچنین اجرای سریع برنامه توسط کامپیوتر می باشد). مرزهای مدل در صفحات  $x=0$ ،  $z=0$  و  $y=20$  (مرز پایینی مدل) به صورت غلتکی فرض می شوند. تنش افقی و قائم با توجه به دانسیته توده سنگ و اثر گرانشی زمین و مقدار روباره روی مدل به ازای  $K=1/5$ ، بر مدل اعمال می گردد و رفتار الاستیک، کاملاً پلاستیک با معیار موهر-کولمب برای توده سنگی در نظر گرفته می شود. در نهایت اقدام به حفر یک گام پیشروی (در فصل قبل هر گام پیشروی حدوداً  $1/5$  متر در نظر گرفته شد) می شود. سپس برای رسیدن به جواب همگرایی، مساله حل می گردد. بعد از رسیدن به جواب همگرایی و احراز تعادل اولیه، الگوریتم زیر اجرا می شود:

۱. صفر کردن جابجایی ها (برای مشاهده تغییرات جابجایی در اثر حفر هر گام معدنی و نه

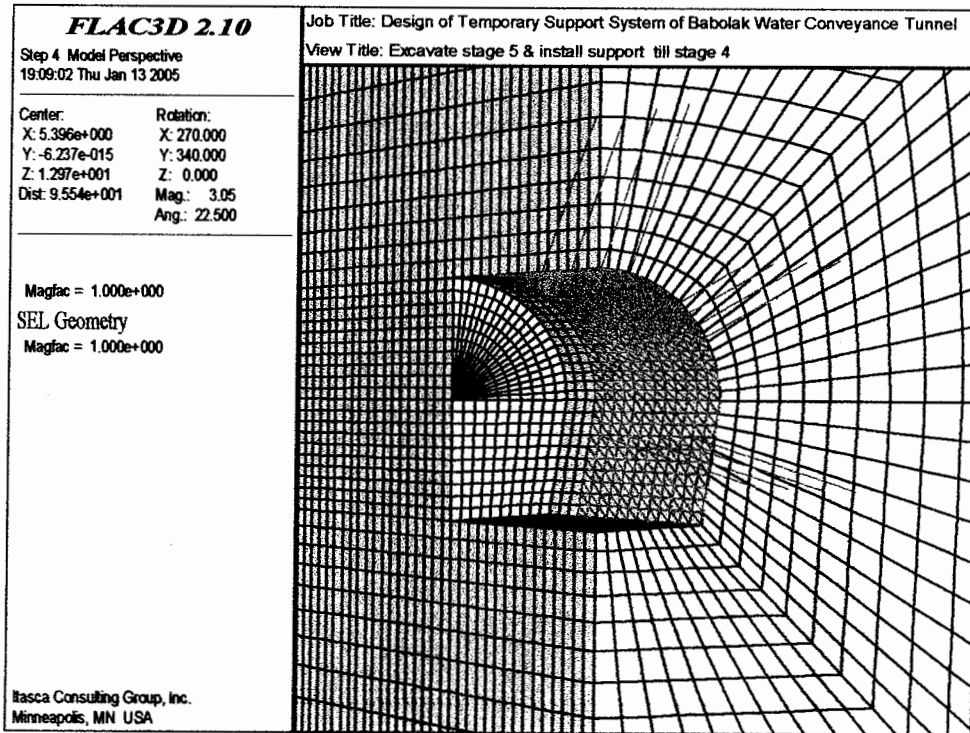
در اثر بارگذاری گرانشی ناشی از حل اولیه مساله)

\* یکی از دلائل استفاده از نرم افزار FLAC3D، مدلسازی سه بعدی و تحلیل تونل به ازای هر گام پیشروی است. بنظر محقق بهترین نرم افزار برای مدلسازی سیستم نگهداری موقت در زمینهای پلاستیک و شرایط مدلسازی پیوسته، FLAC3D می باشد.

۲. حفر کردن گام دوم پیشروی
  ۳. حل مساله ( مشاهدات وضعیت جابجایی در سقف و کف).
  ۴. رجوع به ۲ و نصب سیستم نگهداری موقت برای گام اول پیشروی ( اعم از شاتکریت و پیچ سنگ )
  ۵. حل مساله ( تحلیل و بررسی نتایج پس از نصب نگهدارنده گام اول پیشروی و حفر گام دوم)
  ۶. حفر گام پیشروی سوم، نصب نگهدارنده برای گام دوم، حل مساله و مشاهده نتایج
  ۷. حفر گام پیشروی چهارم، نصب نگهدارنده برای گام سوم، حل مساله و مشاهده نتایج
  ۸. حفر گام پیشروی پنجم، نصب نگهدارنده برای گام چهارم، حل مساله و مشاهده نتایج)
- شمای وضعیت تونل در این مرحله مطابق شکل ۵-۱۲ می باشد و ...



شکل ۵-۱۱- شمای مدل سه بعدی در مسیر تونل



شکل ۵-۱۲- وضعیت تونل در گام پنجم پیشروی و نصب نگهدارنده در گام چهارم

#### ۵-۴-۲- تشریح المانهای نگهدارنده بکار رفته در مسیر تونل انتقال آب

در FLAC3D در مدلسازی شاتکریت می‌توان از المان Liner یا Shell و در مدلسازی پیچ‌سنگ

از المان Cable استفاده کرد. در نرم‌افزار این المانها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

• المان Cable: یک المان دو نقطه‌ای است که به صورت محدود و مستقیم می‌باشد و دارای یک حرکت انتقالی محوری در هر نقطه است. این المان قابلیت تحمل کشش یا فشارش را دارد اما نمی‌تواند لنگر خمشی را تحمل کند. علاوه بر مختصات شروع و پایان المان، سطح مقطع پیچ‌سنگ، مدول الاستیک فولاد پیچ‌سنگ و مقاومت کششی پیچ‌سنگ؛ باید پارامترهای ذیل نیز مشخص گردند [۲۰]:

$$c_g = gr\_co = \pi \times D \times \tau_{Peak} \quad (۳-۵)$$

که در آن:

$c_g$  = مقاومت چسبندگی دوغاب تزریقی بر حسب پاسکال

$D$  = قطر پیچ‌سنگ بر حسب متر

$\tau_{peak}$  = نیروی برشی ماکسیمم که برابر نصف مقاومت فشاری تک محوره ضعیف‌تر از سنگ یا دوغاب

مصرفی است (مقاومت فشاری تک محوره دوغاب را معمولاً ۲۰ مگا پاسکال در نظر می‌گیرند).

$$k_g = gr\_k = \frac{2 \times \pi \times G}{10 \ln(1 + \frac{2t}{D})} \quad (۴-۵)$$

که در آن:

$k_g$  = سختی برشی دوغاب

$G$  = مدول برشی دوغاب مصرفی که معمولاً آنرا ۹ گیگاپاسکال در نظر می‌گیرند.

$t$  = تفاضل شعاع چال و شعاع پیچ‌سنگ

دلیل اصلی بر تعریف بیش از یک سگمنت<sup>۲۴</sup> در المان Cable، بهبود بخشیدن توزیع نیروی برشی است که تا اندازه‌ای به تعداد سگمنتها وابسته است. بنابراین پیشنهاد شده است که یا ۲ تا ۳ برابر سگمنت به ازای واحد طول در نظر گرفته شود و یا برای هر زون FLAC3D یک سگمنت تعریف گردد (چون زونها نواحی ثابت تنش هستند و نیازی به تعریف بیش از یک سگمنت برای هر زون نیست).

• المان Shell: یک المان سه نقطه‌ای که همراه با المانهای محدود صفحه‌ای است این المان از ۵ نوع المان تشکیل شده است (دو المان غشایی<sup>۲۵</sup>، یک المان خمشی صفحه‌ای<sup>۲۶</sup> و دو المان پوسته‌ای<sup>۲۷</sup>). این المان یک اتصال صلب را برای شبکه ایجاد می‌کند و حداقل با سه پارامتر ضریب پواسون، مدول الاستیک و ضخامت تعریف می‌گردد.

<sup>۲۴</sup> Segment

<sup>۲۵</sup> Membrane element

<sup>۲۶</sup> Plate-bending element

<sup>۲۷</sup> Shell element

• المان Liner: یک المان سه نقطه‌ای همراه با المانهای محدود صفحه‌ای که مانند Shell از ۵ نوع المان تشکیل شده است. یک اصطکاک برشی بین این المان و شبکه اتصال به آن وجود دارد. این المان با پارامترهای ضریب پواسون، مدول الاستیک، سختی ارتجاعی جفت‌شدگی نرمال به ازای واحد سطح<sup>۲۸</sup>  $(cs - nk(k_n))$ ، سختی ارتجاعی جفت‌شدگی برشی به ازای واحد سطح<sup>۲۹</sup>  $(cs - sk(k_s))$  و چسبندگی ارتجاعی جفت‌شدگی برشی<sup>۳۰</sup>  $(cs - scoh(c))$  تعریف می‌گردد. اگر به  $cs - scoh(c)$  یک مقدار بزرگ مثلاً ۱e۲۰ را نسبت دهیم، اتصال صلب (مثل المان Shell) به وجود می‌آورد و اگر یک مقدار کوچک مثلاً صفر را به این پارامتر نسبت دهیم اتصال الاستیک می‌شود و اجازه داده می‌شود که فضاهای خالی<sup>۳۱</sup> فرم گیرد و لغزش بین لایه و سطح اتصال (یعنی توده سنگ و شاتکریت) اتفاق افتد. ضمناً سختی جفت‌شدگی برشی و نرمال برای حفاریهای تونلی از فرمول زیر بدست می‌آید [۲۰]:

$$k_n = k_s = 100 \times \frac{B + \frac{4}{3}S}{\Delta Z_{min}} \quad (5-5)$$

که در آن:

B= مدول حجمی

S= مدول برشی

$\Delta Z_{min}$  = کوچکترین بعد زون مجاور در راستای نرمال (کمترین ضخامت هر زون در سطح تونل)

۲۸ Normal coupling spring stiffness per unit area

۲۹ Shear coupling spring stiffness per unit area

۳۰ Shear coupling spring cohesion

۳۱ Gaps

۵-۴-۳- خلاصه نتایج مدل سه بعدی قبل و پس از نصب سیستم نگهداری به ازای گام

پیشروی ۱/۵ متر برای  $K=1/5$

در مسیر تونل از پیچ سنگ با قطر ۲۵ میلیمتر، مدول الاستیک ۲۰۷ گیگا پاسکال، مقاومت کششی ۰/۲۸۵ مگا نیوتن و مقاومت چسبندگی ۰/۵ مگا پاسکال با سختی برشی دوغاب ۷/۰۱ گیگاپاسکال (قطر چال حفاری برای پیچ سنگ ۵۶ میلیمتر در نظر گرفته شده است) با فاصله داری\* ۱/۵ متر در ۱/۵ متر و از شاتکریت با ضخامتهای مختلف با مقاومت فشاری تک محوره ۲۵ مگاپاسکال، مدول الاستیک ۱۵ گیگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۲۵، تنش برشی ۴ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۲/۵ مگاپاسکال در مدلسازی استفاده شده است.

میزان جابجایی قائم در سقف و افقی در دیواره برای مسیر تونل مطابق جدول ۵-۴ است:

جدول ۵-۳- میزان جابجایی قائم در سقف و جابجایی افقی در دیواره قبل از نصب سیستم نگهدارنده بر حسب

سانتیمتر به ازای یک گام پیشروی در شرایط  $K=1/5$

	جابجایی افقی در دیواره (سانتیمتر)	جابجایی قائم در سقف (سانتیمتر)
مقطع حداکثر روباره	۸۲	۱۰/۲
زون خروجی A	۶۴۶	۸/۵
زون ورودی B	۱/۰۳	۱/۵۶

نتایجی که بطور مستقیم در هر گام پیشروی (۱/۵ متر) پس از نصب نگهدارنده موقت (اعم از

شاتکریت و پیچ سنگ) به ازای  $K=1/5$  از نرم افزار بدست می آید در جدول ۵-۴ و نتایج محاسبه شده

در جدول ۵-۵ آمده است.

\* منظور از فاصله داری ۱/۵ در ۱/۵ یعنی در هر مقطع کامل حفاری ۶ پیچ سنگ نصب گردد و فاصله هر حلقه از پیچ سنگها با حلقه دیگر در راستای محور تونل ۱/۵ متر باشد.

جدول ۴-۵- خروجی مستقیم نرم‌الیزاسیون از نصب نگهدارنده‌ها به‌سنگ با طول‌های ۱/۵ متر در ۱/۵ متر و شاکت‌ریت با ضخامت‌های مختلف به ازای هر گام پیشروی در شرایط  $K=1/5$

ضخامت‌های اجرایی شاکت‌ریت (سانتیمتر)	جابجایی قائم در سقف (میلیمتر)	جابجایی افقی در دیوار (میلیمتر)	نیروی محوری در پیچ‌سنگ (نیوتن)	حداکثر نیروی محوری بر لایه شاکت‌ریت (نیوتن)	لنگر خمشی در المانی که حداکثر نیروی محوری بر آن وارد می‌شود (نیوتن‌متر)	حداکثر لنگر خمشی بر لایه شاکت‌ریت (نیوتن‌متر)	حداکثر نیروی برشی بر لایه شاکت‌ریت (نیوتن)
زون B	۵	۱/۶	۴	۷/۱۳۴۴	۱/۴۴۴۴	۳/۷۹۴۳	۲/۶۸۴۴
	۷/۵	۱/۱	۲/۷	۶/۶۳۴۴	۱/۸۱۴۴	۹/۱۷۴۳	۵/۸۶۴۴
	۵	۲/۲	۷/۴	۲/۱۴۵۵	۱/۵۱۴۴	۹/۳۴۴۳	۵/۴۴۴۴
	۷/۵	۱/۵	۷	۱/۹۵۵۵	۱/۷۶۴۴	۱/۶۷۴۴	۱/۵۵۵۵
	۱۰	۱/۲	۶/۹	۱/۸۱۴۵	۱/۹۶۴۴	۲/۳۸۴۴	۱/۴۲۴۵
زون A	۱۲	۱	۶/۸	۱/۶۹۴۵	۲/۰۹۴۴	۳/۳۴۴۴	۱/۶۵۵۵
	۷/۵	۲	۸/۴	۲/۷۲۴۵	۲/۴۵۴۴	۲/۲۸۴۴	۱/۲۶۴۵
	۱۰	۱/۵	۸/۱	۲/۵۴۴۵	۲/۷۴۴۴	۲/۳۳۴۴	۱/۶۶۴۵
	۱۲	۱/۲	۷/۹	۲/۳۹۴۵	۲/۹۶۴۴	۴/۳۹۴۴	۲/۰۲۴۵
	۱۵	۰/۸۵	۷/۸	۲/۲۰۴۵	۲/۲۲۴۴	۶/۴۳۴۴	۲/۴۶۴۵
مقطع حداکثر روپاره	۲۰	۰/۴۵	۷/۷	۱/۸۲۴۵	۲/۵۴۴۴	۹/۷۵۴۴	۲/۹۶۴۵

جدول ۵-۵- نتایج محاسبه شده پس از نصب نگهدارنده (پیچ سنگ با فاصله‌داری ۱/۵ متر در ۱/۵ متر و شاکریت با

ضخامتهای مختلف) به ازای هر گام پیشروی در شرایط  $K=1/5$ \*

تنش کششی بر لایه شاکریت (مگاپاسکال)	ضریب ایمنی برشی شاکریت	ضریب ایمنی فشاری شاکریت	ضریب ایمنی کششی پیچ سنگ	ضخامتهای اجرایی شاکریت (سانتیمتر)	
۶۱۰۶	۷/۴۶	۱/۲۹	۴	۵	زون B
۶۱۵۲	۵/۱۳	۱/۵۳	۴/۲۹	۷/۵	
۱۴/۸۸	۳/۷	۱/۲۱	۱/۳۶	۵	زون A
۱۱/۸۷	۳/۰۲	۱/۴۹	۱/۴۶	۷/۵	
۹/۵۲	۲/۸۰	۱/۸۶	۱/۵۷	۱۰	
۹/۱۶	۲/۹	۲/۱۲	۱/۶۸	۱۲	
۱۶/۲	۲/۳۸	۱/۱۱	۱/۰۴	۷/۵	مقطع حداکثر روباره
۱۲/۹	۲/۴۰	۱/۲۹	۱/۱۲	۱۰	
۱۲/۲	۲/۹	۱/۳۶	۱/۱۹	۱۲	
۱۱/۴۳	۲/۴۵	۱/۶۶	۱/۲۹	۱۵	
۹/۷۵	۲/۷۱	۱/۹۵	۱/۵۶	۲۰	

در جدول ۴-۵ برای زون A و به ازای اجرای شاکریت به ضخامت ۷/۵ سانتیمتر میزان جابجایی

قائم در سقف ۱/۵ میلیمتر، میزان جابجایی افقی در دیواره ۷ میلیمتر، حداکثر نیروی محوری

پیچ سنگ  $1/85 \times 10^5$  نیوتن، حداکثر نیروی محوری بر لایه شاکریت  $1/76 \times 10^6$  نیوتن و

حداکثر لنگر خمشی بر لایه شاکریت  $1/67 \times 10^4$  نیوتن متر نوشته شده است. برای آنکه نشان

\* چون تنش کششی اعمال شده بر لایه شاکریت در همه موارد جدول از تنش کششی شاکریت مصرفی (۲/۵ مگاپاسکال) بیشتر است، واضح است که شاکریت باید در کل مسیر تونل با مش فولادی جوش داده شده مسلح گردد و از آنجا که از نظر اجرایی، بتن‌پاشی با ضخامت ۵ سانتیمتر با یک لایه مش فولادی تقریباً امکان‌پذیر نیست، لذا حداقل ضخامت اجرایی شاکریت در کل مسیر تونل انتقال آب ۷/۵ سانتیمتر پیشنهاد می‌گردد.

داده شود که این جدول چگونه تهیه شده است به عنوان نمونه برای زون A و با اجرای شاتکریت در شرایط:  $K=1/5$  تحلیلی در قسمت ۴-۲-۴-۵ صورت گرفته است.

در جدول ۵-۵ برای زون A و با اجرای شاتکریت در شرایط  $K=1/5$  ضریب ایمنی کششی پیچ‌سنگ ۱/۴۶، ضریب ایمنی فشاری شاتکریت ۱/۴۹، ضریب ایمنی برشی شاتکریت ۳/۰۲ و تنش کششی بر لایه شاتکریت ۱۱/۸۷ مگا پاسکال نوشته شده است. برای آنکه نشان داده شود که این جدول چگونه تهیه شده است به عنوان نمونه برای زون A و با اجرای شاتکریت به ضخامت ۷/۵ سانتیمتر در شرایط  $K=1/5$  تحلیلی در قسمت ۱-۴-۲-۴-۵ صورت گرفته است

میزان جابجایی قائم سقف و جابجایی افقی دیواره پس از نصب سیستم نگهدارنده در شرایط کرنش صفحه‌ای (مدل با ضخامت کم و بدون در نظر گرفتن پیشروی حفاری بصورت مرحله‌ای) مطابق جدول ۵-۶ از نرم‌افزار استخراج شده است.

جدول ۵-۶- میزان جابجاییها پس از نصب نگهدارنده در شرایط کرنش صفحه‌ای و به ازای  $K=1/5$

	جابجایی قائم در سقف (سانتیمتر)	جابجایی افقی در دیواره (سانتیمتر)
زون B با ضخامت ۷/۵ سانتیمتر شاتکریت	۰/۵	۲/۲
زون A با ضخامت ۷/۵ سانتیمتر شاتکریت	۳/۶	۵
مقطع حداکثر روباره با ضخامت ۱۵ سانتیمتر شاتکریت	۳/۸	۶/۶

۴-۲-۴-۵- نتایج مدل سه بعدی قبل و پس از نصب سیستم نگهداری ( پیچ سنگ با فاصله داری ۱/۵ متر در ۱/۵ متر و شاتکریت با ضخامت ۷/۵ سانتیمتر ) به ازای گام پیشروی ۱/۵ متر برای زون  $A(K=1/5)^*$

منحنی تراز و نمودارهای جابجایی اطراف تونل به ازای هر گام پیشروی و بدون نصب نگهدارنده در اشکال ۱۳-۵ تا ۱۶-۵ آمده است.

شکل ۱۳-۵ حداکثر جابجایی قائم در سقف در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی را نشان می‌دهد که برابر ۸/۵ سانتیمتر می‌باشد.

شکل ۱۴-۵ منحنی تراز جابجایی قائم در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی را نشان می‌دهد که مقدار جابجایی در سقف برابر ۸/۵ سانتیمتر می‌باشد.

شکل ۱۵-۵ حداکثر جابجایی افقی در دیواره در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی را نشان می‌دهد که برابر ۶/۴ سانتیمتر می‌باشد.

شکل ۱۶-۵ منحنی تراز جابجایی افقی در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی را نشان می‌دهد که مقدار جابجایی در دیواره برابر ۶/۵ سانتیمتر می‌باشد.

شمای وضعیت تونل پس از حفر گام دوم و نصب سیستم نگهدارنده برای گام اول پیشروی مطابق شکل ۱۷-۵ می‌باشد. نمودارهای جابجایی پس از نصب سیستم نگهداری در اشکال ۱۸-۵ و ۱۹-۵ و منحنی تراز نیروی محوری و لنگر خمشی بر لایه شاتکریت در اشکال ۲۰-۵ و ۲۱-۵ ترسیم شده است. حداکثر نیروی محوری بر پیچ سنگها مطابق شکل ۲۲-۵ نمایش داده شده است ( داده‌های ورودی در نرم افزار به صورت فایل متنی در پیوست ۸- ب آمده است).

شکل ۱۸-۵ حداکثر جابجایی قائم در سقف در زون A پس از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی را نشان می‌دهد که برابر ۱/۶ میلیمتر می‌باشد.

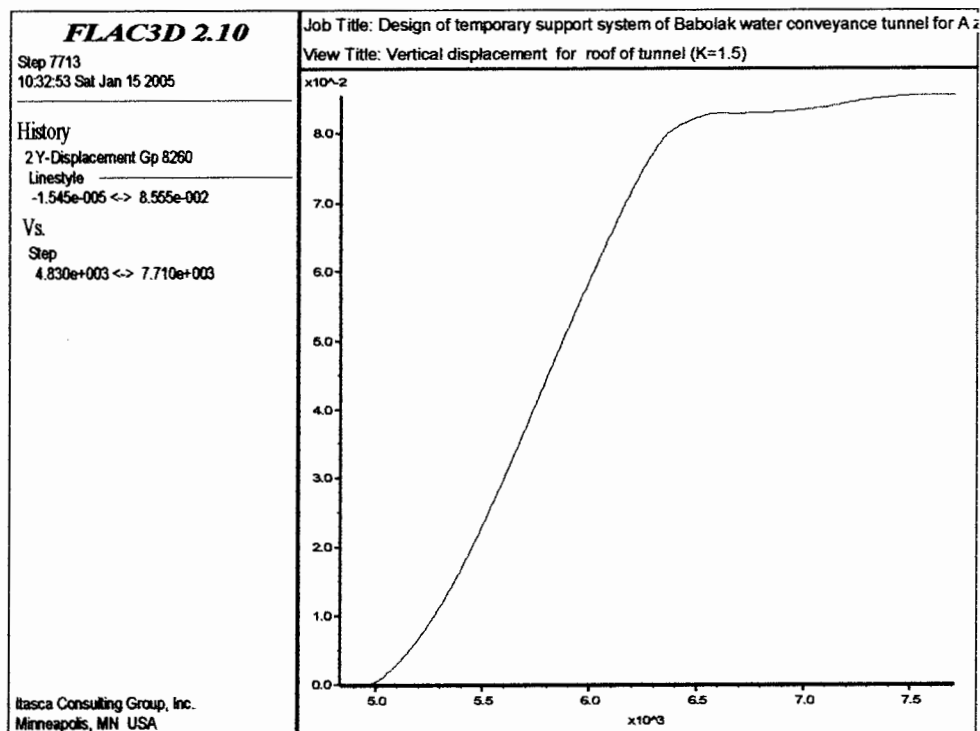
\* برای کل مسیر تونل با ضخامت‌های مختلف اجرایی شاتکریت، نتایج مختصراً در جدول ۴-۵ آمده است.

شکل ۵-۱۹ حداکثر جابجایی افقی در دیواره در زون A پس از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی را نشان می‌دهد که برابر ۷ میلیمتر می‌باشد.

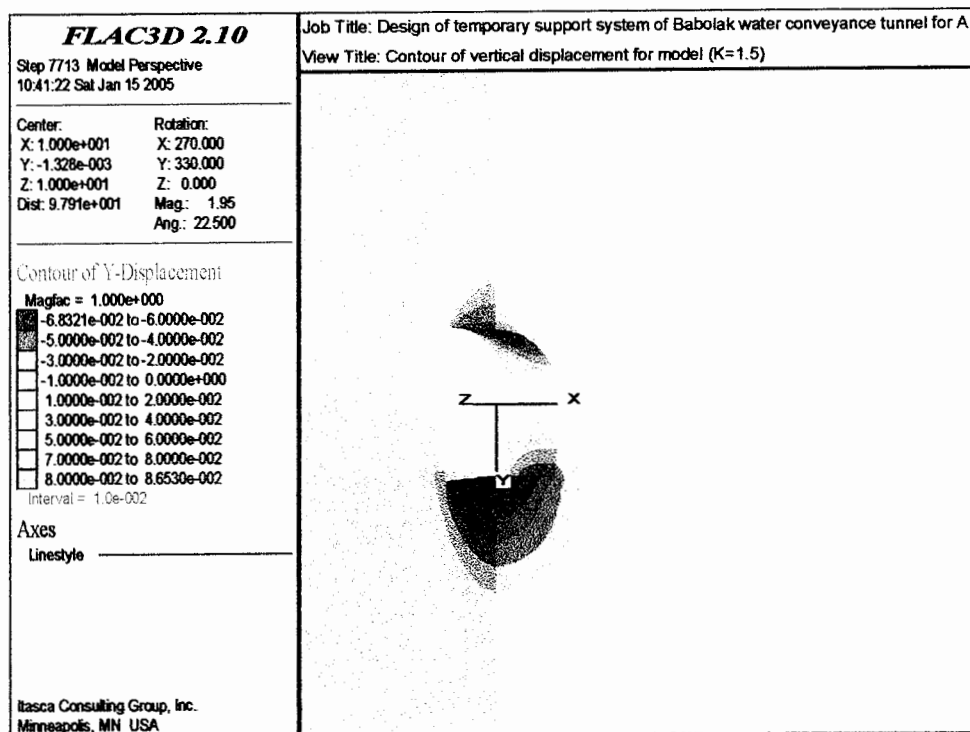
شکل ۵-۲۰ منحنی تراز نیروی محوری بر لایه شاتکریت به ضخامت ۷/۵ سانتیمتر در زون A پس از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه نیروی محوری در سقف تونل اتفاق می‌افتد و مقدار آن برابر  $10^6 \times 1/76$  نیوتن می‌باشد.

شکل ۵-۲۱ منحنی تراز لنگر خمشی بر لایه شاتکریت به ضخامت ۷/۵ سانتیمتر در زون A پس از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه لنگر خمشی در دیواره‌های تونل اتفاق می‌افتد و مقدار آن برابر  $10^4 \times 1/67$  نیوتن متر می‌باشد.

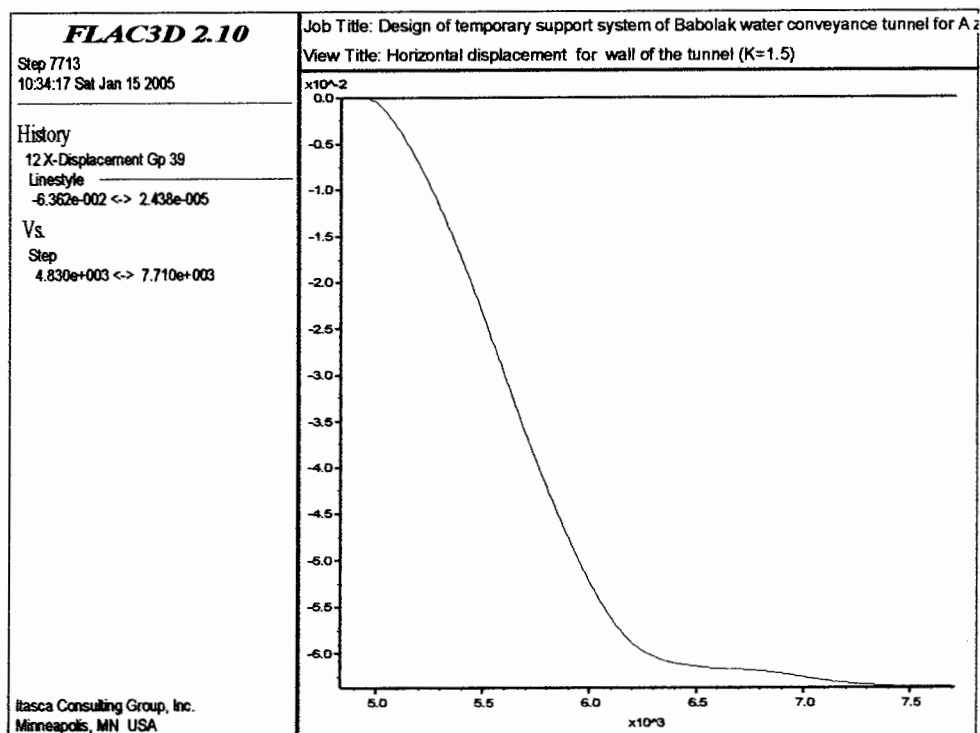
شکل ۵-۲۲ حداکثر نیروی محوری وارد شده بر پیچ‌سنگ را نشان می‌دهد در زون A پس از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه نیروی محوری وارد شده برابر  $10^5 \times 1/94$  نیوتن می‌باشد.



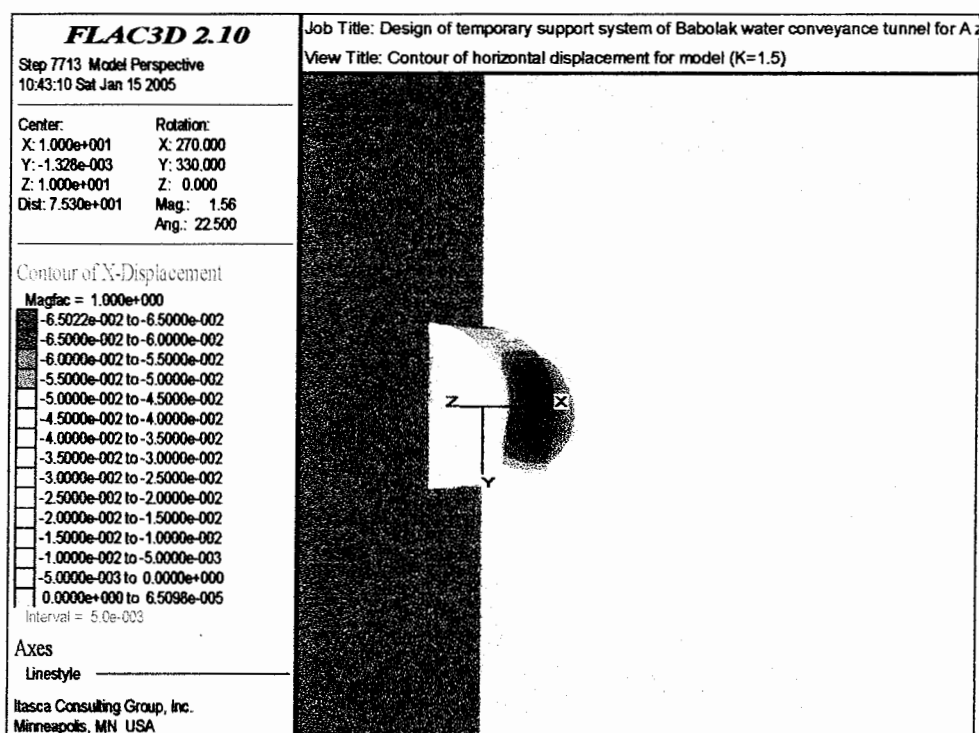
شکل ۵-۱۳- حداکثر جابجایی قائم در سقف در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی ( $K = 1/5$ )



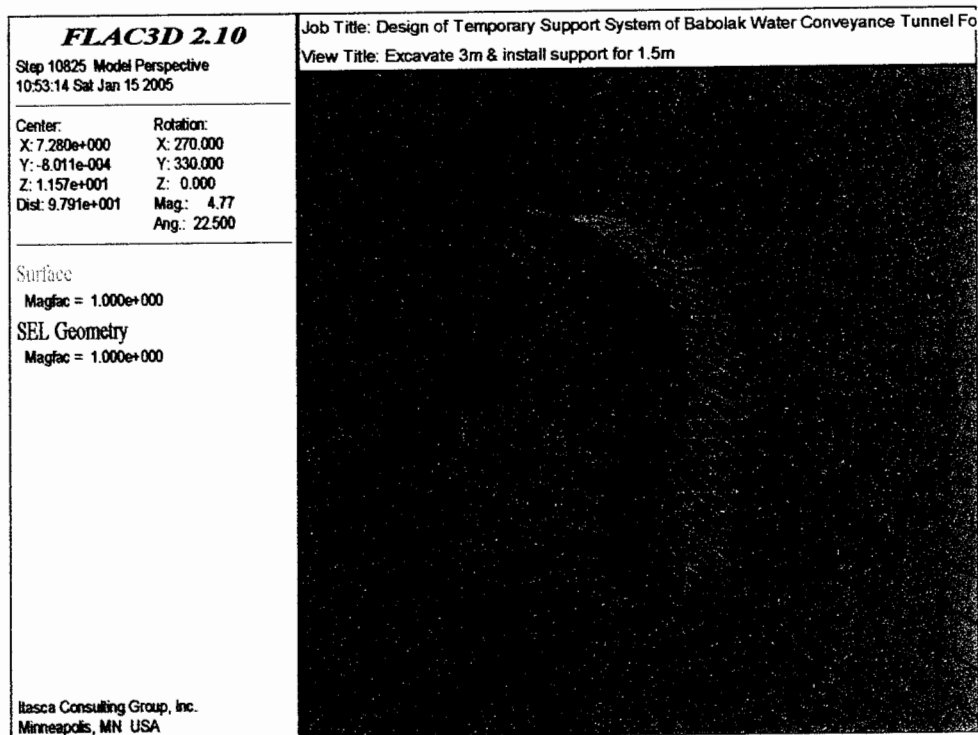
شکل ۵-۱۴- منحنی تراز جابجایی قائم در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی ( $K = 1/5$ )



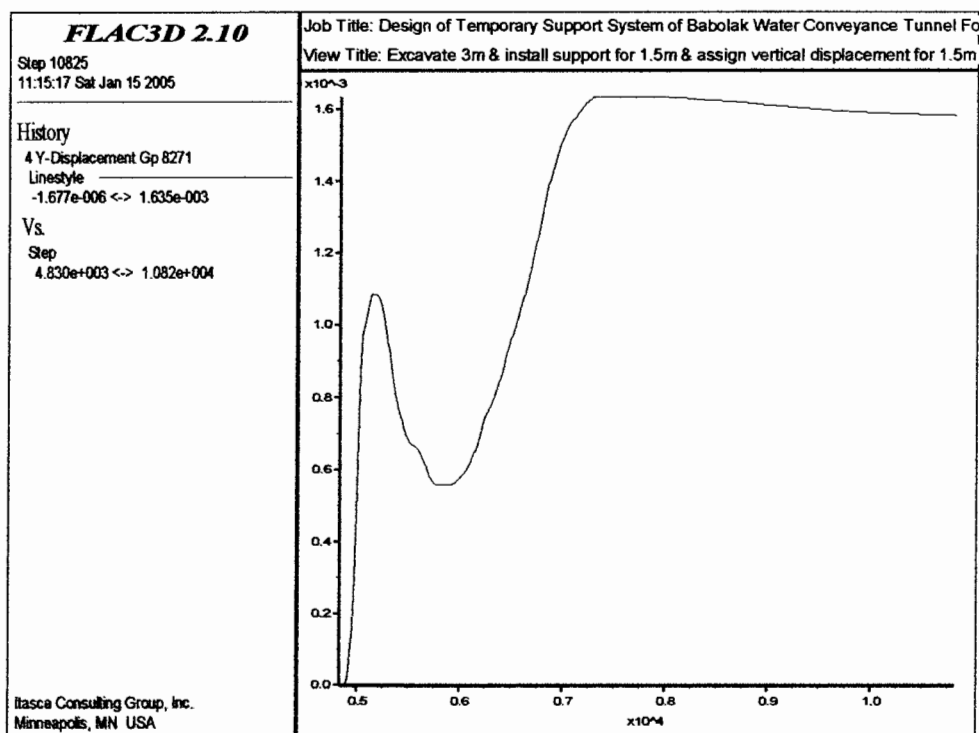
شکل ۵-۱۵- حداکثر جابجایی افقی در دیواره در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی ( $K=1/5$ )



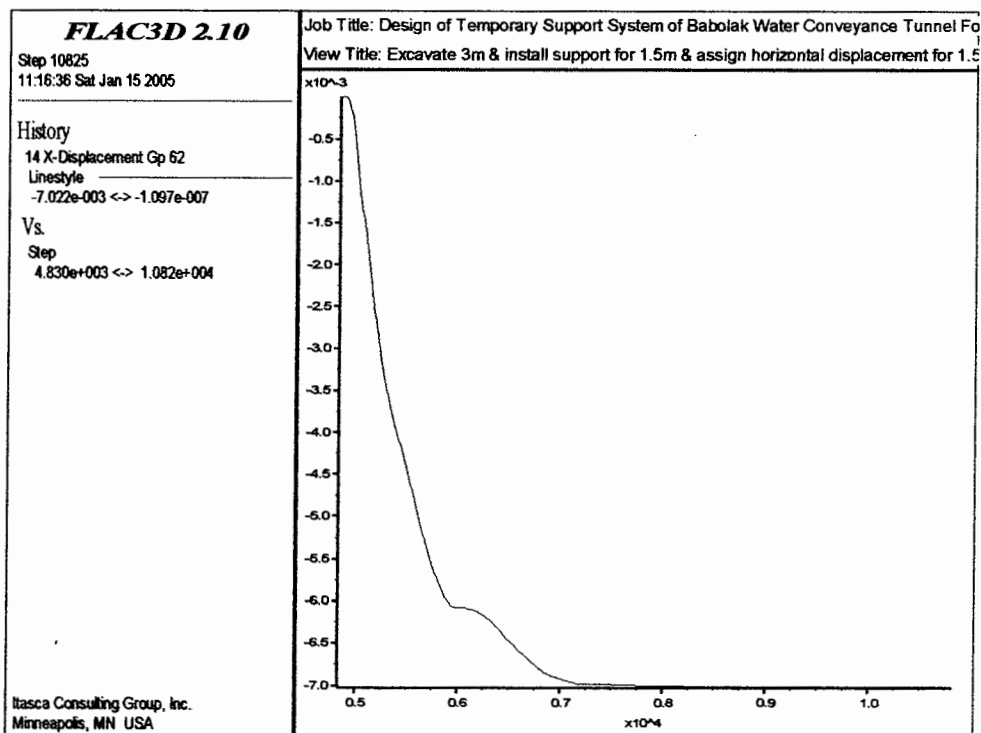
شکل ۵-۱۶- منحنی تراز جابجایی افقی در زون A قبل از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی ( $K=1/5$ )



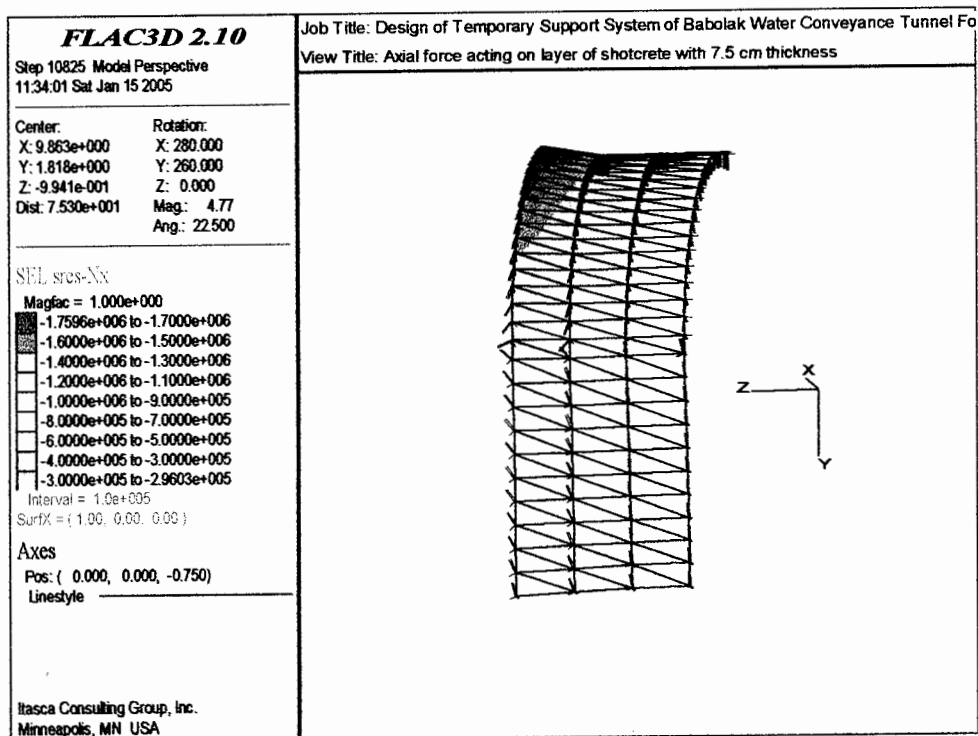
شکل ۵-۱۷- شمای وضعیت تونل در حفر گام دوم پیشروی و نصب نگهدارنده برای گام اول



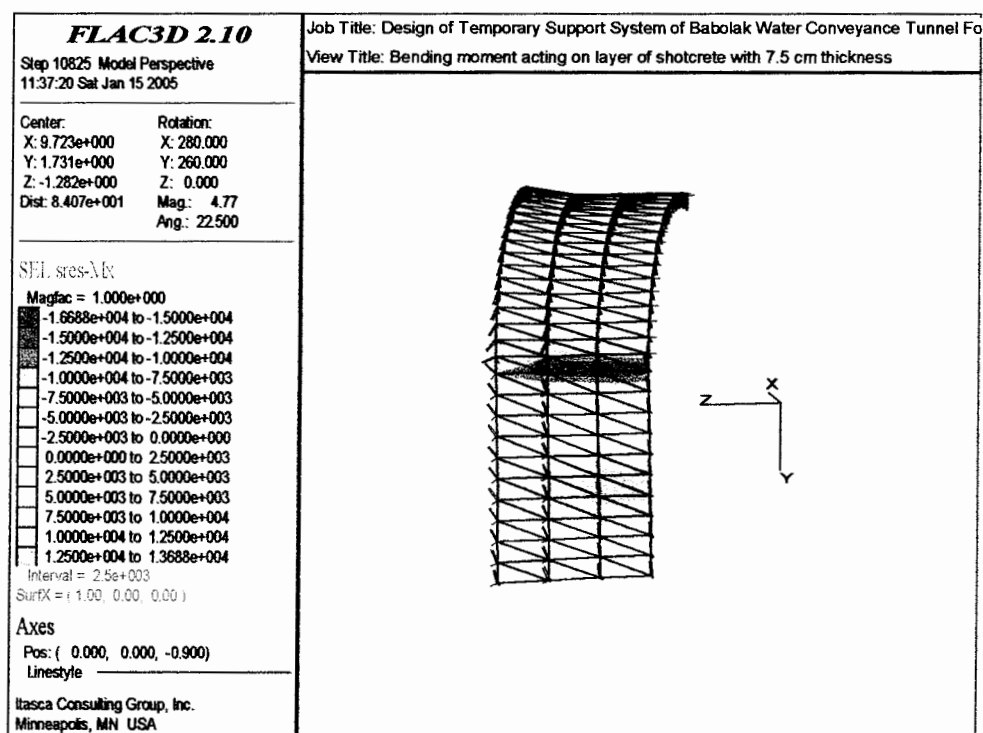
شکل ۵-۱۸- حداکثر جابجایی قائم در سقف در زون A پس از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی ( $K = 1/5$ )



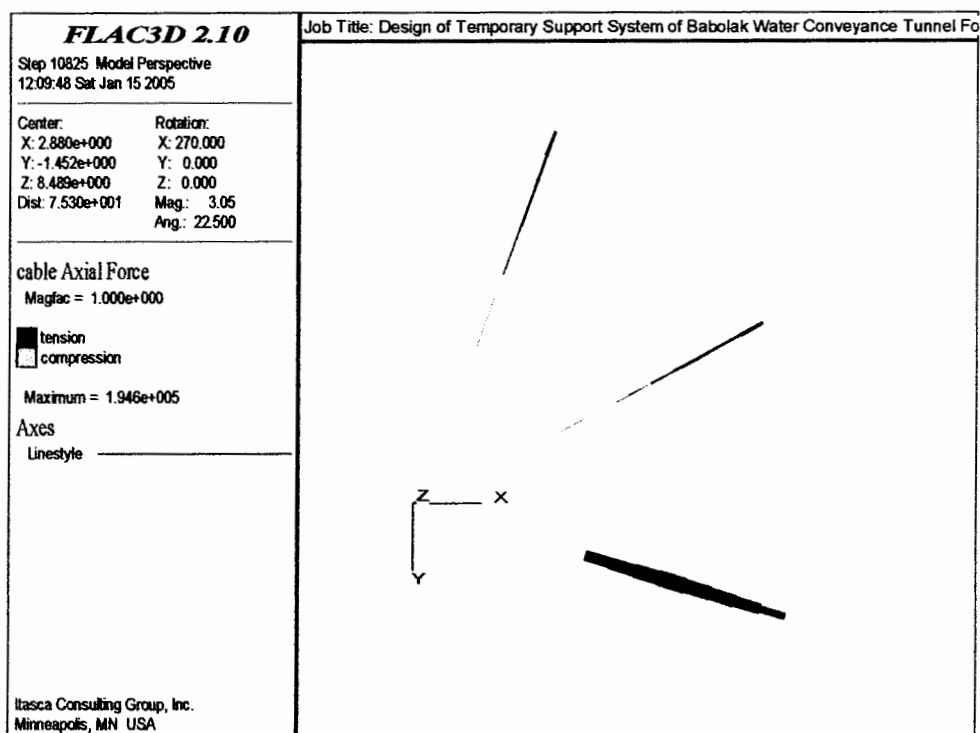
شکل ۵-۱۹- حداکثر جابجایی افقی در دیواره در زون A پس از نصب نگهدارنده به ازای هر گام پیشروی (K=۱/۵)



شکل ۵-۲۰- منحنی تراز نیروی محوری بر لایه شانکریت به ضخامت ۷/۵ سانتیمتر در زون A به ازای هر گام پیشروی



شکل ۵-۲۱- منحنی تراز لنگر خمشی بر لایه شاتکریت به ضخامت ۷/۵ سانتیمتر در زون A به ازای هر گام پیشروی



شکل ۵-۲۲- حداکثر نیروی محوری وارد شده بر پیچ سنگها در زون A به ازای هر گام پیشروی

۵-۴-۲-۴-۱- محاسبات نهایی برای المانهای نگهدارنده موقت (پیچ سنگ با فاصله‌داری

۱/۵ متر در ۱/۵ متر و شاتکریت با ضخامت ۷/۵ سانتیمتر) به ازای گام پیشروی ۱/۵ متر

برای زون  $A (K=1/5)^*$

ضرایب ایمنی مطابق آنچه که در ذیل آمده است با مشخص شدن نیروی محوری، لنگر خمشی و

نیروی برشی بر لایه شاتکریت و حداکثر نیروی محوری در پیچ سنگ قابل محاسبه می‌باشد:

• محاسبه ضریب ایمنی پیچ سنگ

$$SF_{Bolt} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{0.285e6}{1.95e5} = 1.46 \quad (۶-۵)$$

که:

$F_1$  = مقاومت کششی پیچ سنگ بر حسب نیوتن

$F_2$  = حداکثر نیروی محوری وارد شده بر پیچ سنگ بر حسب نیوتن (که از نتایج نرم افزار بدست

می‌آید)

$SF_{Bolt}$  = ضریب ایمنی کششی پیچ سنگ

• محاسبه ضریب ایمنی شاتکریت در برابر نیروی برشی

$$\tau_v = \frac{3}{2} \times \frac{Q_x}{t \times z} = \frac{3}{2} \times \frac{1e5}{0.075 \times 1.5} = 1.32e6 (Pa) \quad (۷-۵)$$

که در آن:

$Q_x$  = حداکثر نیروی برشی وارد بر لایه شاتکریت بر حسب نیوتن (که از نتایج نرم افزار بدست

می‌آید)

$t$  = ضخامت لایه شاتکریت بر حسب متر

برای کل مسیر تونل با ضخامت‌های مختلف اجرایی شاتکریت، مختصراً نتایج در جدول ۵-۵ آمده است.

$z$  = عرض لایه شاتکریت در هر سیکل کاری بر حسب متر (که برابر یک گام پیشروی است)

$\tau_v$  = حداکثر تنش برشی بر حسب پاسکال

پس بنابراین:

$$SF_v = \frac{\tau_B}{\tau_v} = \frac{4e6}{1.32e6} = 3.02 \quad (۸-۵)$$

که در آن:

$\tau_B$  = تنش برشی مجاز شاتکریت مصرفی بر حسب پاسکال

$SF_v$  = ضریب ایمنی شاتکریت در برابر برش

• محاسبه ضریب ایمنی شاتکریت در برابر نیروی محوری

با مشخص بودن حداکثر نیروی محوری در یک نقطه از لایه شاتکریت و میزان لنگر خمشی در

آن نقطه (اثر توام نیروی محوری و لنگر خمشی) میزان تنش محوری فشاری از رابطه زیر بدست

می آید:

$$\sigma_{cl} = \frac{N_x}{t \times z} + \frac{M \times c}{I} = \frac{1.76e6}{0.075 \times 1.5} + \frac{12 \times 6e2 \times 0.0375}{(0.075)^3 \times 1.5} = 16.07e6 (Pa) \quad (۹-۵)$$

که:

$N_x$  = حداکثر نیروی محوری بر حسب نیوتن

$M$  = لنگر خمشی بر حسب نیوتن متر، در آلمانی که حداکثر نیروی محوری بر آن وارد

می شود

$I$  = ممان اینرسی که برابر مقاطع مستطیلی شکل برابر  $\frac{1}{12} b \times h^3$  است (  $b$  عرض لایه

شاتکریت بر حسب متر و  $h$  ضخامت لایه بر حسب متر می باشد).

$c$  = فاصله دورترین تار کششی از محور خنثی بر حسب متر (که آنرا نصف ضخامت شاتکریت

در نظر می گیرند).

$\sigma_{C1}$  = تنش محوری فشاری بر حسب پاسکال

پس بنابراین:

$$SF_C = \frac{\sigma_{C2}}{\sigma_{C1}} = \frac{25e6}{16.07e6} = 1.49 \quad (10-5)$$

که در آن:

$\sigma_{C2}$  = مقاومت فشاری شاتکریت مصرفی بر حسب پاسکال

$SF_C$  = ضریب ایمنی لایه شاتکریت در برابر نیروی محوری

• محاسبه تنش کششی وارد بر لایه شاتکریت

تنش کششی وارد بر لایه شاتکریت ناشی از لنگر خمشی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_T = \frac{M_{max} \times c}{I} = \frac{12 \times 1.67e4 \times 0.0375}{(0.075)^3 \times 1.5} = 11.87e6 (Pa) \quad (11-5)$$

که در آن:

$M_{max}$  = حداکثر لنگر خمشی بر لایه شاتکریت بر حسب نیوتن متر

$\sigma_T$  = تنش کششی وارد بر لایه شاتکریت بر حسب پاسکال

واضح است تنش کششی وارد بر لایه شاتکریت خیلی بیشتر از مقاومت کششی شاتکریت

مصرفی (۲/۵ مگاپاسکال) است. لذا شاتکریت حتماً باید با توری سیمی مسلح گردد\*.

---

\* بتن و شاتکریت علیرغم مقاومت فشاری قابل توجه، مقاومت کششی کم و شکنندگی نسبتاً زیاد دارند. برای رفع این محدودیت اعضای بتنی را با قرار دادن فولاد در آنها فولاد دارای مقاومت کششی بالاست) تقویت می‌کنند. به زبان ساده می‌توان گفت که سازه‌های بتنی را طوری طراحی می‌کنند که نیروی فشاری را بتن تحمل کند و نیروی کششی را فولاد.

## ۵-۵- جمع بندی از نتایج مدلسازی عددی برای سیستم نگهداری موقت

جمع بندی از این فصل به تفسیر جدول ۵-۵ خلاصه می‌گردد:

در این جدول برای زون B پس از نصب نگهدارنده پیچ‌سنگ و با اجرای شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر، ضرایب ایمنی\* مناسبی را نتیجه می‌دهد اما قبلاً گفته شد که تنش کششی وارد بر لایه شاتکریت زیاد است و نیاز به اجرای مش فولادی دارد و با اجرای مش حداقل ضخامت شاتکریت به ۷/۵ سانتیمتر خواهد رسید. در زون A نیز از آنجا که اجرای مش فولادی الزامی است، سیستم نگهداری پیچ‌سنگ و شاتکریت به ضخامت ۷/۵ سانتیمتر پیشنهاد می‌گردد و هر چه به ضخامت روباره در این زون افزایش یابد، باید ضخامت شاتکریت اضافه گردد تا اینکه در مقطع حداکثر روباره با توجه به افزایش ضریب ایمنی و کاهش تنش کششی وارد بر لایه شاتکریت، اجرای پیچ‌سنگ و شاتکریت به ضخامت ۱۵ سانتیمتر و یک لایه مش فولادی جوبلگویی این مقطع خواهد بود.

\* حداقل ضرایب ایمنی در نگهداری‌های موقت از لحاظ فنی و اقتصادی در حدود ۱/۲ تا ۱/۳ می‌باشد.

## فصل ششم

برآورد سیستم نگهداری دائم  
بر اساس روش عددی

## ۶-۱- مقدمه

وظیفه سیستم نگهداری موقت به تعادل رسیدن توده سنگ و تامین پایداری قبل از نصب سیستم نگهداری نهایی است و وظیفه سیستم نگهداری دائم، علاوه بر مکمل بودن نقش نگهداری اولیه پایداری سازی تونل برای یک دوره طولانی مدت بهره برداری می باشد. پایدار بودن تونل در اثر بارهای دینامیکی (مثل زلزله)، خزش<sup>۱</sup> و تورم ناشی از توده های رسی نیز از دیگر وظایف سیستم نگهداری دائم است.

در این فصل مراحل شبیه سازی طراحی نگهداری و نتایج مدلسازی نگهداری دائمی برای مسیر تونل آمده است. در ادامه به جزئیات مدلسازی در زون A پرداخته شده است و در خاتمه، محاسبات آرماتور مورد نیاز برای مسیر تونل ذکر شده است.

## ۶-۲- اصول شبیه سازی و اهداف آن در طراحی نگهداری دائمی تونل انتقال آب

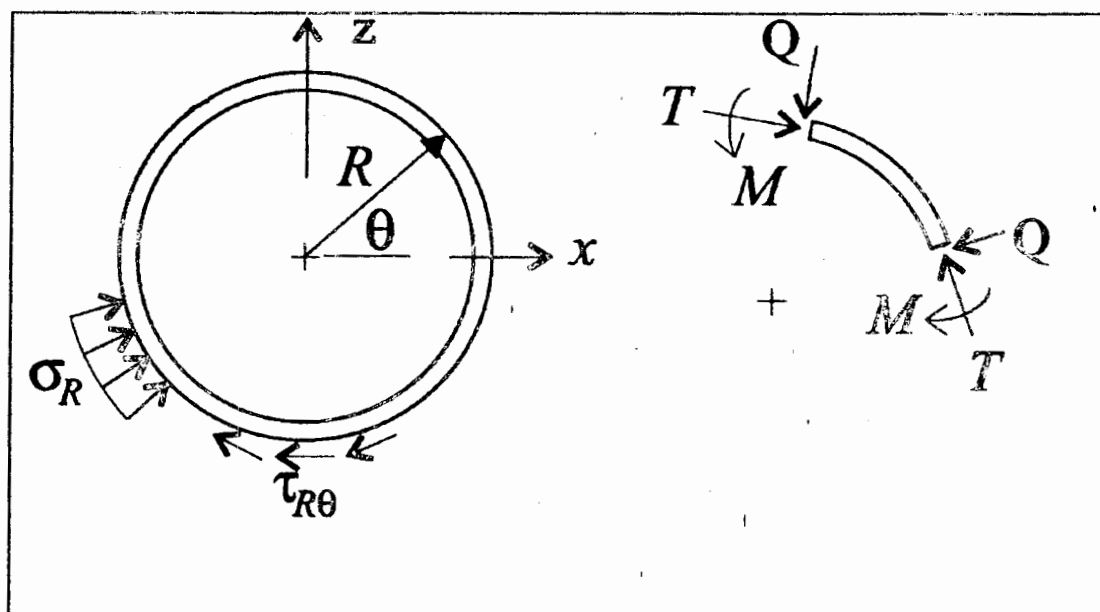
## بابک

از آنجا که شکل نهایی تونل انتقال آب بابک دایروی است؛ بهتر است مدلی مربعی، که تونلی دایروی در آن حفر گردیده فرض شود. قطر تونل ۴ متر، ابعاد مدل ۴۰ در ۴۰ متر (۱۰ برابر قطر تونل) و ضخامت مدل ۰/۴ متر (۰/۱ قطر تونل) در نظر گرفته شده است (از آنجا که شعاع تونل در مقایسه با طول تونل ناچیز است شرایط کرنش صفحه ای برقرار است. این شرایط با در نظر گرفتن یک برش نازک و ثابت کردن جابجایی در راستای محور تونل قابل اجرا می باشد). تنشهای افقی و قائم با توجه به دانسیته توده سنگ و اثر گرانشی و مقدار رویاره بر مدل وارد می شوند. تونل در موادی الاستیک، کاملاً پلاستیک با معیار شکستگی موهر- کلمب حفر می گردد. مرزهای کناری مدل (سمت چپ و راست مدل) و مرز پایینی به صورت غلتکی در نظر گرفته می شود. ضمناً مرزهای مدل در راستای ضخامت (تا شرایط کرنش صفحه ای برقرار شود) نیز به صورت غلتکی فرض می گردد.

<sup>۱</sup> Creep

برای نگهداری دائمی تونل از بتن آرمه درجا (بتن درجا بتنی است که در سازه بتن ریخته می‌شود) استفاده می‌گردد، به همین علت در مدل، اقدام به مدلسازی یک لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر) طبق آیین نامه USBR ضخامت پوشش بتنی بدون در نظر گرفتن شرایط مسلح سازی ۱ تا ۱/۳ اینچ به ازای هر فوت قطر تونل است) با مدول الاستیک ۲۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ و مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال می‌شود.

در ادامه، اقدام به حل مدل و رسیدن به جواب همگرایی می‌گردد. هدف از این شبیه‌سازی، استخراج لنگر خمشی  $(M)^T$ ، نیروی محوری  $(T)^T$ ، نیروی برشی  $(Q)^T$ ، تنش مرزی نرمال  $(\sigma_R)^T$  و تنش مرزی برشی  $(\tau_{R\theta})^T$  وارد بر المانهای نگهدارنده (بتن) از مدل می‌باشد (شکل ۶-۱).



شکل ۶-۱- شماتیک تنشها، نیروها و لنگر بر نگهدارنده دائمی تونل

<sup>T</sup> Bending moment

<sup>T</sup> Axial thrust

<sup>T</sup> Shear force

<sup>T</sup> Normal interface contact stresses

<sup>T</sup> Shear interface contact stresses

### ۳-۶- نتایج مدلسازی نگهدارنده دائمی برای تونل انتقال آب بابلک

از آنجا که نتایج جابجایی‌ها، لنگر خمشی، نیروی محوری و ... برای حالت  $K=1/5$  (منظور از  $K$  نسبت تنش افقی به تنش قائم است) پیشینه نیست؛ بهتر است که مدلسازی برای زون A و زون B و مقطع حداکثر روباره به ازای  $K$  های مختلف انجام گیرد. این نتایج برای پوشش بتنی به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در جدول ۱-۶ آمده است.

بر اساس حداکثر نیروی محوری و لنگر خمشی بدست آمده از این جدول، برای زون‌های مسیر تونل به ازای  $K$  های مختلف و بر طبق طراحی ستون تحت بار محوری و خمش، اقدام به محاسبات آرماتور مورد نیاز برای هر زون از مسیر تونل می‌شود (از روش طراحی ستون تحت بار محوری و خمش در پیوست ۹ استفاده شده است).

در جدول ۱-۶ برای زون A پس از نصب نگهدارنده دائم و به ازای  $K=1/5$ ، جابجایی قائم در سقف در ۲ میلیمتری و جابجایی افقی در دیواره در ۴/۴ میلیمتری متوقف می‌شود. حداکثر نیروی محوری بر لایه بتن در این حالت برابر  $5/66 \times 10^6$  نیوتن و حداکثر لنگر خمشی بر لایه برابر  $3/10 \times 10^8$  نیوتن متر می‌باشد. برای آنکه نشان داده شود این جدول چگونه تهیه شده است به عنوان نمونه، نگهداری دائمی برای زون A در شرایط  $K=1/5$  در قسمت ۴-۶ تحلیل شده است.

در فصل اول پایان‌نامه آمد که احتمال تحت فشار بودن تونل انتقال آب وجود دارد. با توجه به ارتفاع اندک هد آب، این فشار که از درون تونل به آلماهای نگهدارنده بتن وارد می‌شود (در مقایسه با تنشهای القایی که درست در خلاف این فشار عمل می‌کنند)؛ ناچیز است. بنابراین تحت فشار بودن تونل (غرقاب شدن تونل) هیچ مشکلی را با وجود تنشهای القایی اطراف تونل از بابت طراحی نگهداری ایجاد نمی‌کند.

جدول ۶-۱- نتایج استخراج شده برای تونل انتقال آب با پوشش بتنی به ضخامت ۴۰ سانتیمتر

	حداکثر لنگر (خمشی نیوتن متر)	حداکثر نیروی (محوری نیوتن)	جایابی افقی در دیواره (mm)	جایابی قائم در سقف (mm)	K
زون A	۴/۶۷۵	۵/۱۴۶	+۳/۷	-۶/۱	-۰/۲۵
	۲/۹۳۵	۳/۸۵۴	+۲/۴	-۳/۹	-۰/۵
	۱/۶۷۵	۳/۹۲۴	+۰/۷	-۲/۴	-۰/۷۵
	۴/۲۷۴	۴/۰۴۴	-۱	-۱	۱
	۱/۷۵۵	۴/۹۴۴	-۲/۶	+۰/۵	۱/۲۵
	۳/۱۴۵	۵/۶۴۴	-۴/۴	+۲	۱/۵
مقطع حداکثر روباره	۶/۹۴۵	۸/۵۷۴	+۵/۶	-۹/۶	-۰/۲۵
	۴/۲۴۵	۶/۷۰۴	+۳/۲	-۵/۷	-۰/۵
	۲/۴۴۵	۶/۸۲۴	+۰/۷۶	-۳/۷	-۰/۷۵
	۷/۱۷۴	۶/۹۴۴	-۱/۷	-۱/۷	۱
	۲/۵۸۵	۸/۵۲۴	-۱/۴	+۰/۳	۱/۲۵
	۴/۵۲۵	۱/۰۱۴	-۶/۵	+۲/۳۶	۱/۵
زون B	۴/۰۸۵	۳/۴۴۴	+۴/۳	-۵/۷	-۰/۲۵
	۲/۰۲۵	۳/۲۵۴	+۱/۵۴	-۲/۷	-۰/۵
	۱/۱۶۵	۳/۳۴۴	+۰/۳۶	-۱/۷	-۰/۷۵
	۳/۱۷۴	۳/۴۱۴	-۰/۸	-۰/۸	۱
	۱/۲۱۵	۴/۱۷۴	-۲	+۰/۱۸	۱/۲۵
	۲/۱۶۵	۴/۹۴۴	-۳/۱	+۱/۱	۱/۵

#### ۴-۶- مدلسازی نگهداری دائمی برای تونل انتقال آب در زون $A$ ( $K=1/5$ )

وضعیت المان‌بندی اطراف تونل مطابق شکل ۲-۶ و وضعیت بردارهای جابجایی اطراف تونل مطابق شکل ۳-۶ می‌باشد. اشکال ۴-۶ تا ۷-۶ به منحنیهای تراز و نمودارهای جابجایی اختصاص دارد. نیروهای محوری و برشی، لنگر خمشی، تنش مرزی نرمال و تنش مرزی برشی در اشکال ۸-۶ تا ۱۲-۶ آمده است (فایل متنی برای این زون در پیوست ۸-ج آمده است).

شکل ۴-۶ جابجایی قائم در سقف تونل در زون  $A$  پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای  $K=1/5$  را نشان می‌دهد که مقدار آن در  $1/9$  میلیمتری متوقف می‌شود.

شکل ۵-۶ منحنی تراز جابجایی قائم در اطراف تونل در زون  $A$  پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای  $K=1/5$  را نشان می‌دهد که مقدار آن در سقف تونل به  $1/9$  میلیمتر می‌رسد.

شکل ۶-۶ جابجایی افقی در دیواره تونل در زون  $A$  پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای  $K=1/5$  را نشان می‌دهد که مقدار آن در  $4/4$  میلیمتری متوقف می‌شود.

شکل ۷-۶ منحنی تراز جابجایی افقی در اطراف تونل در زون  $A$  پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای  $K=1/5$  را نشان می‌دهد که مقدار آن در دیواره تونل به  $4/4$  میلیمتر می‌رسد.

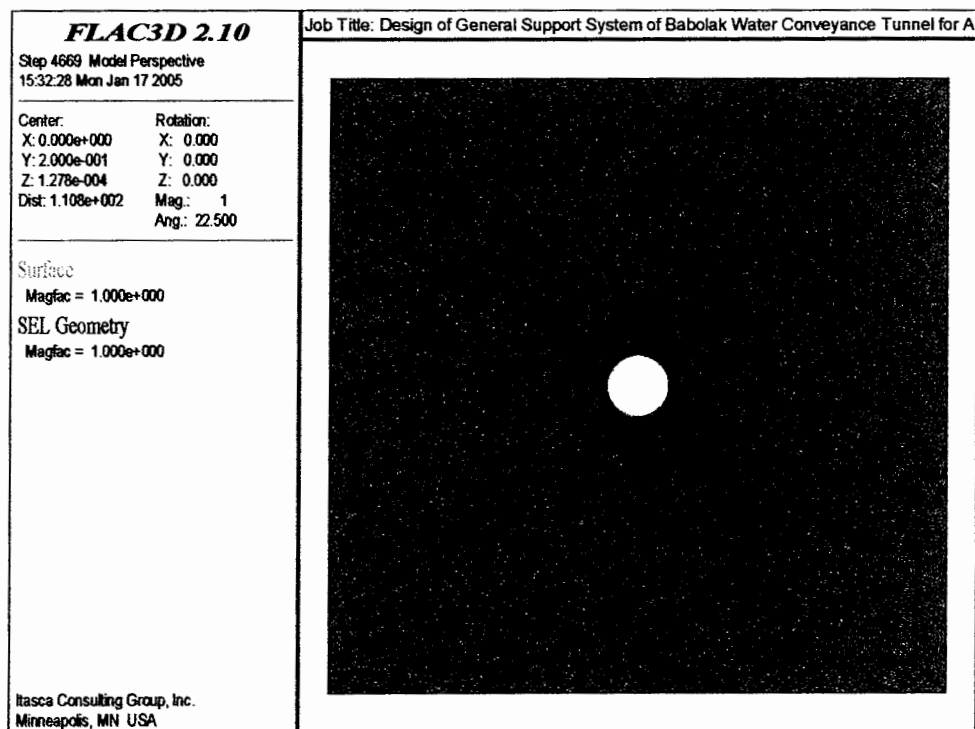
شکل ۸-۶ منحنی تراز نیروی محوری بر لایه بتن به ضخامت  $40$  سانتیمتر در زون  $A$  به ازای  $K=1/5$  را نشان می‌دهد که مقدار حداکثر نیروی محوری برابر  $5/66 \times 10^6$  نیوتن می‌باشد (دید از بالای مقطع دایروی تونل رسم شده است. دقت شود که ضخامت این مقطع در راستای محور  $Y$  است و مقدار آن برابر  $0/4$  متر می‌باشد).

شکل ۹-۶ منحنی تراز لنگر خمشی بر لایه بتن به ضخامت  $40$  سانتیمتر در زون  $A$  به ازای  $K=1/5$  را نشان می‌دهد که مقدار حداکثر لنگر خمشی برابر  $3/10 \times 10^5$  نیوتن‌متر می‌باشد.

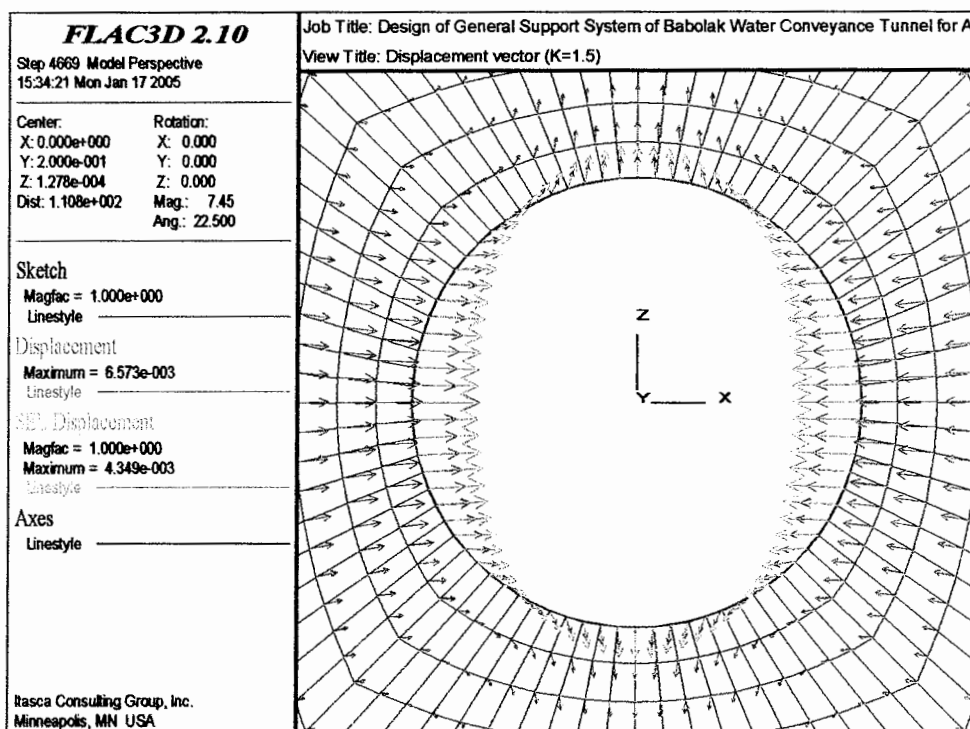
شکل ۶-۱۰ منحنی تراز نیروی برشی بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در زون A به ازای  $K=1/5$  را نشان می‌دهد که مقدار حداکثر نیروی برشی برابر  $2/94 \times 10^5$  نیوتن می‌باشد.

شکل ۶-۱۱ منحنی تراز تنش مرزی نرمال بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در زون A به ازای  $K=1/5$  را نشان می‌دهد که مقدار حداکثر تنش برابر  $3/57 \times 10^6$  پاسکال می‌باشد.

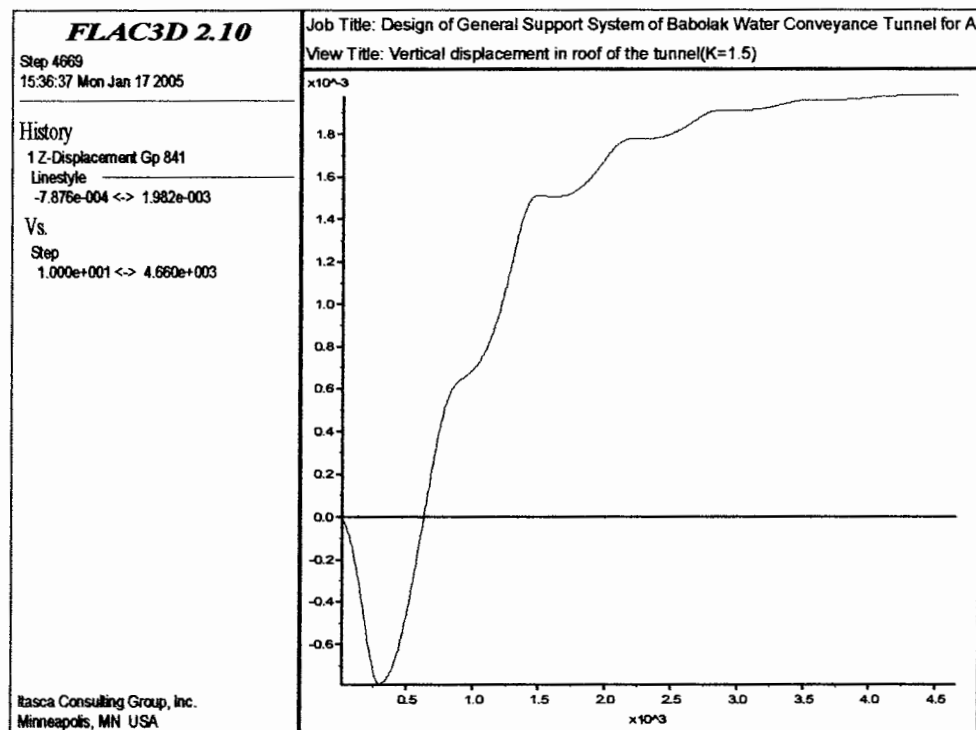
شکل ۶-۱۲ منحنی تراز تنش مرزی برشی بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در زون A به ازای  $K=1/5$  را نشان می‌دهد که مقدار حداکثر تنش برابر  $7 \times 10^5$  پاسکال می‌باشد.



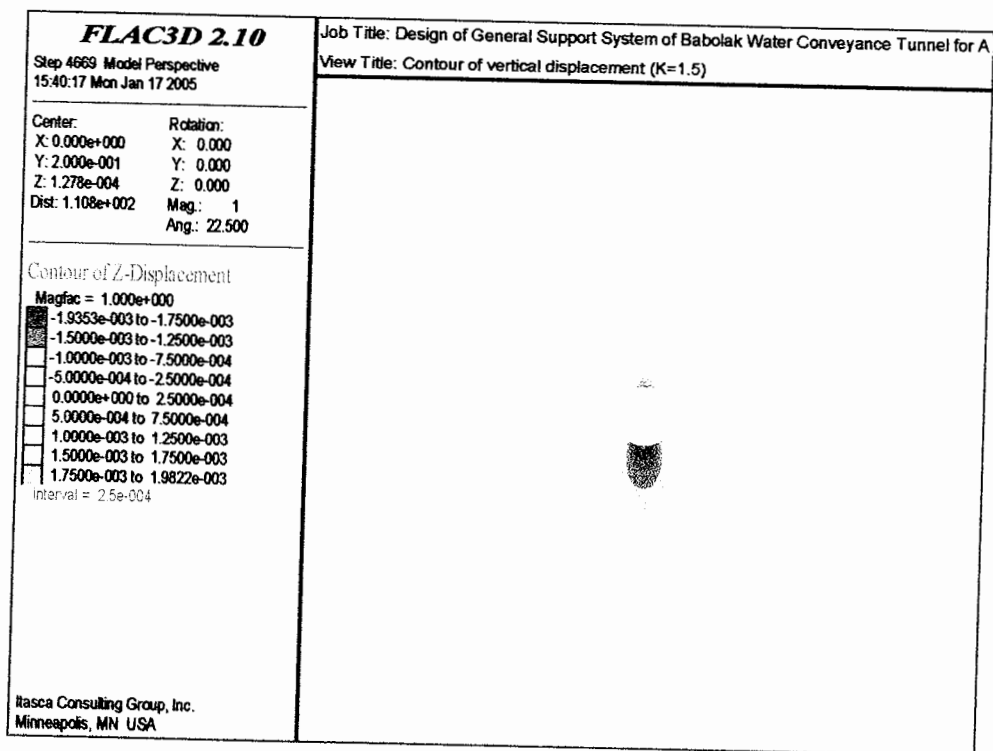
شکل ۶-۲- وضعیت المان‌بندی اطراف تونل



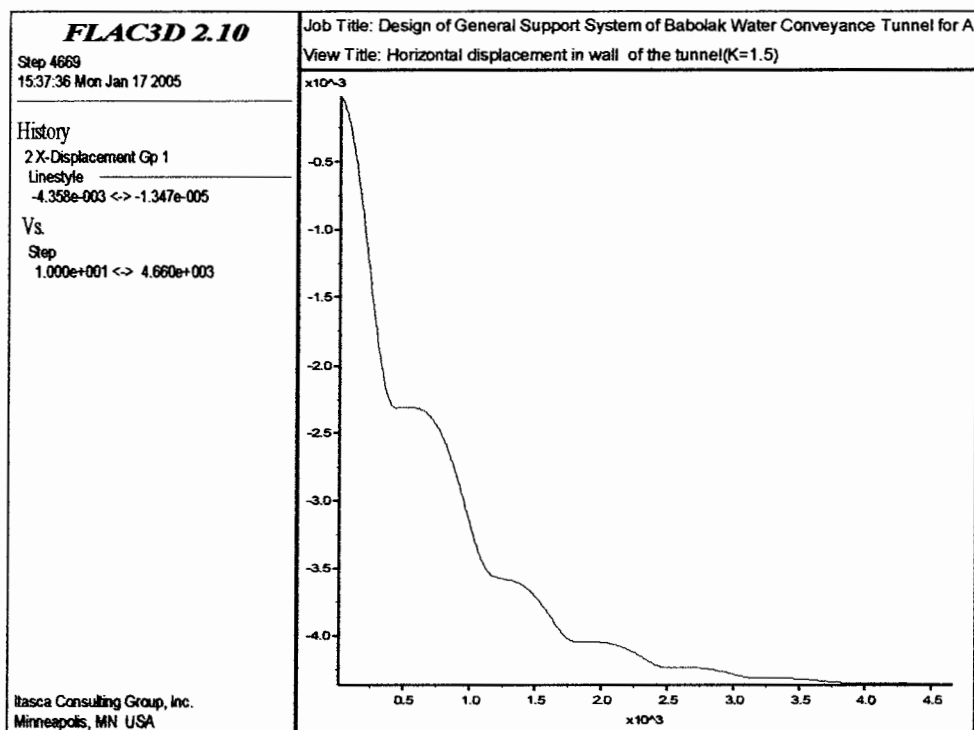
شکل ۶-۳- وضعیت بردارهای جابجایی اطراف تونل در زون A پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای  $K=1/5$



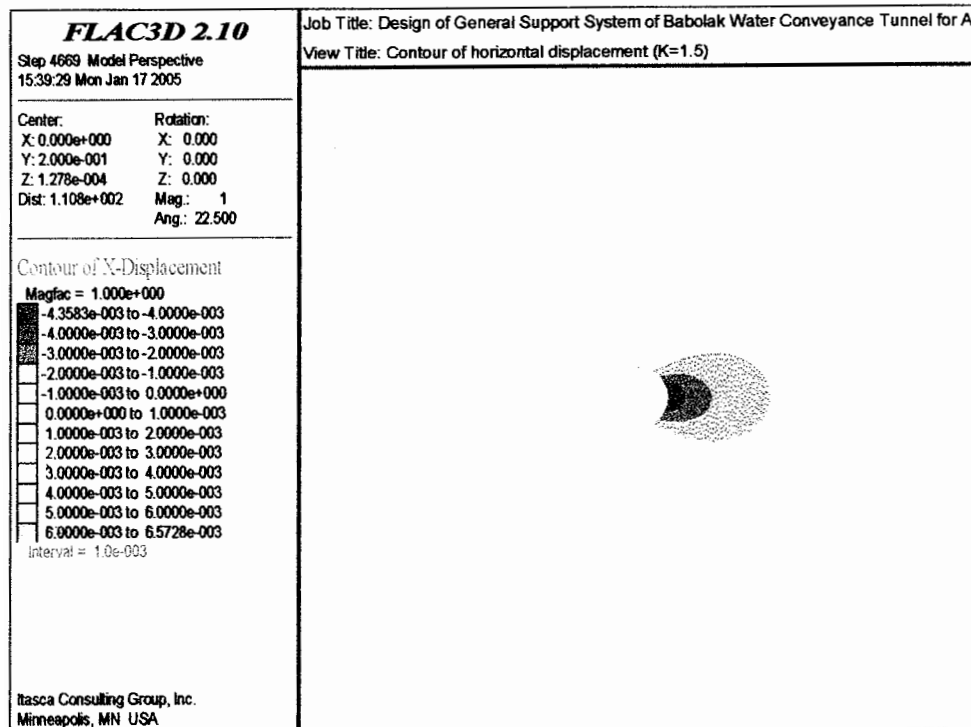
شکل ۶-۴- جابجایی قائم در سقف در زون A پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای  $K=1/5$



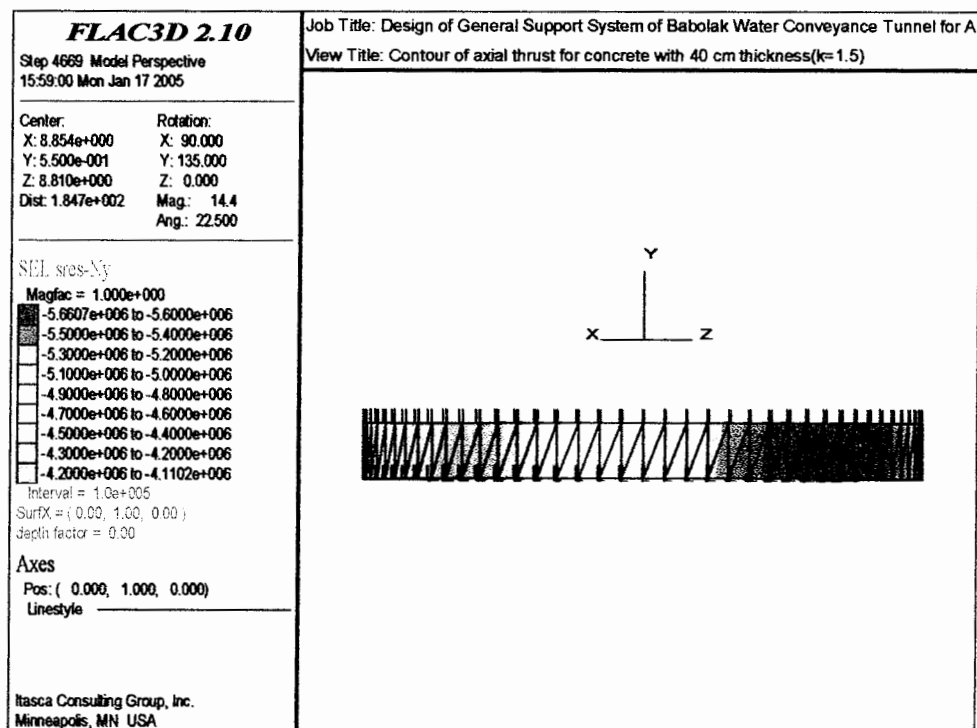
شکل ۵-۶- منحنی تراز جابجایی قائم در زون A پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای  $K=1/5$



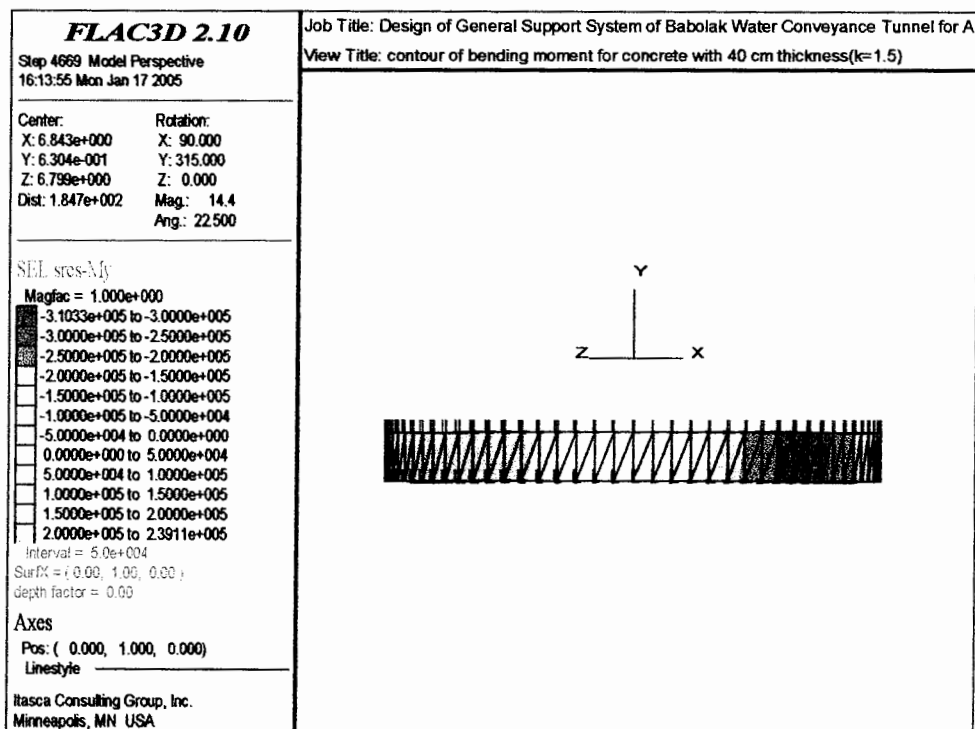
شکل ۶-۶- جابجایی افقی در دیواره در زون A پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای  $K=1/5$



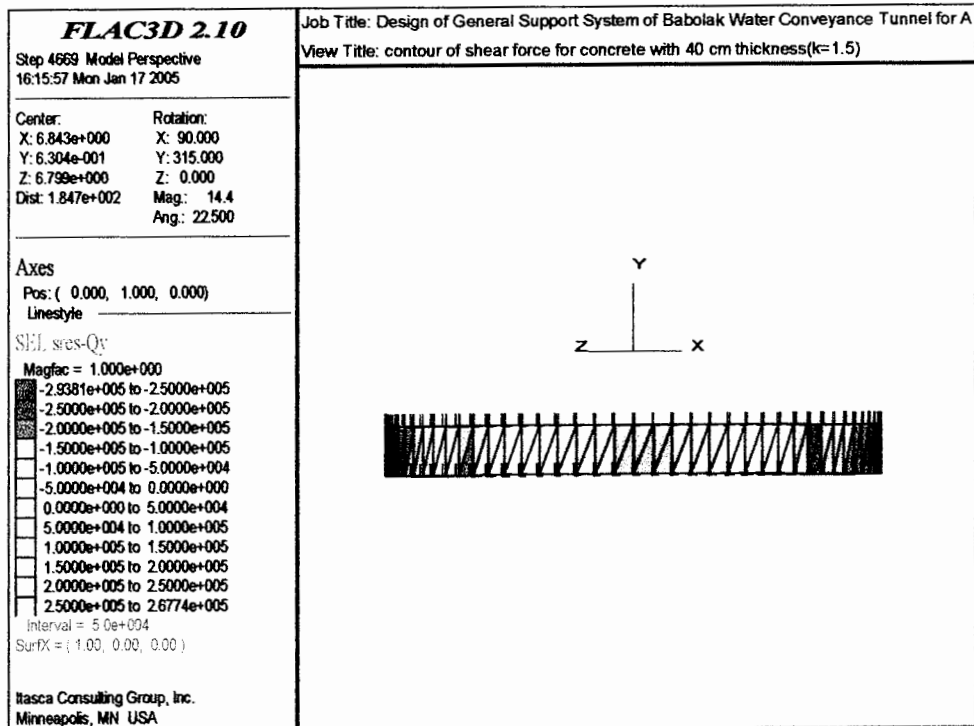
شکل ۶-۷- منحنی تراز جابجایی افقی در زون A پس از نصب نگهدارنده دائم به ازای  $K=1/5$



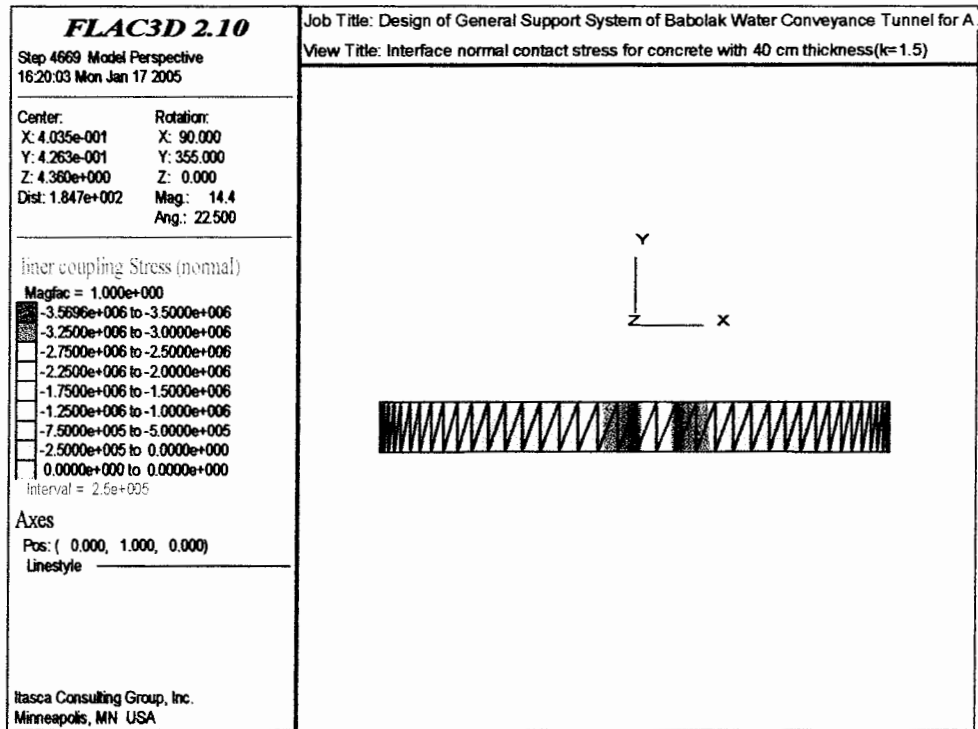
شکل ۶-۸- منحنی تراز نیروی محوری بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در زون A به ازای  $K=1/5$



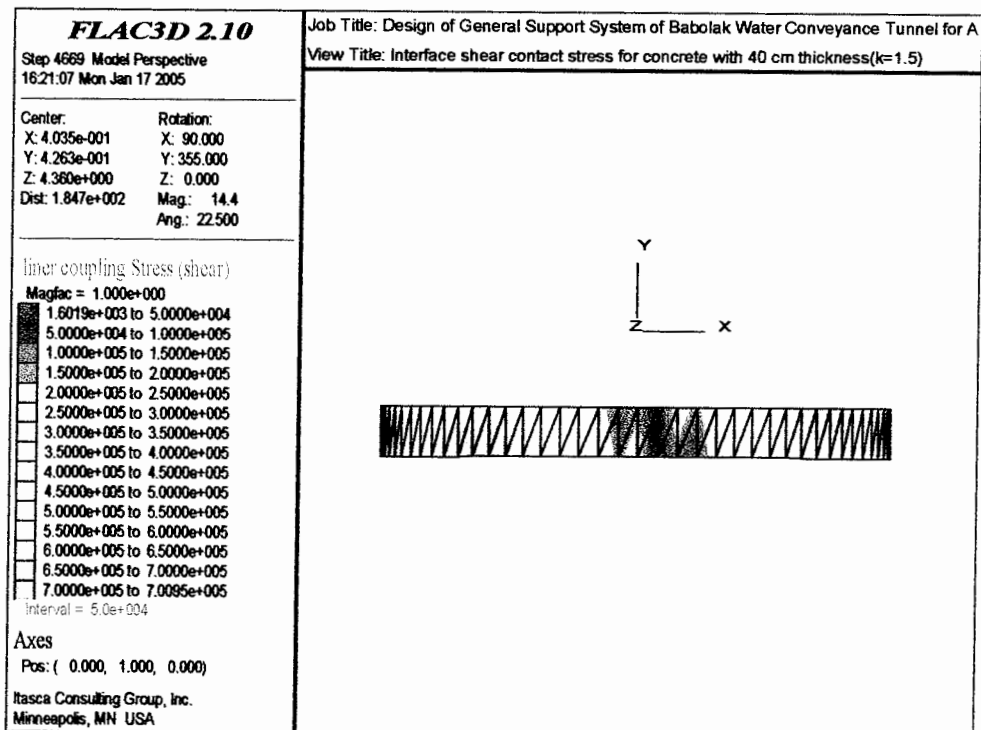
شکل ۶-۹- منحنی تراز لنگر خمشی بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در زون A به ازای  $K=1/5$



شکل ۶-۱۰- منحنی تراز نیروی برشی بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در زون A به ازای  $K=1/5$



شکل ۶-۱۱- منحنی تراز تنش مرزی نرمال بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در زون A به ازای  $K=1/5$



شکل ۶-۱۲- منحنی تراز تنش مرزی برشی بر لایه بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر در زون A به ازای  $K=1/5$

## ۵-۶- آرماتور پیشنهادی مورد نیاز برای مسیر تونل انتقال آب

آرماتور پیشنهادی برای مسیر تونل به صورت زیر است:

آرماتور فشار و خمشی: دو ردیف آرماتور به قطر ۲۰ میلیمتر با فاصله ۱۵ سانتیمتر

آرماتور لغت و حرارت: دو ردیف آرماتور به قطر ۱۴ میلیمتر با فاصله ۲۰ سانتیمتر

که هر چه به مقطع حداکثر روباره نزدیکتر شویم، در آرماتور فشار و خمشی مقدار ۱۵ سانتیمتر

به ۸ سانتیمتر تقلیل می‌یابد (مراحل محاسبات آرماتور مورد نیاز در پیوست ۹ آمده است).

## نتایج و پیشنهادات

## نتایج

مارنها اصولاً رفتار همگنی دارند و در آزادسازی تنش ناشی از حفر تونل به دلیل وجود رس خاصیت پلاستیک از خود نشان می‌دهند و می‌توان رفتار الاستوپلاستیک کامل را در مدلسازی محیط پیوسته برای آنها در نظر گرفت. همچنین به دلیل پایین بودن مقاومت و خاصیت شبه پلاستیکی مارن امکان درزمداری پایین است و نباید برای اینگونه سنگها تحلیل گوه‌ای بکار برد.

توده سنگ مارنی در زمان اجرای سیستم نگهداری نقش نگهداری غیر فعال را بازی می‌کند و این یعنی اینکه نصب پیچ‌سنگ نیز در زمان اجرای شاتکریت ضرورت دارد.

توده‌سنگهای مسیر تونل انتقال آب بابلک بر اساس وضعیت لایه‌بندی به دو زون خروجی A و ورودی B تقسیم می‌شوند. سنگهای مسیر تونل در هر دو زون از جنس مارن مربوط به دوره میوسن می‌باشد با این تفاوت که زون ورودی از مارن با درصد رس کم و زون خروجی از مارن با درصد رس زیاد تشکیل شده است.

نتایجی که از روشهای تجربی حاصل شده است، نشان می‌دهد که مسیر ورودی تونل در رده سنگهای ضعیف قرار دارد و نیاز به اجرای ۵ سانتیمتر شاتکریت به همراه پیچ‌سنگ به فواصل ۱ تا ۱/۵ متر می‌باشد و توده‌سنگهای زون خروجی تونل در رده سنگهای خیلی ضعیف قرار دارد و لازم است که ۵ تا ۷/۵ سانتیمتر شاتکریت به همراه پیچ‌سنگ به فواصل ۱ تا ۱/۵ متری اجرا گردد.

از آنجا که روشهای طراحی تجربی یک ایده کلی را برای طراحی سیستم نگهداری موقت به طراح می‌دهند و اعتماد چندانی به نتایج این روشها نمی‌توان کرد، لازم دیده شد که طراحی به روش تحلیل اندرکنش سنگ - سیستم نگهداری نیز صورت گیرد. نتایجی که از تحلیل اندرکنش سنگ - سیستم نگهداری بر می‌آید، ۵ سانتیمتر شاتکریت به همراه پیچ‌سنگ ۳ متری برای زون ورودی B را پیشنهاد می‌کند و ۷/۵ تا ۱۵ سانتیمتر شاتکریت به همراه بولت ۳ متری با فاصله‌داری ۱/۵ در ۱/۵ متر را برای زون خروجی A لازم می‌داند.

چون تحلیل اندرکنش سنگ-سیستم نگهداری بر اساس یکسری فرضیات و محدودیتها- که قبلاً گفته شد- طراحی سیستم نگهداری موقت را انجام می‌دهد، طراحی سیستم نگهداری موقت به روش مدلسازی عددی نیز صورت گرفت. بر اساس تحلیل عددی پیشنهاد می‌گردد که در کل مسیر تونل، از پیچ سنگ ۳ متری با فاصله‌داری ۱/۵ در ۱/۵ متر استفاده گردد. با توجه به تنش کششی اعمال شده بر لایه شاتکریت، اجرای توری سیمی (مش) الزامی است و چون از نظر اجرایی، بتن‌پاشی به ضخامت ۵ سانتیمتر با یک لایه مش امکان‌پذیر نیست؛ لذا حداقل ضخامت شاتکریت ۷/۵ سانتیمتر در کل مسیر تونل پیشنهاد می‌گردد که این ضخامت در مقطع حداکثر روباره به ۱۵ سانتیمتر افزایش می‌یابد.

به نظر محقق، بهترین سیستم نگهداری موقت پیشنهادی آنچه است که بر اساس روش عددی بدست می‌آید. زیرا روش مدلسازی عددی بخاطر بهتر مدل کردن سطح مقطع تونل، بکار بردن فرضیات و محدودیتهای کمتر نسبت به سایر روشها و مشخص کردن بهتر زمین مسیر تونل با استفاده از پارامترهای ورودی بیشتر نسبت به دیگر روشها از ارجحیت خاصی برخوردار است؛ هر چند که نتایج دیگر روشها نیز تقریباً همسو با نتایج روش مدلسازی عددی می‌باشد.

طرح پیشنهادی برای نگهداری دائم نیز ۴۰ سانتیمتر بتن مسلح می‌باشد. مشخصات آرماتور فشار و خمشی آن، دو ردیف میلگرد ۲۰ با فاصله ۱۵ سانتیمتر از هم می‌باشد.

## پیشنهادات

- (۱) انجام آزمایشهای پرجا به منظور تعیین مقدار و راستای تنشهای اصلی حداقل و حداکثر و مشخص کردن میزان  $K$  (نسبت تنش افقی به قائم)
- (۲) نصب سیستمهای رفتارسنجی در زمان حفر تونل جهت دسترسی به منحنی مشخصه واقعی زمین
- (۳) تعیین زمان بهینه نصب سیستم نگهداری موقت و مشخص کردن مقدار دقیق پیشروی در هر گام حفاری بر اساس نتایج رفتارنگاری تونل
- (۴) آنالیز برگشتی اطلاعات حاصل از رفتارسنجی تونل و تعیین دقیق پارامترهای ژئوتکنیکی توده‌سنگهای مسیر تونل در زمان حفر و مقایسه آن با اطلاعات و نتایج این تحقیق

## منابع فارسی

- ۱- استوار، ا- آتشکاری در معدن- جلد دوم- انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر- ۱۳۷۷
- ۲- داب، ع- گزارش زمین‌شناسی- مطالعات مرحله اول سیستم انتقال آب بابلک- مهتاب قدس- بهمن ۷۷
- ۳- گزارش هیدرولوژی- مطالعات مرحله اول سیستم انتقال آب بابلک- مهتاب قدس- بهمن ۷۵
- ۴- خاکباز، م- گزارش مطالعات و طراحی‌های مکانیک سنگی ساختگاه سد البرز- مطالعات مرحله دوم- مهتاب قدس- اسفند ۷۷
- ۵- رحیم زاده، ع و فتحی، ا- انتخاب روش حفاری تونل سرریز سد البرز- مجموعه مقالات اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران- دانشگاه تربیت مدرس- بهمن ۸۰
- ۶- سحابی، ف- سنگ شناسی رسوبی- انتشارات دانشگاه تهران- اسفند ۱۳۷۱
- ۷- زرعیان، س- سنگ شناسی عمومی رسوبی- انتشارات دانشگاه تهران- مهر ۱۳۶۴
- ۸- مرتضوی امیری، ج- حفر، کنترل و نگهداری تونلها در زمین‌های آماسی- سمینار کارشناسی ارشد دانشگاه شاهرود- ۱۳۷۸
- ۹- مدنی، ح- تونل‌سازی- جلد اول (حفاری و اجرا)- انتشارات دانشگاه امیرکبیر- تابستان ۱۳۷۷
- ۱۰- بهنیا، ا و بهنیا، ک- بناهای زیرزمینی (طراحی- اجرا- نگهداری)- انتشارات دانشگاه تهران- بهمن ۱۳۷۳
- ۱۱- فین، ژ (ترجمه مجید معظمی)- اصول و طراحی نگهداری در تونلها- انتشارات دانشگاه صنایع و معادن ایران- پاییز ۱۳۸۲
- ۱۲- جلالی، م- مروری بر مسائل مکانیک سنگ- انتشارات دانشگاه صنایع و معادن ایران- ۱۳۸۱
- ۱۳- مدنی، ح- تونل‌سازی- جلد سوم (تحلیل پایداری)- انتشارات دانشگاه امیرکبیر- اسفند ۱۳۷۹

۱۴ - قارونی نیک، م و همزه ایبازنی، م- نگهداری حفاریات زیرزمینی در سنگ سخت - انتشارات نص - ۱۳۸۰

۱۵ - مدنی، ح- تونل سازی- جلد چهارم ( طراحی و اجرای سیستم نگهداری)- انتشارات دانشگاه امیرکبیر - ۱۳۸۱

۱۶ - کی نیا، ا- آنالیز و طراحی سازه های بتن آرمه - انتشارات جهاد دانشگاهی - واحد صنعتی اصفهان - ۱۳۸۰

### منابع لاتین

- 17-Frederich, S., "*Standard Handbook for Civil Engineers*", Third Edition, West Palm Beach, FL, (1983)
- 18-Hoek, E.kaiser, P.K.-Bawden, W.F., "*Support of Underground Excavation in Hard Rocks*", (1995)
- 19-Sinha, S., "*Underground Structures: Design & Instrumentation*", Elsevier Publication, (1989)
- 20-Hoek, e., Brown, E. T., "*Underground Excavations in Rock*", IMM, London, (1982)
- 21- Chang, Y., "*Tunnel Support with Shotcrete in Weak Rock*", (1994)
- 22- Itasca Consulting group, "*FLAC3D Version 2.1, User manual*", (2001)

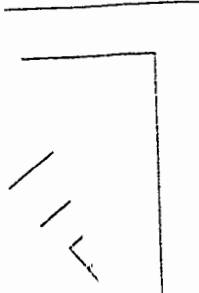
پیوستها

## توضیح پیوست ۱ و ۲

در پیوست ۱، نقشه هیدرولوژی موقعیت جغرافیایی حوزه‌های آبریز منطقه آمده است. رودخانه بابلک، تونل انتقال آب بابلک، سد البرز و رودخانه بابل به همراه ایستگاه‌های اندازه‌گیری در نقشه مشاهده می‌شوند.

در پیوست ۲، مقطع زمین‌شناسی مسیر تونل انتقال آب بابلک و پلان توپوگرافی و تعیین موقعیت در نقشه‌های A و B آمده است. جنس سنگهای مسیر تونل و موقعیت گمانه‌های اکتشافی در نقشه به خوبی واضح می‌باشد.

پروست ۱



نمود  
جاده  
جاده  
روستا  
حد حوض  
محل -  
استگاه  
خطوط  
استگاه  
استگاه  
استگاه  
استگاه  
سول  
سد افخر

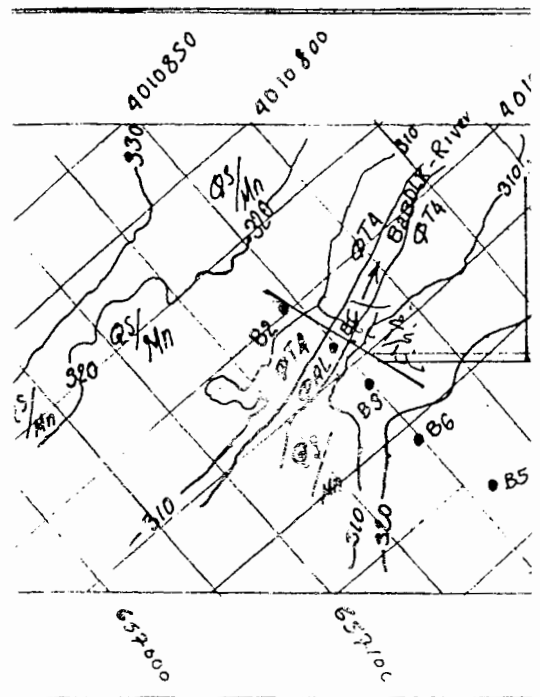
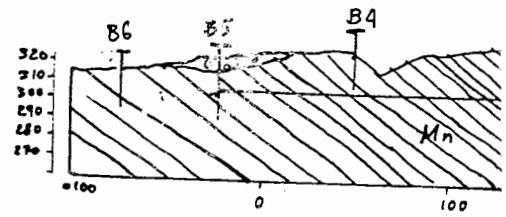
۲	
۱	
تغیر	REV.

کارفرما:  
شرکت



مقیاس  
1:250000  
SCALE

شماره نقشه  
۱۵۵۲



### پیوست ۳

روش USBR [۸]:

درجه تورم	درصد تورم محتمل	حد انقباض	نشان خمیری
خیلی بالا	$30 <$	$11 >$	$25 <$
بالا	$20 - 30$	$7 - 12$	$25 - 41$
متوسط	$10 - 20$	$10 - 16$	$15 - 28$
پایین	$10 >$	$15 >$	$0 - 18$

آیین نامه آشتو [۸]:

نشان خمیری	حد روانی	درجه تورم
کمتر از ۲۵	کمتر از ۵۰	پایین
$25 - 35$	$50 - 60$	متوسط
بیشتر از ۳۵	بالاتر از ۶۰	بالا

پیوست ۴-الف)

نتایج آزمایشهای نفوذپذیری (بر حسب لوژن و سانتی متر بر ثانیه) [۲]:

			۸-۱۲	۴-۸	۲-۳	عمق (متر)	گمانه B1
			۵	۸	$3/40 \times 10^{-3}$	نفوذپذیری	
			T	D	-	رفتار سنگ	
۱۹-۲۴	۱۴-۱۹	۱۱-۱۲	۸-۹	۵-۶	۲-۳	عمق (متر)	گمانه B2
کمتر از ۱	۱۴	$9/48 \times 10^{-3}$	$1/52 \times 10^{-3}$	$7/68 \times 10^{-7}$	$1/64 \times 10^{-5}$	نفوذپذیری	
T	D	-	-	-	-	رفتار سنگ	
			۱۳-۲۰	۸-۱۳	$3/30-4/30$	عمق (متر)	گمانه B3
			۱۰۰	۴۴	$3/59 \times 10^{-4}$	نفوذپذیری	
			T	T	-	رفتار سنگ	
۱۳-۱۸	۱۴-۱۵	۱۱-۱۲	۸-۹	۵-۶	۲-۳	عمق (متر)	گمانه B4
۱	۱	۲	$5/10 \times 10^{-6}$	$3/40 \times 10^{-5}$	$3/14 \times 10^{-5}$	نفوذپذیری	
L	L	L	-	-	-	رفتار سنگ	
					۲۵-۳۰	۲۰-۲۵	۱۵-۲۰
					.	.	.
					L	L	L
۱۵-۲۱	۱۴-۱۵	۱۱-۱۲	۸-۹	۵-۶	۲-۳	عمق (متر)	گمانه B5
کمتر از ۱	$3/5 \times 10^{-4}$	$1/61 \times 10^{-4}$	$6/76 \times 10^{-5}$	$2/19 \times 10^{-4}$	.	نفوذپذیری	
V	V	-	-	-	-	رفتار سنگ	
					۳۱-۳۵	۲۶-۳۱	۲۱-۲۶
					کمتر از ۱	.	.
					D	L	L
	۲۰-۲۵	۱۴-۲۰	۹-۱۴	۵-۶	۲-۳	عمق (متر)	گمانه B6
	کمتر از ۱	۱	۶	$7/5 \times 10^{-5}$	.	نفوذپذیری	
	D	W	T	-	-	رفتار سنگ	
۲۰-۳۷/۲۰	۲۵-۲۶	۱۸-۱۹/۲۰	۹-۱۰	۵-۶	۲-۳	عمق (متر)	گمانه B7
۲۴	.	۲۲	۱۳	.	.	نفوذپذیری	
L	L	T	T	-	-	رفتار سنگ	

		۶۵-۷۰	۶۰-۶۵	۵۴-۶۰	۴۹-۵۴	۴۴-۴۹	۳۹-۴۴
		کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱	۳
		L	L	L	L	D	T
۱۲۵-۱۳۰	۱۲۰-۱۲۵	۱۱۵-۱۲۰	۱۱۰-۱۱۵	۱۰۵-۱۱۰	۱۰۰-۱۰۵	عمق (متر)	گمانه B8
کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱	نفوذپذیری	
D	D	D	D	D	D	رفتار سنگ	
						۱۳۵-۱۴۰	۱۳۰-۱۳۵
						کمتر از ۱	کمتر از ۱
						W	D
۱۷۰-۱۷۵	۱۶۵-۱۷۰	۱۶۰-۱۶۵	۱۵۰-۱۵۵	۱۴۰-۱۴۵	۱۳۵-۱۴۰	عمق (متر)	گمانه B10
کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱	نفوذپذیری	
D	L	D	D	D	D	رفتار سنگ	
۲۶-۳۱	۲۱-۲۶	۱۶-۲۱	۱۱-۱۶	۶-۱۱	۵-۶	عمق (متر)	گمانه B11
۱۰	کمتر از ۱	کمتر از ۱	۷	۱	۰	نفوذپذیری	
T	D	D	D	D	-	رفتار سنگ	
۶۵-۷۰	۶۱-۶۵	۵۶-۶۱	۵۱-۵۶	۴۶-۵۱	۴۱-۴۶	۳۶-۴۱	۳۱-۳۶
۲	کمتر از ۱	۱	۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱	۱۸	۴
L	L	D	V	L	L	D	D
۱۷-۱۸	۱۴-۱۵	۱۱-۱۲	۸-۹	۵-۶	۲-۳	عمق (متر)	گمانه B12
۱۱	۰	بیشتر از ۶۰	۰	۰	۰	نفوذپذیری	
T	L	-	-	-	-	رفتار سنگ	
						۲۳-۲۸	۱۸-۲۳
						کمتر از ۱	۲۲
						D	D

L: Laminar جریان یکنواخت و آرام

T: Turbulent جریان آشفته

D: Dilation وضعیت باز شدن گسستگی ها

V: Void filling وضعیت آب شکستگی ذرات درون شکافها

W: Wash out وضعیت پر شدگی یا اشباع

پیوست ۴- ب)

رده بندی آفتس در تعیین کیفیت نفوذپذیری:

مقادیر لوژن	کیفیت نفوذپذیری
۰ تا ۳	نفوذناپذیر
۳ تا ۱۰	کمی نفوذپذیر
۱۰ تا ۳۰	نفوذپذیری متوسط
۳۰ تا ۶۰	نفوذپذیری زیاد
۶۰ به بالا	خیلی نفوذپذیر

پیوست ۵ - الف) جداول مربوط به رده‌بندی ژئومکانیکی سنگها (RMR) [۲۰۱۸ و ۲۰۱۹]

الف) پارامترهای طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری آنها

پارامتر							محدوده مقادیر			
۱	مقاومت توده سنگی بکر	شاخص مقاومت بار نقطه ای	بیش از ۸ مگاپاسکال	۴ تا ۸ مگاپاسکال	۲ تا ۴ مگاپاسکال	۱ تا ۲ مگاپاسکال	برای این محدوده مقاومت فشاری تک محوره ترجیح داده می شود			
		مقاومت فشاری تک محوری	بیش از ۲۰۰ مگاپاسکال	۲۰۰ تا ۴۰۰ مگاپاسکال	۵۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال	۲۵ تا ۵۰ مگاپاسکال	۱۰ تا ۲۵ مگاپاسکال	۳ تا ۱ مگاپاسکال		
	ارزش عددی		۱۵	۱۲	۷	۴	۲	۱	۰	
۲	شاخص RQD		۹۰-۱۰۰٪	۷۵-۹۰٪	۵۰-۷۵٪	۲۵-۵۰٪	کمتر از ۲۵٪			
	ارزش عددی		۲۰	۱۷	۱۳	۸	۳			
۳	فاصله‌داری درزه‌ها		بیش از ۳ متر	۱ تا ۳ متر	۰/۳ تا ۱	۰/۵ تا ۰/۳ متر	کمتر از ۰/۵ متر			
	ارزش عددی		۳۰	۲۵	۲۰	۱۰	۵			
۴	وضعیت ناپیوستگی		سطوح خیلی زیر غیر ممتد، جدا نشده، دیواره درزه‌ها سخت	سطوح کمی زیر، جدایی دیواره کمتر از ۱ میلیمتر درزه‌ها سخت	سطوح کمی زیر، جدایی دیواره کمتر از ۱ میلیمتر درزه‌ها نرم	سطوح آینه‌ای با ضخامت کمتر از ۵ میلیمتر موا آکنده ۱ تا ۵ میلیمتر، بازشدگی درزه‌ها ممتد	ضخامت مواد آکنده بیش از ۵ میلیمتر و بازشدگی بیش از ۵ میلیمتر، درزه‌ها ممتد			
	ارزش عددی		۲۵	۲۰	۱۲	۶	۰			
۵	آب زیرزمینی		جریان آب در ۱۰ متر طول تونل	بدون آب یا	کمتر از ۲۵ لیتر بر دقیقه	۱۲۵ تا ۲۵ لیتر بر دقیقه	بیش از ۱۲۵ لیتر بر دقیقه			
			نسبت فشار در درز نسبت به تنش اصلی بزرگتر	۰ یا	۰-۰/۰۲ یا	۰/۰۲-۰/۰۵ یا	>۰/۰۵ یا			
			شرایط عمومی	کاملاً خشک	فقط مرطوب	آب تحت فشار متوسط	مشکلات فراوان در اثر آب			
	ارزش عددی		۱۰	۷	۴	۰				

ب) تعدیل ارزش عددی برای جهت‌یابی درزه‌ها

راستا و جهت میل درزه‌ها	خیلی مساعد	مساعد (مطلوب)	مناسب	نامساعد	خیلی نامساعد
تونل‌ها	۰	-۲	-۵	-۱۰	-۱۲
پی‌ها	۰	-۲	-۷	-۱۵	-۲۵
شیروانی‌ها	۰	-۵	-۲۵	-۵۰	-۶۰

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 موازی محور تونل		امتداد عمود بر محور تونل			
			زاویه شیب خلاف جهت با پیشروی		زاویه شیب هم جهت با پیشروی	
	زاویه شیب ۲۰-۴۵	زاویه شیب ۴۵-۹۰	زاویه میل ۲۰-۴۵	زاویه میل ۴۵-۹۰	زاویه میل ۲۰-۴۵	زاویه میل ۴۵-۹۰
	نامساعد	مناسب	خیلی نامساعد	نامساعد	مساعد	خیلی مساعد

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
پرشدگی (خرد 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 ۵ - ب) جداول مربوط به رده‌بندی NGI (Q) (۱۲)

الف) امتیاز مربوط به پارامتر  $J_n$

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

ب) امتیاز مربوط به پارامتر  $J_r$

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

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 کثیفی‌های 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 فاقد مواد پر کننده.
۰/۳۳	۱۰ تا ۲/۵	جریان آب با فشار زیاد همراه با شسته شدن قابل ملاحظه مواد پر کننده.
۰/۱ تا ۰/۲	بیشتر از ۱۰	جریان آب با فشار فوق العاده زیاد که در طول زمان تقلیل می‌یابد.
۰/۰۵ تا ۰/۱	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

## پیوست ۶

### توضیحات جدول ۴-۱:

۱- مدول الاستیک توده سنگ از رابطه پیشنهادی ویلی<sup>۱</sup> بدست می‌آید:

$$\frac{E_{IR}}{E_{RM}} = ۲ \text{ تا } ۳$$

که در آن:

$$E_{IR} = \text{مدول الاستیک سنگ سالم}$$

$$E_{RM} = \text{مدول الاستیک توده سنگ}$$

۲- (m) ثابت هوک و براون برای توده سنگ مارنی از ۴ تا ۷ متغیر است و هر چه مقدار رس مارن

بالاتر باشد، این ضریب پایین‌تر است.

۳- (S) ثابت هوک و براون برای توده سنگ، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$s = \left( \frac{\sigma_{c1}}{\sigma_{c2}} \right)^2 = \left( \frac{2 \times c \times \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}}{\sigma_{c2}} \right)^2$$

که در آن:

$$\sigma_{c1} = \text{مقاومت فشاری توده سنگ}$$

$$\sigma_{c2} = \text{مقاومت فشاری سنگ سالم ( از جدول ۲-۶ بدست می‌آید)}$$

$$c \text{ و } \varphi = \text{چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ( از ۲-۸-۶ بدست می‌آید)}$$

<sup>۱</sup>Wyllie(1991)

پیوست ۷-الف) (مراحل رسم منحنی مشخصه زمین برای زون B)

جدول ۱- اطلاعات صفحه گسترده اول

	A	B	C	D	E
1					
2	امتیاز توده سنگ (RMR)	52		Pi(cr)(Mpa) =	0.311228777
3	مدول الاستیک توده سنگ (گیکاپاسکال)	0.7			
4	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	6.5			
5	ضریب پواسون	0.3		Pi(1)(Mpa) =	0.24470951
6	پارامتر توده سنگ $\sigma$	0.0017		Ue/Re =	0.002963694
7	پارامتر توده سنگ $m$	5		Re/Ri =	1.056329723
8	حداکثر روباره (متر)	80		Re(m) =	2.218292418
9	دقت (گرم بر سانتی متر مکعب)	2.43		Ue(m) =	0.00657434
10	شعاع تونل (متر)	2.1		R =	-0.07868976
11				Eav =	-0.004876905
12				A =	0.012055781
13				Ui/Ri =	0.003552992
14	GSI =	47		Ui(m) =	0.007461263
15	Sr =	0.002770053		Pi(1)(roof)(Mpa) =	0.2475294
16	Mr =	0.753203956		Pi(1)(floor)(Mpa) =	0.24188962
17	P0(Mpa) =	1.907064			
18	M =	0.245513111		Pi(2)(Mpa) =	0.733149018
19	D =	-0.71796736		Ui/Ri =	0.002180128
20	N =	0.523270346		Ui(m) =	0.004578268

پارامترهای ورودی در سلولهای B2 تا B10 در جدول ۱ آمده‌اند. فرمول پارامترهای خروجی به

صورت زیر است:

$$B14=B2-5$$

$$B15=EXP ((B14-100)/9)$$

$$B16=EXP ((B14-100)/28)*B7$$

$$B17=B8*B9*9.81/1000$$

$$B18=0.5*SQRT (((B7*B7)/16)+((B7*B17)/B4)+B6)-(B7/8)$$

$$B19=-B7/(B7+4*SQRT ((B7/B4)*(B17-B18*B4)+B6))$$

$$B20=2*SQRT (((B17-B18*B4)/(B16*B4))+(B15/(B16*B16)))$$

$$E2=B17-B18*B4$$

$$E5=E2-E2*RAND ()$$

$$E6=(((1+B5)/B3)*B18*B4)/1000$$

$$E7=EXP(B20-2*SQRT((E5/B16*B4)+(B15/(B16*B16))))$$

$$E8=E7*B10$$

$$E9=E6*E8$$

$$E10=IF(E7>SQRT(3); 1.1*B19; 2*B19*LN(E7))$$

$$E11=(2*E6*E7*E7)/(((E7*E7)-1)-(1+(1/E10)))$$

$$E12=(2*E6-E11)*E7*E7$$

$$E13=1-SQRT((1-E11)/(1+E12))$$

$$E14=E13*B10$$

$$E15=E5+((B9*9.81*(E8-E10))/1000)$$

$$E16=E5-((B9*9.81*(E8-E10))/1000)$$

$$E18=E2+(B17-E2)*RAND()$$

$$E19=((1+B5)*(B17-E18))/(B3*1000)$$

$$E20=E19*B10$$

علت آنکه مقادیر  $P_i(1)$  و  $P_i(2)$  (سلولهای E5 و E18) را به صورت تصادفی انتخاب کردیم

آنستکه بتوانیم به ازای این اعداد تصادفی، مقادیر  $U_i$  های (سلولهای E14 و E20) مختلف را محاسبه

کنیم.

برای ایجاد ۲۰۰ داده تصادفی، در یک صفحه گسترده دیگر به صورت جدول ۲ اقدام می‌کنیم:

جدول ۲- اطلاعات صفحه گسترده دوم

	A	B	C	D	E
		Pi(floor)(Mpa)	Pi(roof)(Mpa)	Pi(Mpa)	Ui(Cm)
1		0.24188962	0.2475294	0.24471	0.746128
2		0.064845257	0.091318589	0.078082	1.472905
3		0.029699495	0.06258776	0.046144	1.813912
4		0.308658772	0.308852621	0.308756	0.621094
5		-0.000871986	0.039083756	0.019106	2.288531
6		0.229113775	0.235898249	0.232506	0.775111
7		0.014468764	0.050648733	0.032559	2.020195
8		-0.005701501	0.035566759	0.014933	2.390817
9		0.211279078	0.219726546	0.215503	0.81904
10		0.007115397	0.045038023	0.026077	2.139507
11		0.219032343	0.226747149	0.22289	0.799414
12		0.017758804	0.053193975	0.035476	1.971416
13		-0.006099648	0.03527995	0.01459	2.399726
14		0.086122083	0.109279319	0.097701	1.323073
15		0.211142983	0.219603449	0.215373	0.819392

که در آن:

B2=Sheet1! E16

C2=Sheet1! E15

D2=Sheet1! E5

E2=Sheet! E14\*100

B3 ⇄ B101 {=TABLE (; F1)}

C3 ⇄ C101 {=TABLE (; F1)}

D3 ⇄ D101 {=TABLE (; F1)}

E3 ⇄ E101 {=TABLE (; F1)}

D102=Sheet1! E18

E102=Sheet1! E20\*100

D103 ⇄ D201 {=TABLE (; G1)}

F103 ⇄ F201 {=TABLE (; G1)}

حال کافی است که اعداد تولید شده را کپی و در یک صفحه گسترده دیگر آنها را به صورت

مقداری چسبانند. در نهایت این اعداد را بر اساس  $U_i$ ، از مقدار کم تا مقدار زیاد مرتب کرد و منحنی

(فشار سیستم نگهداری- تغییر شکل شعاعی) را برای سه سری  $(P_i - U_i)$  و  $(P_i(roof) - U_i)$  و

$(P_i(floor) - U_i)$  رسم کرد (یعنی سه سری دیواره، سقف و کف تونل).

## پیوست ۷-ب) (مراحل رسم خط سیستم نگهداری برای زون B)

پارامترهای ورودی در سلولهای B3 تا B7 و D3 تا D10 و C1 در جدول ۳ آمده اند. لازم به ذکر است که در تعیین ارزش پارامترهای مدول الاستیسیته بتن، ضریب پواسون، و مقاومت فشاری تک محوره، ارزش مقاومت نهایی پیچ سنگ و ثابت شکل پذیری راس پیچ سنگ از منبع ۱۹۱۶ استفاده شده است.

جدول ۳- اطلاعات صفحه گسترده اول

A	B	C	D
	تفسیر شکل شعاعی اولیه (سانتی متر)	0.5	
مدول الاستیسیته بتن (گیگا پاسکال)	15	طول پیچ سنگ (متر)	3
ضریب پواسون بتن	0.25	فاصله دایره محیطی پیچ سنگ (متر)	1.5
شعاع توپل (متر)	2.1	فاصله دایره طولی پیچ سنگ (متر)	1.5
ضخامت شاتکریت (متر)	0.05	قطر پیچ سنگ (متر)	0.025
مقاومت فشاری تک محوره (مگا پاسکال)	25	شعاع توپل (متر)	2.1
		مدول الاستیسیته پیچ سنگ (گیگا پاسکال)	207
		مقاومت نهایی پیچ سنگ (مگا نیوتن)	0.265
		ثابت شکل پذیری راس پیچ سنگ (متر به مگا نیوتن)	0.143
Pscm(1)	0.588151927	Psbm(2)	0.126667
K1	388.6071011	K2	5.409393
	Pi(Mpa)	0.59	
	Umax1(m)(shotcrete)	0.003176323	
	Umax2(m)(bolt)	0.049173721	
	U12	0.003144538	
	Ui(cm)	0.814453841	
	Psm12(Mpa)	FALSE	
	Psm12(Mpa)	FALSE	

فرمول پارامترهای خروجی به صورت زیر است:

$$B12=B7*(1-((B5-B6)*(B5-B6))/(B5*B5))/2$$

$$B13=(B3*1000*((B5*B5)-((B5-B6)*(B5-B6))))/((1+B4)*(((1-2*B4)*B5*B5)+(B5-B6)*(B5-B6)))$$

$$D12=D9/(D4*D5)$$

$$D13=1/((D4*D5/D7)*((4*D3)/(3.14*D6*D6*D8*1000)+D10))$$

$$C16=B5*B12/B13$$

$$C17=D7*D12/D13$$

$$C18=C15*D7/(B13+D13)$$

$$C20=IF (C18<C16; (IF (C167<C17; C1+100*(C15*D7)/(B13+D13))))$$

$$C21=IF (C18>C16; (IF (C16<C17; C16*(B13+D13)/D7)))$$

$$C22=IF (C18>C17; (IF (C17<C16; C17*(B13+D13)/D7)))$$

با تغییر هر  $P_i$  (خانه C15) از ۰ به بالا،  $U_i$  (سلول C20) محاسبه می گردد. تا اینکه با افزایش  $P_i$ ، ارزش  $U_i$  غلط (FALSE) می شود. حال به ازای هر  $(P_i, U_i)$  تولید شده رسم خط سیستم نگهداری امکان پذیر خواهد بود.

## پیوست ۸

الف) برنامه اول در نرم افزار FLAC3D- تعیین تنش و جابجایی در اطراف تونل در زون A

در شرایط کرنش صفحه‌ای و به ازای  $K=1/5$

```
New
;-----
;-----Excavation and Temporary Support for Babolak Water Conveyance Tunnel-----
;-----

Title 'Tunnel analysis in A zone in plane strain condition (K=1.5)'
;
; Define FISH function1
Define _mod_param
; density of material
dens_ =2220
; Ratio horizontal stress to vertical stress
k_ =1.5
; Define maximum overburden from tunnel until surface of earth
over_ =100
End
_mod_param
;
; Define FISH function2
Define _mod_setup
Ver_stress=-1*over_*dens_*9.81
Hor_stress=k_*ver_stress
Grad1=-1*dens_*9.81
Grad2=-1*k_*dens_*9.81
Ver_stress1=ver_stress- (20*grad1); 1= upper of model (size of model: 40*40*0.4)
End
_mod_setup
;
; Generate tunnel & surrounding rock
Gen zone radcyl size 10 1 20 20 rat 1 1 1 1.1&
Dim 2.1 2.1 group tunnel &
P0 0, 0, 0 p1 20, 0, 0 p2 0, 0, 0.4 p3 0, -20, 0
Gen point id 1 (1.8, 2, 0)
```

```

Gen point id 2 (1.8, 2, 0.4)
Gen zone radtun size 10 1 10 20 rat 1 1 1 1.1&
Dim 2.1 2.1 group tunnel&
P0 0, 0, 0 p1 0,20,0 p2 0, 0, 0.4 p3 20, 0, 0 p4 0 20 0.4 p5 20 0 0.4&
P6 20 20 0 p7 20 20 0.4 p12 point 1 p13 point 2
Gen zon reflect dip 90 dd 90 ori 0 0 0
;
; Assign Mohr-Coulomb material model
Model mohr
Prop bulk=0.52e9 shear=0.18e9 tens=0.3e6
Prop coh=0.06e6 Fri=25 di=0
;
; Assign initial stress state
Set grav 0, 9.81,0
Ini dens=dens_
Ini syy=ver_stress grad 0, grad1, 0
Ini sxx=hor_stress grad 0, grad2, 0
Ini szz=hor_stress grad 0, grad2, 0
Set large
;
; Monitor variables in model
; roof
Hist gp ydisp 0, -2.1, 0
; wall
Hist gp xdisp 2.1,0,0
Hist gp xdisp -2.1, 0, 0
; floor
Hist gp ydisp 0, 2.1,0
;
; Assign boundary conditions
Fix x range x -20.1, -19.9
Fix x range x 19.9, 20.1
Fix z range z -0.001, 0.001
Fix z range z 0.399, 0.401
Fix y range y 19.9, 20.1
; Apply stresses at far-field boundaries
Apply syy =ver_stress1 range y -20.1, -19.9
Apply sxx =hor_stress grad 0, grad2, 0 range x 19.9, 20.1
Apply sxx =hor_stress grad 0, grad2, 0 range x -20.1, -19.9

```

```
;
Solve ratio=1e-5
Save A.sav
Return
```

تعداد اجرای برنامه برای رسیدن به جواب همگرایی (به ازای نیروی نامتعادل کننده کمتر از  $10^{-5}$  نیوتن) برابر ۸۳۷۶ می باشد. ضمناً زمان لازم برای اجرای برنامه (Pentium 4, CPU=2GHz): ۸ دقیقه می باشد.

ب) برنامه دوم در نرم افزار **FLAC3D** - بررسی مدل سه بعدی قبل و پس از نصب سیستم نگهداری (پیچ سنگ با فاصله داری  $1/5$  متر در  $1/5$  متر و شاتکریت با ضخامت  $7/5$  سانتیمتر) به ازای گام پیشروی  $1/5$  متر برای زون  $A$  ( $K=1/5$ )

```
New
;
; --- Excavation and Support for Babolak Water Conveyance Tunnel ---
;
Title 'Design of Temporary Support System of Babolak Water Conveyance Tunnel for A Zone'
;
; Define FISH function1
Define _mod_param
; Density of material
dens_=2220
; Ratio horizontal stress to vertical stress
k_=1.5
; Define maximum overburden from tunnel until surface of earth
over_=100
End
_mod_param
;
; Define FISH function2
Define _mod_setup
ver_stress=-1*over_*dens_*9.81
hor_stress=k_*ver_stress
grad1=-1*dens_*9.81
grad2=-1*k_*dens_*9.81
```

```

; l=upper of model (size of model: 40*40*40)
ver_stress1=ver_stress-(20*grad1)
End
_mod_setup
;
; Generate tunnel & surrounding rock
gen zone radcyl size 10 40 20 20 rat 1 1 1 1.1 &
Dim 2.1 2.1 fill group tunnel &
p0 0, 0, 0 p1 20, 0, 0 p2 0,0,20 p3 0,-20, 0
gen point id 1 (1.8,2,0)
gen point id 2 (1.8,2,20)
gen zone radtun size 10 40 10 20 rat 1 1 1 1.1 &
Dim 2.1 2.1 fill group tunnel &
p0 0, 0, 0 p1 0,20,0 p2 0,0,20 p3 20, 0, 0 p4 0 20 20 p5 20 0 20 &
p6 20 20 0 p7 20 20 20 p12 point 1 p13 point 2
Group section1 range z 0 1.5 group tunnel
Group section2 range z 1.5 3 group tunnel
Group section3 range z 3 4.5 group tunnel
Group section4 range z 4.5 6 group tunnel
Group section5 range z 6 7.5 group tunnel
;
; Assign Mohr-Coulomb material model
Model Mohr
Prop bulk=0.52e9 shear=0.18e9
Prop coh=0.06e6 Fri=25 ten=0.3e6
;
; Assign initial stress state
Set grav 0, 9.81,0
ini dens=dens_
ini syy=ver_stress grad 0,grad1,0
ini sxx=hor_stress grad 0,grad2,0
ini szz=hor_stress grad 0,grad2,0
Set large
;
; Assign boundary conditions
Fix x range x -0.1, 0.1
Fix z range z -0.1, 0.1
Fix y range y 19.9 20.1
Apply syy =ver_stress1 range y -20.1,-19.9

```

```

Apply sxx =hor_stress grad 0, grad2, 0 range x 19.9, 20.1
Apply szz =hor_stress grad 0, grad2, 0 range z 19.9, 20.1
;
hist unbal
;
; --- Stage 1: excavate tunnel section 1
Model null range group section1
Solve; first solve (ratio=1e-5)
Save s11.sav
;
ini xdisp=0 ydisp=0 zdisp=0
;
; Monitor variables in model

; Roof
hist gp ydisp 0,-2.1,0
hist gp ydisp 0,-2.1,0.5
hist gp ydisp 0,-2.1,1
hist gp ydisp 0,-2.1,1.5
hist gp ydisp 0,-2.1,2.5

; Floor
hist gp ydisp 0,2.1,0
hist gp ydisp 0,2.1,0.5
hist gp ydisp 0,2.1,1
hist gp ydisp 0,2.1,1.5
hist gp ydisp 0,2.1,2.5

; Wall
hist gp xdisp 2.1,0,0
hist gp xdisp 2.1,0,0.5
hist gp xdisp 2.1,0,1
hist gp xdisp 2.1,0,1.5
hist gp xdisp 2.1,0,2.5

;
; --- Stage 2: excavate tunnel section 2
Model null range group section2

```

```

Save s2a1.sav
Solve; second solve (ratio=1e-5)
Save s2b1.sav
Restore s2a1.sav
;

; — Add shotcrete & Install bolt in section 1
sel shell id=1 range cyl end1 0 0 0 end2 0 0 1.51 rad 2.1 y -2.1 0.6
sel shell id=1 range cyl end1 0 0 0 end2 0 0 1.51 rad 2.18 x 0 2 y 0.55,0.9
sel shell id=1 range cyl end1 0 0 0 end2 0 0 1.51 rad 2.3 x 0 1.9 y 0.9 1.4
sel shell id=1 range cyl end1 0 0 0 end2 0 0 1.51 rad 2.4 x 1.7,1.9 y 1.4 2
sel shell id=1 range cyl end1 0 0 0 end2 0 0 1.51 rad 2.65 x 1.7 1.9 y 1.5 2
sel shell id=1 prop iso=(15e9,0.25) thick=0.075

sel cable id=2 beg 1.9 0.6 0.75 end 4.8 1.5 0.75 nseg 9
sel cable id=2 beg 1.9 -0.9 0.75 end 4.5 -2.3 0.75 nseg 9
sel cable id=2 beg 0.8 -2 0.75 end 1.8 -4.8 0.75 nseg 9
sel cable prop emod 207e9 xcare 4.91e-4 &
yten 0.285e6 gr_k 7e9 gr_co 5e5 ran id=2
Solve ratio=1e-6; third solve
Save slc1t2a175.sav
;

; — Stage 3: excavate tunnel section 3 & add shotcrete, Install bolt in section 2
Model null range group section3
sel shell id=3 range cyl end1 0 0 1.49 end2 0 0 3.01 rad 2.1 y -2.1 0.6
sel shell id=3 range cyl end1 0 0 1.49 end2 0 0 3.01 rad 2.18 x 0 2 y 0.55,0.9
sel shell id=3 range cyl end1 0 0 1.49 end2 0 0 3.01 rad 2.3 x 0 1.9 y 0.9 1.4
sel shell id=3 range cyl end1 0 0 1.49 end2 0 0 3.01 rad 2.4 x 1.7,1.9 y 1.4 2
sel shell id=3 range cyl end1 0 0 1.49 end2 0 0 3.01 rad 2.65 x 1.7 1.9 y 1.5 2
sel shell id=3 prop iso=(15e9,0.25) thick=0.075

sel cable id=4 beg 1.9 0.6 2.25 end 4.8 1.5 2.25 nseg 9
sel cable id=4 beg 1.9 -0.9 2.25 end 4.5 -2.3 2.25 nseg 9
sel cable id=4 beg 0.8 -2 2.25 end 1.8 -4.8 2.25 nseg 9
sel cable prop emod 207e9 xcare 4.91e-4 &
yten 0.285e6 gr_k 7e9 gr_co 5e5 ran id=4
Solve ratio=1e-6
Save slc1t2a1752.sav

; — Stage 4: excavate tunnel section 4 & add shotcrete, Install bolt in section 3
Model null range group section4

```

```

sel shell id=5 range cyl end1 0 0 2.99 end2 0 0 4.51 rad 2.1 y -2.1 0.6
sel shell id=5 range cyl end1 0 0 2.99 end2 0 0 4.51 rad 2.18 x 0 2 y 0.55,0.9
sel shell id=5 range cyl end1 0 0 2.99 end2 0 0 4.51 rad 2.3 x 0 1.9 y 0.9 1.4
sel shell id=5 range cyl end1 0 0 2.99 end2 0 0 4.51 rad 2.4 x 1.7,1.9 y 1.4 2
sel shell id=5 range cyl end1 0 0 2.99 end2 0 0 4.51 rad 2.65 x 1.7 1.9 y 1.5 2
sel shell id=5 prop iso=(15e9,0.25) thick=0.075

```

```

sel cable id=6 beg 1.9 0.6 3.75 end 4.8 1.5 3.75 nseg 9
sel cable id=6 beg 1.9 -0.9 3.75 end 4.5 -2.3 3.7 nseg 9
sel cable id=6 beg 0.8 -2 3.75 end 1.8 -4.8 3.75 nseg 9
sel cable prop emod 207e9 xcare 4.91e-4 &
yten 0.285e6 gr_k 7e9 gr_co 5e5 ran id=6
Solve ratio=1e-6
Save slct2a1752.sav

```

; And continue Stage 5(excavate tunnel section 5 & add shotcrete, Install bolt in section 4)

; And continue until end of excavate.

زمان و تعداد اجرای برنامه برای رسیدن به جواب همگرایی حل اول و دوم و سوم( اولین و دومین

و سومین Solve در برنامه) با کامپیوتر به مشخصات Pentium 4, CPU=2GHz مطابق جدول زیر

است( ضمناً چون این برنامه سه بعدی دارای ۴۴۰۰۰ زون می باشد نیاز به ۸۵ مگا بایت رم برای اجرا

دارد).

	زمان لازم برای حل	تعداد اجرای لازم تا رسیدن به همگرایی
Solve اولین	۵۴ دقیقه	۴۸۲۵
Solve دومین	۹۵ دقیقه	۷۷۱۳
Solve سومین	۳ ساعت	۱۰۸۲۵

ج) برنامه سوم در نرم افزار FLAC3D - تعیین جابجاییها، نیروی محوری و لنگر خمشی و ...

در تونل دایروی پس از اجرای نگهدارنده دائمی ( بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر) در زون A در

شرایط کرنش صفحه‌ای و به ازای  $K=1/5$

New

```
-----  
; --- Excavation and Support for Babolak Water Conveyance Tunnel ---  
-----  
Title 'Design of Permanent Support System of Babolak Water Conveyance Tunnel'  
;  
; Define FISH function1  
Define _mod_param  
coh_ = 1e20; no-slip case  
; coh_ = 0; full-slip case  
; Density of material  
dens_ = 2200  
; Ratio of horizontal-to-vertical stress  
k_ = 1.5  
; Define maximum overburden from tunnel until surface of earth  
over_ = 100  
End  
_mod_param  
;  
; Define FISH function2  
Define _mod_setup  
ver_stress = 1 * over_ * dens_ * 9.81  
hor_stress = k_ * ver_stress  
grad1 = 1 * dens_ * 9.81  
grad2 = 1 * k_ * dens_ * 9.81  
ver_stress1 = ver_stress + (20 * grad1); 1 = upper of model (size of model: 40*40*0.4)  
End  
_mod_setup  
;  
; Generate tunnel & surrounding rock  
gen zone radcyl size 5 1 20 20 rat 1 1 1 1.1 &  
Dim 2 2 p0 0, 0, 0 p1 20, 0, 0 p2 0, 0.4, 0 p3 0, 0, 20  
gen zon reflect dip 0 ori 0 0 0
```

```

gen zon reflect dip 90 dd 90 ori 0 0 0
;
; Assign Mohr-Coulomb material model
Model Mohr
Prop bulk=0.52e9 shear=0.18e9 tens=0.3e6
Prop coh=0.06e6 Fri=25 di=0
;
; Create the support (linerSELS).
sel liner id=1 range cyl end1 0 0 0 end2 0 0.4 0 rad 2
sel liner id=1 prop iso=(20e9,0.2) thick=0.4
sel liner id=1 prop cs_nk=2.45e11 cs_sk=2.45e11 cs_scoh=coh_
;
; Apply stresses at far-field boundaries
Set grav 0, 0,-9.81
ini dens=dens_
ini szz=ver_stress grad 0,0,grad1
ini sxx=hor_stress grad 0,0,grad2
ini syy=hor_stress grad 0,0,grad2
Apply szz =ver_stress1 range z 19.9, 20.1
Set large
;
; Assign boundary conditions
Fix x range x -20.1,-19.9
Fix x range x 19.9, 20.1
Fix z range z -20.1,-19.9
Fix y range y -0.001, 0.001
Fix y range y 0.399, 0.401
;
hist gp zdisp 0,0,2
hist gp xdisp 2,0,0
;
; For the nodes (symmetry conditions):
sel node local xdir 1 0 0 ydir 0 -1 0 range x -0.001,0.001 ; x=0 plane
sel node fix lsys range x -0.001,0.001
sel node fix x yr zr range x -0.001,0.001
sel node local xdir 0 0 -1 ydir 0 -1 0 range z -0.001,0.001 ; z=0 plane
sel node fix lsys range z -0.001,0.001
sel node fix x yr zr range z -0.001,0.001
sel node fix y xr zr range y -0.001,0.001 ; y=0 plane

```

sel node fix y xr zr range y 0.399,0.401 ; y=Ymax plane

;

;

Plot create aa

Plot set rot 0 0 0

Plot set center 1.35 -0.35 1.45

Plot set mag 3.77

Plot add sketch

Plot add disp blue scale 0.10

Plot add sel disp red scale 0.10

Plot add axes

;

Plot create bb

Plot set rot 90 135 0

Plot set center 8.854 0.55 8.81

Plot set mag 14.4

Plot add sel recover sres Ny surfx 0 1 0

Plot add sel recover sres My surfx 0 1 0 active off

Plot add sel liner coupling stress normal active off

Plot add sel liner coupling stress shear active off

Plot add axes position 0 1 0

Solve ratio=1e-6

Save general.sav

Return

تعداد اجرای برنامه برای رسیدن به جواب همگرایی ( به ازای نیروی نامتعادل کننده کمتر از

$10^{-6}$  نیوتن) برابر ۴۶۶۹ می باشد. ضمناً زمان لازم برای اجرای برنامه ( Pentium 4, CPU=2GHz ):

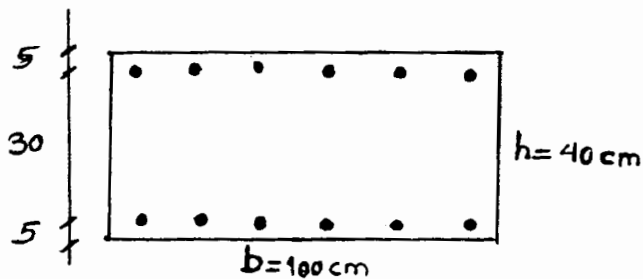
۱۴ دقیقه می باشد.

## پیوست ۹

محاسبات آرماتور مورد نیاز مسیر تونل با استفاده از منحنی‌های اثر توام نیروی محوری و

لنگر خمشی برای بتن به ضخامت ۴۰ سانتیمتر بر اساس منبع [۱۶]:

(۱) زون A



$h$  ضخامت بتن مصرفی و  $b$  طول واحد در راستای محور تونل می‌باشد.

اگر  $d$  فاصله میلگرد کششی تا آخرین تار فشاری و  $d'$  فاصله میلگرد فشاری تا آخرین تار فشاری

باشد،  $\gamma$  از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\gamma = \frac{d - d'}{h} = \frac{35 - 5}{40} = 0.75$$

با فرض مقاومت فشاری بتن برابر  $280 \frac{kg}{cm^2}$  و تنش تسلیم آرماتور (فولاد نوع III) برابر

$4200 \frac{kg}{cm^2}$  و  $\gamma = 0.75$  می‌توان از منحنی پایینی صفحه ۱۳۹ استفاده کرد و مقدار  $\rho$  را محاسبه

کرد اما اول باید مقادیر زیر را بدست آورد:

$$\phi \times M_u = M_u = 1.4 \times M = 1.4 \times 4.27e4 (N.m) = 59780 (N.m) = 5.98e5 (kg.cm)$$

$$\phi \times P_u = P_u = 1.4 \times P = 1.4 \times 4.06e6 (N) = 5.66e6 (N) = 5.66e5 (kg)$$

که در روابط بالا  $\phi$  ضریب کاهش مقاومت،  $M_u$  مقدار لنگر خمشی طراحی،  $P_u$  مقدار نیروی

محوری طراحی و  $1/4$  ضریب تشدید بار مرده است. ضمناً  $M$  و  $P$  به ترتیب مقدار لنگر خمشی و

نیروی محوری محاسبه شده از نرم‌افزار (جدول ۶-۱ صفحه ۹۱ برای زون A و به ازای  $K=1$ )

می‌باشند.

حال برای استفاده از منحنی اثر متقابل لنگر و نیروی محوری باید مقادیر ذیل را محاسبه کرد:

$$\frac{1}{70} \times \frac{\phi \times M_n}{A_g \times h} = \frac{1}{70} \times \frac{5.98e5}{100 \times 40 \times 40} = 0.05$$

$$\frac{1}{70} \times \frac{\phi \times P_n}{A_g} = \frac{1}{70} \times \frac{5.66e5}{100 \times 40} = 2.02$$

که از منحنی صفحه ۱۳۹، از دو مقدار بالا  $\rho = 0.01$  بدست می‌آید  $A_g$  مساحت خالص مقطع است).

$A_s$ ، مساحت میلگرد موجود در مقطع برابر است با:

$$A_s = \rho \times b \times d = 0.01 \times 100 \times 35 = 35 (cm^2)$$

و با فرض استفاده از میلگرد با قطر ۲۰ میلیمتر، تعداد میلگرد مصرفی برابر است با:

$$\frac{35}{\frac{\pi}{4} \times (2)^2} \cong 12$$

چون از دو ردیف آرماتور استفاده می‌شود، پس ۶ تا بالا و ۶ تا پایین در نظر گرفته می‌شود.

بنابراین فاصله میلگردها برابر است با:

$$100 \div 6 \cong 15$$

لذا جواب نهایی برابر است با:

آرماتور فشار و خمش: 2φ20@15

(منظور، از دو ردیف آرماتور به قطر ۲۰ میلیمتر و فاصله داری ۱۵ سانتیمتر استفاده گردد)

برای محاسبه آرماتور افت و حرارت از روابط زیر بهره می‌جویم:

$$A_s = 0.0018 \times b \times h' = 0.0018 \times 40 \times 100 = 7.2 (cm^2)$$

که  $A_s$  مساحت میلگرد موجود در مقطع و  $h'$  طول واحد پیرامون مقطع تونل است. با فرض

استفاده از میلگرد به قطر ۱۴ میلیمتر تعداد میلگردهای افت و حرارت برابر است با:

$$\frac{A_s}{\frac{\pi}{4}(1.4)^2} \cong 5$$

آرماتور افست و حرارت را اصولاً روی میلگرد های کششی قرار می دهند ولی برای قفل و بست بهتر و مش بندی منظم، دو ردیف ۵ تایی پیشنهاد می شود. در این حالت فواصل میلگردها برابر ۲۰ سانتیمتر می شود.

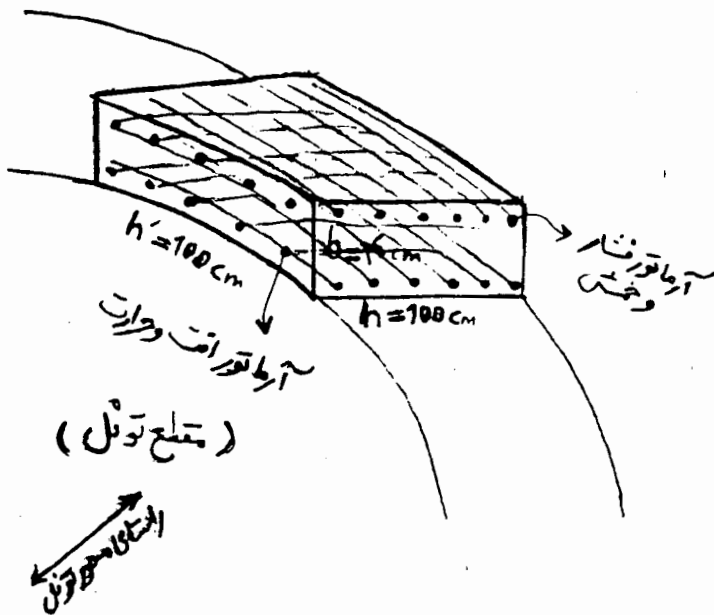
لذا جواب نهایی برابر است با:

آرماتور افست و حرارت:  $2\phi 14 @ 20$

(منظور، از دو ردیف آرماتور به قطر ۱۴ میلیمتر و فاصله داری ۲۰ سانتیمتر استفاده گردد)

لازم به ذکر است که به ازای نسبت تنش افقی به قائم برابر ۰/۱۵ ، ۰/۲۵ و ۱/۲۵ همانند حالت

$K=1$  آرماتور پیشنهادی برای مسیر تونل در زون A به صورت زیر است:



آرماتور فشار و خمشی:  $2\phi 20 @ 15$

آرماتور افست و حرارت:  $2\phi 14 @ 20$

اما برای  $K=0/25$  و  $K=1/5$  مقدار میلگرد مصرفی در مقطع محاسبه شده اندکی زیاد خواهد شد

و باید فاصله داری در آرماتور فشار و خمشی را کمتر از ۱۵ سانتیمتر در نظر گرفت.

## (۲) مقطع حداکثر روباره (K=۱)

$$M_u = 7.17e4 \times 1.4 = 9.99e4 (N.m) = 9.99e5 (kg.cm)$$

$$P_u = 6.96e6 \times 1.4 = 9.74e6 (N) = 9.74e5 (kg)$$

$$\frac{1}{70} \times \frac{9.99e5}{100 \times 40 \times 40} = 0.09$$

$$\frac{1}{70} \times \frac{9.74e5}{100 \times 40} = 3.47$$

از دو مقدار ۰/۰۹ و ۳/۴۷ بر روی منحنی پایینی صفحه ۱۳۹  $\rho = 0.02$  بدست می‌آید. پس

$A_s = 70 (cm^2)$  می‌شود و آرماتور زیر برای مقطع حداکثر روباره پیشنهاد می‌گردد:

آرماتور فشار و خمش:  $2\phi 20 @ 8$

آرماتور افت و حرارت:  $2\phi 14 @ 20$

لازم به ذکر است که به ازای نسبت تنش افقی به قائم برابر ۰/۵ ، ۰/۷۵ و ۱/۲۵ نیز همین طراحی پیشنهاد می‌گردد ولی برای  $K=0.75$  و  $K=1/5$  مقدار میلگرد مصرفی در مقطع محاسبه شده، اندکی زیاد خواهد شد و باید فاصله‌داری در آرماتور فشار و خمش را کمتر از ۸ سانتیمتر در نظر گرفت.

## (۳) زون B (K=۱)

$$M_u = 3.12e5 (kg.cm)$$

$$P_u = 3.41e5 (kg)$$

$$\frac{1}{70} \times \frac{3.12e5}{100 \times 40 \times 40} = 0.028$$

$$\frac{1}{70} \times \frac{3.41e5}{100 \times 40} = 1.21$$

از دو مقدار ۰/۰۲۸ و ۱/۲۱ بر روی منحنی پایینی صفحه ۱۳۹،  $\rho = 0.01$  بدست می‌آید. پس

$A_s = 35 (cm^2)$  می‌شود و آرماتور ذیل برای زون B پیشنهاد می‌گردد:

آرماتور فشار و خمش: 20@15

آرماتور افت و حرارت: 20@14

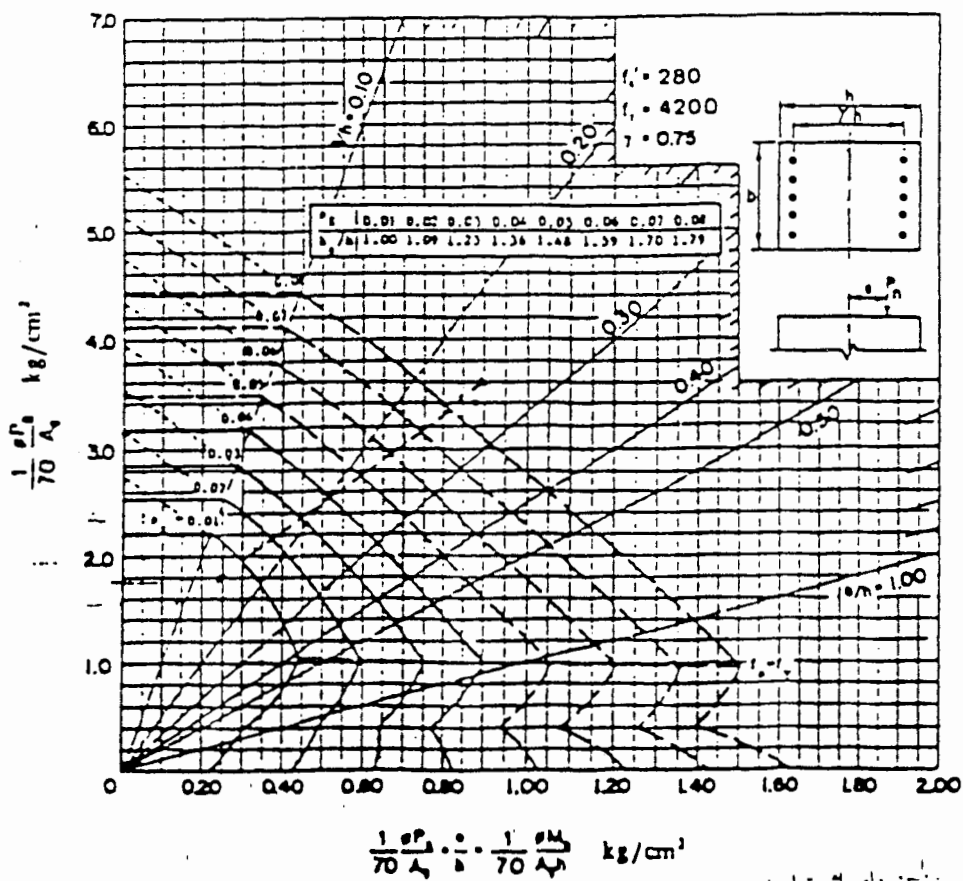
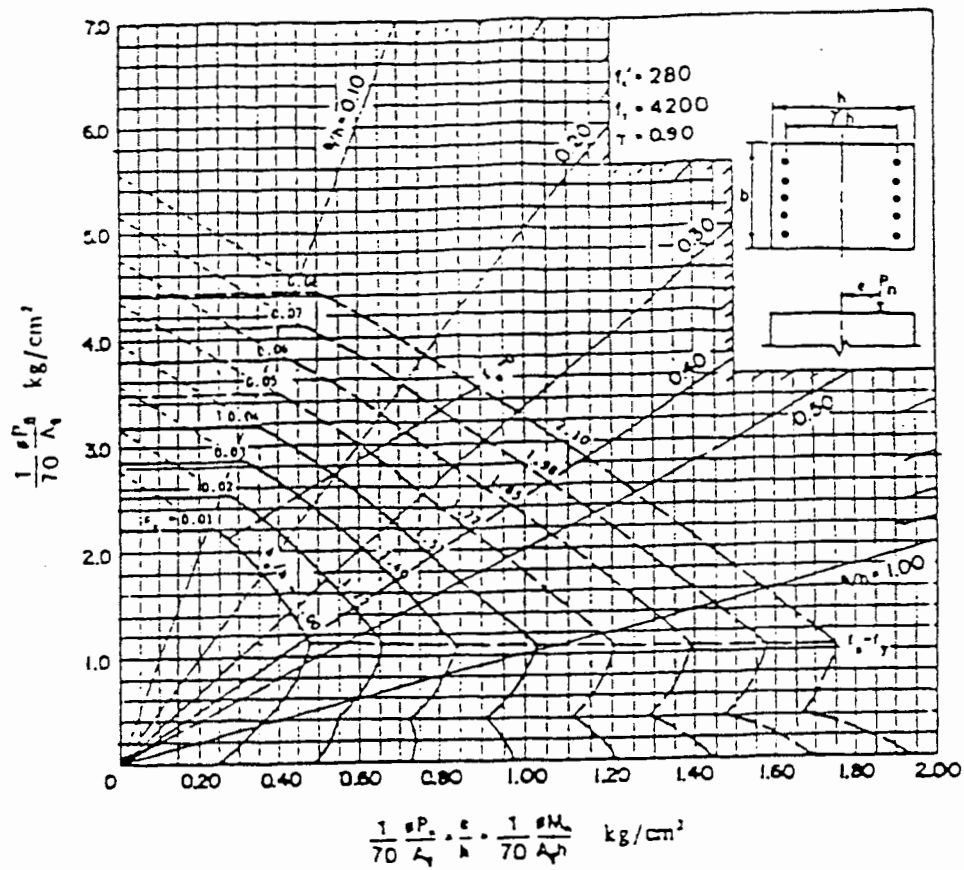
لازم به ذکر است که به ازای نسبت تنش افقی به قائم برابر ۰/۲۵، ۰/۱۵، ۰/۷۵، ۱/۲۵ و ۱/۵ نیز همین طراحی پیشنهاد می شود.

و بطور خلاصه می توان گفت که آرماتور پیشنهادی برای مسیر تونل به صورت زیر است:

آرماتور فشار و خمش: 20@15

آرماتور افت و حرارت: 20@14

که هر چه به مقطع حداکثر روباره نزدیکتر شویم، در آرماتور فشار و خمش مقدار ۱۵ سانتیمتر به ۸ سانتیمتر تقلیل می یابد.



منحنیهای اثر توأم نیروی محوری و لنگر خمشی [۱۶]

## **Abstract**

The Alborz storage dam is located on the Babol river at the distance of 40 Km from Babol city (in Mazandaran province). The Babolak water conveyance tunnel has been designed in order to transfer water from Babolak river to Alborz storage dam to supply part of the water demand.

2.6 Km of length and 4.2 m of diameter are the main characteristics of this tunnel. With taking into account the permanent support system, final shape of the section will be circular. As the tunnel is being driven in marlstone, designing of tunnel support system in such situations have been considered in this research work.

In order to analyze the stability of the tunnel and design proper support system, three methods have been used namely: empirical (Q and RMR classification system), analytical (rock-support interaction) and numerical (FLAC3D software). Base on the results, a combination of shotcrete and rock bolt for the temporary support and a 40 cm thick reinforced concrete for the permanent support have been recommended.



Shahrood University of Technology

**Design of the Tunnel Support System in Marls  
Case Study: Babolak Water Conveyance Tunnel  
(Alborz Storage Dam)**

Thesis submitted in fulfillment of the degree of master of  
engineering in mining exploitation

By:

**S. Poormehdi**

Supervisor:

**Dr. S. R. Torabi**

Consultant:

**S. M. E. Jalali**

(April 2005)