

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل پایداری تونل‌های کم عمق با استفاده از نتایج
رفتارسنجی - مطالعه موردی تونل‌های دو قلوئی قطعه اول
جنوبی متروی اصفهان

دانشجو:

فرشاسب جمشاسب

استاد راهنما :

دکتر سید رحمان ترابی

دکتر محمد حسین صدقیانی

استاد مشاور:

مهندس فرزاد حبیب بیگی

تابستان ۱۳۸۵

تقدیم :

به روح پدر مهربانم و مادر عزیزم

که با تشویق، دلگرمی‌ها و سعه صدر خویش رنج حاصل از کار
طولانی مدت و دور بودن از کانون گرم خانواده را بر من هموار کردند.

تشکر و قدردانی:

سپاس یزدان پاک را که قلم را آفرید و به آن سوگند یاد فرمود. حق تعالی را بسی شکر گذاریم که توفیقمان داد تا در وادی بزرگترین معرفت بشری - علم - گامی هر چند ناچیز برداریم و در این مسیر از محضر انسانهایی عارف و عاشق پیشه فیض بریم که تمام زندگی خویش را عاشقانه صرف علم نموده‌اند.

برخود لازم می‌دانم از زحمات اساتید بزرگوام جناب آقایان دکتر سید رحمان ترابی و دکتر محمد حسین صدقیانی که مسئولیت راهنمایی پایان‌نامه را به عهده داشتند و در طول اجرای این پژوهش با دانش و بینش عمیق خویش، بنده را یاری نمودند قدردانی کنم و معترف باشم که ایشان با صبر، معنویت و خلوصشان، مرا تحمل نمودند.

جا دارد از آقای مهندس فرزاد حبیب بیگی نیز کمال قدردانی و تشکر را بعمل آورم که در همه مراحل کار صمیمانه مرا یاری نمودند.

از جناب آقای دکتر کاکائی ریاست محترم دانشکده معدن و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود تشکر می‌کنم که با حمایت‌های همه جانبه خویش موجبات دلگرمی بیشتر اینجانب را برای ادامه کار فراهم نمودند.

از اساتید محترم جناب آقایان دکتر سرشکی و دکتر عطایی که علی‌رغم مشغله‌های فراوان خویش، زحمت داوری پایان‌نامه را قبول کردند کمال تشکر را دارم. همچنین از آقای مهندس نادر زیاری مسئول سایت کارشناسی ارشد دانشکده معدن و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود بخاطر زحماتشان متشکرم. و در پایان لازم می‌دانم از آقایان مهندس مسعود عزیز صابری، مهندس بهشاد جدیری و آقای مهندس علی تبریزی مراتب سپاسگزاری خود را ابراز نمایم.

چکیده

اصفهان یکی از شهرهای مهم در زمینه‌های ارتباطات و تجارت در مرکز ایران می‌باشد. با توجه به رشد تعداد وسایل نقلیه و کهنولت و فرسودگی ناوگان حمل و نقل مسافربری در شهر اصفهان و برای کاهش ترافیک و بهبود آن مخصوصاً در مسیرهای اصلی و مهم، احداث مترو برای چنین کلان‌شهری ضروری می‌باشد. در این پایان‌نامه تحلیل پایداری تونل‌های قطار شهری اصفهان در قطعه جنوبی بطول ۳۸۷۵ متر از میدان آزادی تا ترمینال صفا انجام شده است. قطار شهری اصفهان به صورت دو تونل موازی و مجزا پیش‌بینی شده که یکی برای رفت و دیگری برای برگشت قطارها استفاده خواهد شد. تحلیل پایداری پس از انتخاب بحرانی‌ترین مقاطع بر پایه پروفیل زمین‌شناسی موجود در مسیر مترو و محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی سازندهای تشکیل دهنده مسیر مترو، به روش عددی و به کمک نرم‌افزار Plaxis 2D Version 7.2 انجام شده است. برای کنترل پارامترهای ژئومکانیکی ورودی به نرم افزار، آنالیز برگشتی بر روی نتایج جابجایی‌های بدست آمده از نصب ابزار دقیق و رفتارسنجی و در نهایت جابجایی‌های بدست آمده توسط نرم‌افزار با داده‌های ابزار دقیق کنترل شده است. همچنین به منظور کنترل پایداری گوه‌ها در مسیر مترو پس از محاسبه چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی درزه‌های سطوح لغزش با استفاده از روش Barton & Bandis در نرم‌افزار RocData، تحلیل جداگانه‌ای به کمک نرم افزار Unwedge صورت گرفته است و در نهایت سیستم نگهدارنده مناسب شامل قاب مشبک فولادی به همراه شاتکریت پیشنهاد شده است.

فصل اول : کلیات

- ۱-۱- مقدمه..... ۲
- ۲-۱- خلاصه‌ای از طرح قطار شهری اصفهان..... ۳
- ۳-۱- مروری بر کارهای انجام شده و اطلاعات موجود..... ۵
- ۴-۱- اهداف پایان‌نامه..... ۸
- ۵-۱- سازماندهی پایان‌نامه..... ۹

فصل دوم : زمین شناسی مهندسی محدوده حفاری و بخش‌بندی مسیر تونل‌های قطار شهری اصفهان

- ۱-۲- مقدمه..... ۱۳
- ۲-۲- ملاحظات زمین شناسی مهندسی..... ۱۳
- ۱-۲-۲- سازندهای سنگی..... ۱۳
- ۲-۲-۲- سازندهای آبرفتی..... ۱۳
- ۳-۲- زمین شناسی مهندسی محدوده پروژه..... ۱۴
- ۴-۲- سازه‌های عمرانی - صنعتی در محدوده تونل‌ها..... ۱۵
- ۵-۲- زمین شناسی محدوده خط مترو..... ۱۵
- ۶-۲- زمین شناسی توده‌سنگ میزبان در ایستگاههای مترو (میدان آزادی - صفه) و ژئوتکنیک طرح..... ۱۶
- ۷-۲- نتیجه‌گیری..... ۱۹

فصل سوم : وضعیت درزه‌ها و آزمایش‌های ژئوتکنیکی

- ۱-۳- مقدمه..... ۲۱
- ۲-۳- وضعیت درزه‌ها در سینه‌کارها..... ۲۱

- ۳-۳- آزمايش‌هاى ژئوتكنيكي انجام شده روى مغزه‌ها و نتيجه آنها..... ۲۲
- ۳-۳-۱- مقاومت فشارى تك محورى و انديس بار تك نقطه‌اى واحدهاى سنگى..... ۲۳
- ۳-۳-۲- برآورد مقدار ضريب هم ارزى (I_s و σ_{ci})..... ۲۶
- ۳-۴- آزمايش‌هاى سه محورى..... ۲۸
- ۳-۵- آزمايش‌هاى برش مستقيم..... ۳۰
- ۳-۶- آزمايش‌هاى مقاومت كشى (آزمايش برزيلي)..... ۳۳
- ۳-۷- آزمايش‌هاى دوام..... ۳۴
- ۳-۸- آزمايش‌هاى آماس پذيرى سنگ‌ها..... ۳۴
- ۳-۹- آزمايش‌هاى فيزيكى..... ۳۶

فصل چهارم : پارامترهاى ژئومكانيكى و رده بندى مهندسى توده سنگهاى مسير تونل

- ۴-۱- مقدمه..... ۳۹
- ۴-۲- رده‌بندى مهندسى با روش پيشنهادهى بنياوسكى..... ۴۰
- ۴-۳- روش پيشنهادهى هوک و براون..... ۴۲
- ۴-۴- رده‌بندى مهندسى توده سنگ‌ها در فاصلهً ميان ايستگاه آزادى و صفه..... ۴۳
- ۴-۴-۱- فاصلهً آزادى - دانشگاه..... ۴۳
- ۴-۴-۲- دانشگاه - کارگر..... ۴۳
- ۴-۴-۳- کارگر - خوابگاه..... ۴۳
- ۴-۴-۴- خوابگاه - صفه..... ۴۴
- ۴-۵- نتيجهً كلى رده‌بندى مهندسى توده سنگ‌ها و خاك‌ها..... ۴۴
- ۴-۶- برآورد پارامترهاى ژئومكانيكى توده سنگ‌هاى ميزبان سازه‌هاى مترو
- با استفاده از روش برآورد RMR و GSI..... ۴۴
- ۴-۶-۱- روابط مورد نياز براى برآورد پارامترهاى ژئومكانيكى با روش RMR..... ۴۵
- ۴-۶-۲- روابط مورد نياز براى برآورد پارامترهاى ژئومكانيكى با روش GSI..... ۴۵

- ۴-۶-۳- مقایسه و انتخاب پارامترها برای طراحی..... ۴۶
- ۴-۶-۴- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های فاصله ایستگاه آزادی - صفه ۴۷
- ۴-۶-۵- پارامترهای ژئومکانیکی واحد (sh)..... ۴۷
- ۴-۶-۶- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ (ss) ماسه سنگ‌های سخت تر ۴۹
- ۴-۶-۷- ماسه سنگ شکننده (sf)..... ۵۱
- ۴-۶-۸- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های ترکیبی..... ۵۳

فصل پنجم : روش‌های تحلیل پایداری تونل‌ها

- ۵-۱- مقدمه..... ۵۶
- ۵-۲- روش‌های تجربی..... ۵۶
- ۵-۳- روش‌های مشاهده‌ای..... ۵۸
- ۵-۳-۱- خصوصیات کلی سیستم‌های مشاهده..... ۶۱
- ۵-۳-۲- همگرایی سنجی..... ۶۲
- ۵-۳-۱-۲- پین همگرایی سنجی..... ۶۲
- ۵-۳-۲-۲- متر همگرایی سنجی..... ۶۳
- ۵-۳-۳- کشیدگی سنج..... ۶۷
- ۵-۳-۴- نشست سنج..... ۷۱
- ۵-۴- روش‌های تحلیلی..... ۷۳
- ۵-۴-۱- روش المان محدود..... ۷۵
- ۵-۴-۲- روش المان مرزی..... ۷۶

فصل ششم : نصب ابزار دقیق و رفتار سنجی تونل‌های قطار شهری اصفهان - قطعه جنوبی

- ۶-۱- مقدمه..... ۷۸
- ۶-۲- اهداف و فواید رفتار سنجی..... ۷۹
- ۶-۳- ویژگی‌های یک طرح ابزاربندی مناسب..... ۸۰

- ۴-۶-۸۱.....انواع روش‌های اندازه‌گیری در تونل
- ۴-۶-۸۱.....اندازه‌گیری همگرایی با همگرایی سنج
- ۴-۶-۸۳.....نشست سنج سطحی زمین
- ۴-۶-۸۴.....رفتارنگاری تونل‌های متروی دوقلوی اصفهان
- ۴-۶-۸۵.....ایستگاه‌های همگرایی سنجی در تونل غربی
- ۴-۶-۸۵.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱
- ۴-۶-۸۶.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-A۱
- ۴-۶-۸۷.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۲
- ۴-۶-۸۸.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۳
- ۴-۶-۸۹.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۴
- ۴-۶-۸۹.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۵
- ۴-۶-۹۱.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۶
- ۴-۶-۹۲.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۷
- ۴-۶-۹۳.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۸
- ۴-۶-۹۴.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۹
- ۴-۶-۹۶.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱۰
- ۴-۶-۹۷.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱۱
- ۴-۶-۹۸.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱۲
- ۴-۶-۹۹.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱۳
- ۴-۶-۱۰۱.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱۴
- ۴-۶-۱۰۲.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱۵
- ۴-۶-۱۰۳.....ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱۶
- ۴-۶-۱۰۴.....ایستگاه‌های همگرایی سنجی در تونل شرقی

- ۱۰۴.....۱-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج ۱-CE.....
- ۱۰۴.....۲-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنجی ۲-CE.....
- ۱۰۵.....۳-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنجی ۳-CE.....
- ۱۰۵.....۴-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج ۴-CE.....
- ۱۰۶.....۵-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج ۵-CE.....
- ۱۰۶.....۶-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج ۶-CE.....
- ۱۰۷.....۷-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج ۷-CE.....
- ۱۰۷.....۸-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج ۸-CE.....
- ۱۰۸.....۹-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج ۹-CE.....
- ۱۰۸.....۱۰-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج ۱۰-CE.....
- ۱۰۸.....۱۱-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج ۱۱-CE.....
- ۱۰۹.....۱۲-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج ۱۲-CE.....
- ۱۰۹.....۱۳-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج ۱۳-CE.....
- ۱۱۰.....۱۴-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج ۱۴-CE.....
- ۱۱۱.....۸-۶- ایستگاه‌های نشت سنج سطحی در تونل غربی.....
- ۱۱۱.....۱-۸-۶- ایستگاه نشست سطحی (SM-W۱).....
- ۱۱۱.....۲-۸-۶- ایستگاه نشست سطحی (SM-W۲).....
- ۱۱۲.....۳-۸-۶- ایستگاه نشست سطحی (SM-W۳).....
- ۱۱۲.....۴-۸-۶- ایستگاه نشست سطحی (SM-W۴).....
- ۱۱۲.....۵-۸-۶- ایستگاه نشست سطحی (SM-W۵).....
- ۱۱۳.....۶-۸-۶- ایستگاه نشست سطحی (SM-W۶).....
- ۱۱۳.....۷-۸-۶- ایستگاه نشست سطحی (SM-W۷).....
- ۱۱۳.....۹-۶- ایستگاه‌های نشست سطحی در تونل شرقی.....

۱۱۳.....۱-۹-۶- ایستگاه نشست سنج سطحی (SM-E1).....

فصل هفتم: آنالیز پایداری تونل‌های متروی دوقلوی اصفهان با استفاده از روش‌های عددی و تجربی

- ۱-۷- مقدمه..... ۱۱۵
- ۲-۷- روش جدید تونل‌زنی اتریشی NATM..... ۱۱۶
- ۳-۷- معیارها و الگوهای مورد استفاده..... ۱۱۷
- ۴-۷- سیستم‌های نگهدارنده اولیه..... ۱۱۸
- ۱-۴-۷- بتن پاشی..... ۱۱۹
- ۲-۴-۷- شبکه تور فولادی..... ۱۱۹
- ۳-۴-۷- قاب مشبک فولادی..... ۱۱۹
- ۴-۴-۷- قاب فولادی..... ۱۲۰
- ۵-۷- طراحی سیستم نگهدارنده اولیه به روش‌های تجربی..... ۱۲۰
- ۱-۵-۷- زمان خود ایستایی..... ۱۲۱
- ۲-۵-۷- تعیین فشار یا تنش روی سیستم نگهدارنده..... ۱۲۲
- ۱-۲-۵-۷- روش ترزاقی..... ۱۲۲
- ۲-۲-۵-۷- روش اصلاح شده ترزاقی توسط دیر و همکاران..... ۱۲۳
- ۳-۲-۵-۷- روش Q..... ۱۲۴
- ۳-۵-۷- تعیین سیستم نگهدارنده اولیه..... ۱۲۶
- ۱-۳-۵-۷- روش ترزاقی..... ۱۲۶
- ۲-۳-۵-۷- روش RMR - بنیادسکی ۱۹۷۶ و ۱۹۸۴..... ۱۲۶
- ۳-۳-۵-۷- روش Q ۱۹۷۴ و ۱۹۹۳..... ۱۲۷
- ۶-۷- مبانی مدلسازی و تحلیل پایداری..... ۱۲۸
- ۱-۶-۷- مقدمه..... ۱۲۸

- ۱۲۸..... هندسه تونل..... ۲-۶-۷
- ۱۳۰..... معیارهای تحلیل و طراحی سیستم نگهدارنده اولیه..... ۳-۶-۷
- ۱۳۲..... روش تعیین منحنی‌های اندرکنش توده سنگ میزبان..... ۱-۳-۶-۷
- ۱۳۲..... خصوصیات مدل به کار رفته در تحلیل‌ها..... ۴-۶-۷
- ۱۳۳..... خصوصیات هندسی مدل..... ۱-۴-۶-۷
- ۱۳۳..... مدل رفتاری توده سنگ و خاک..... ۲-۴-۶-۷
- ۱۳۴..... بارگذاری ترافیکی..... ۳-۴-۶-۷
- ۱۳۵..... تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهدارنده اولیه..... ۷-۷
- ۱۳۵..... مقدمه..... ۱-۷-۷
- ۱۳۵..... تحلیل سیستم نگهدارنده اولیه تونل در توده سنگ Jssh..... ۲-۷-۷
- ۱۵۴..... طراحی سیستم نگهدارنده اولیه تونل در توده سنگ Jssh..... ۳-۷-۷
- ۱۵۴..... شرایط کار..... ۱-۳-۷-۷
- ۱۵۴..... طراحی قاب مشبک فلزی بلافاصله پس از حفاری..... ۲-۳-۷-۷
- ۱۵۴..... و نصب قاب کوتاه مدت.....
- ۱۵۷..... طراحی شاکریت در بلند مدت پس از کسب مقاومت شاکریت..... ۳-۳-۷-۷
- ۱۶۱..... کنترل نشست..... ۸-۷
- ۱۶۲..... نشست کلی..... ۱-۸-۷
- ۱۶۲..... نشست نسبی..... ۲-۸-۷
- ۱۶۳..... ارزیابی پایداری تونل با روش کرنش بحرانی..... ۹-۷
- ۱۶۳..... مقدمه..... ۱-۹-۷
- ۱۶۴..... مفهوم کرنش بحرانی..... ۲-۹-۷
- ۱۶۵..... رابطه بین مدول الاستیسیته و کرنش بحرانی..... ۳-۹-۷
- ۱۶۶..... کرنش برشی بحرانی..... ۴-۹-۷

۱۷۰-۱۰- کنترل نتایج خروجی نرم افزار به کمک نتایج ابزار دقیق..... ۱۷۰

**فصل هشتم : کنترل پایداری بلوک های ایجاد شده در تونلهای قطار شهری اصفهان
(حد فاصل ایستگاه آزادی - صفه)**

۱۷۲-۱-۸- مقدمه..... ۱۷۲

۱۷۲-۲-۸- وضعیت بلوک ها در تونل مترو اصفهان..... ۱۷۲

۱۷۴-۳-۸- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سطوح درزه ها..... ۱۷۴

۱۷۴-۴-۸- کنترل پایداری بلوک های ایجاد شده در دیواره های

تونل های قطار شهری اصفهان..... ۱۷۶

۱۷۶-۵-۸- کنترل پایداری بلوک های ایجاد شده در سینه کار

تونل های قطار شهری اصفهان..... ۱۸۱

فصل نهم : تحلیل برگشتی داده های همگرایی سنجی تونل های متروی دوقلوی اصفهان

۱۸۵-۱-۹- مقدمه..... ۱۸۵

۱۸۵-۲-۹- مقایسه روش های آنالیز برگشتی با آنالیز عادی..... ۱۸۵

۱۸۷-۳-۹- روش های آنالیز برگشتی..... ۱۸۷

۱۸۷-۴-۹- تحلیل برگشتی داده های همگرایی سنجی

تونل های متروی دوقلوی اصفهان..... ۱۹۲

۱۹۲-۵-۹- آنالیز حساسیت پارامترهای ژئومکانیکی در نتایج تحلیل برگشتی..... ۱۹۳

۱۹۳-۶-۹- تحلیل برگشتی داده های همگرایی سنجی..... ۱۹۴

فصل دهم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۹۷-۱-۱۰- نتیجه گیری..... ۱۹۷

۲۰۱-۲-۱۰- پیشنهادات..... ۲۰۱

۲۰۲- فهرست منابع..... ۲۰۲

پیوست : نمودارهای همگرایی بر حسب زمان در قطعۀ جنوبی

قطار شهری اصفهان حدفاصل (ایستگاه آزادی-صفه)..... ۲۰۶

فصل اول : کلیات

- شکل ۱-۱- شبکه قطار شهری اصفهان..... ۴
- شکل ۲-۱- تقسیم‌بندی خط شماره یک متروی اصفهان به قطعه شمالی، میانی و جنوبی..... ۶
- شکل ۳-۱- نمایی از Road header..... ۷
- شکل ۴-۱- نمایی از Road header واقع در شفت میدان آزادی..... ۷
- شکل ۵-۱- نمایی از Road header..... ۸
- شکل ۶-۱- سازماندهی پایان‌نامه..... ۱۱

فصل پنجم : روش‌های تحلیل پایداری تونل‌ها

- شکل ۱-۵- پارامترهای به کار رفته در شاخص توده سنگ RMi..... ۵۸
- شکل ۲-۵- نمایی از انواع پین‌های همگرایی سنجی..... ۶۳
- شکل ۳-۵- طرح شماتیک متر نواری..... ۶۳
- شکل ۴-۵- متر نواری با نشانگر تنظیم کشش ساخت شرکت Slopeindicator..... ۶۴
- شکل ۵-۵- شمایی از متر سیمی..... ۶۵
- شکل ۶-۵- شمایی از سیستم متر، میله و لوله..... ۶۵
- شکل ۷-۵- انواع مقاطع همگرایی سنج در فضاهای زیرزمینی..... ۶۶
- شکل ۸-۵- شمایی از کشیدگی سنج لغزنده..... ۶۸
- شکل ۹-۵- شمایی از کشیدگی سنج لغزنده ساخت شرکت Sisgeo..... ۶۸
- شکل ۱۰-۵- طرح شماتیک اصول عملکرد کشیدگی سنج ثابت درون گمانه‌ای..... ۷۰
- شکل ۱۱-۵- شمایی از نشست سنج صفحه‌ای..... ۷۲
- شکل ۱۲-۵- نشست سنج کاوه‌دار ساخت شرکت Interfels..... ۷۳
- شکل ۱۳-۵- شمایی از نشست سنج مدل ۴۶۵..... ۷۳

فصل ششم : نصب ابزار دقیق و رفتار سنجی تونل‌های قطار شهری اصفهان – قطعه جنوبی

- شکل ۶-۱- اجزای دستگاه و نحوه نصب دستگاه همگرایی سنج و روش استفاده از آن ۸۲
- شکل ۶-۲- نحوه قرائت همگرایی سنج ۸۳
- شکل ۶-۳- طرح شماتیک ایستگاه همگرایی سنج ۵ نقطه‌ای ۸۴
- شکل ۶-۴- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱ همگرایی سنج ۸۵
- شکل ۶-۵- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-A۱ همگرایی سنج ۸۶
- شکل ۶-۶- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۲ همگرایی سنج ۸۷
- شکل ۶-۷- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۳ همگرایی سنج ۸۸

فصل هفتم : آنالیز پایداری تونل‌های متروی دوقلوی اصفهان با استفاده از روش‌های عددی و تجربی

- شکل ۷-۱- واکنش سیستم نگهدارنده برای تخمین پایداری در نتیجه جابجایی دیواره تونل ۱۱۷
- شکل ۷-۲- نمودار زمان خودایستایی تونل ۱۲۱
- شکل ۷-۳- نمودار طراحی سیستم نگهدارنده اولیه با روش Q – گریمستاد ۱۲۷
- شکل ۷-۴- مقطع نمونه تونل ۱۲۹
- شکل ۷-۵- الگوی جابجایی در سقف و کف تونل در حال پیشروی ۱۳۱
- شکل ۷-۶- نمونه ای از مش بندی مورد استفاده در تحلیل‌ها ۱۳۴
- شکل ۷-۷- بزرگنمایی مقطع در اطراف تونل ۱۳۴
- شکل ۷-۸- مدل کامپیوتری تونل و شبکه المان‌های محدود ۱۳۷
- شکل ۷-۹- نمایش دهنده GRC در توده سنگ Jssh در تاج تونل ۱۳۸
- شکل ۷-۱۰- نمایش دهنده GRC در توده سنگ Jssh در دیواره تونل ۱۳۸
- شکل ۷-۱۱- تغییر مکان‌های افقی توده سنگ Jssh در حفاری بخش فوقانی قبل از نصب پوشش در پایان فاز ۱ ۱۴۱

- شکل ۷-۱۲- تغییر مکان‌های قائم توده سنگ Jssh در حفاری بخش فوقانی
قبل از نصب پوشش در پایان فاز ۱..... ۱۴۲
- شکل ۷-۱۳- تنش برشی نسبی توده سنگ Jssh در حفاری بخش فوقانی
قبل از نصب پوشش در پایان فاز ۱..... ۱۴۲
- شکل ۷-۱۴- تغییر مکان‌های افقی توده سنگ Jssh پس از نصب پوشش و پیشروی
جبهه حفاری در بخش فوقانی در پایان فاز ۲..... ۱۴۴
- شکل ۷-۱۵- تغییر مکان‌های قائم توده سنگ Jssh در پایان فاز ۲..... ۱۴۴
- شکل ۷-۱۶- تنش برشی نسبی در توده سنگ Jssh در پایان فاز ۲..... ۱۴۵
- شکل ۷-۱۷- ناحیه خمیری در توده سنگ Jssh در پایان فاز ۲..... ۱۴۵
- شکل ۷-۱۸- تغییر مکان‌های افقی توده سنگ Jssh در پایان فاز ۳..... ۱۴۶
- شکل ۷-۱۹- تغییر مکان‌های قائم توده سنگ Jssh در پایان فاز ۳..... ۱۴۶
- شکل ۷-۲۰- منحنی اندرکنش زمین تاج تونل در اثر حفاری تونل دوم در توده سنگ Jssh..... ۱۴۷
- شکل ۷-۲۱- منحنی اندرکنش زمین دیواره تونل در اثر حفاری تونل دوم در توده سنگ Jssh..... ۱۴۸
- شکل ۷-۲۲- تغییر مکان‌های افقی توده سنگ Jssh در پایان فاز ۴..... ۱۴۹
- شکل ۷-۲۳- تغییر مکان‌های قائم توده سنگ Jssh در پایان فاز ۴..... ۱۵۰
- شکل ۷-۲۴- تنش برشی نسبی توده سنگ Jssh در پایان فاز ۴..... ۱۵۰
- شکل ۷-۲۵- تغییر مکان افقی توده سنگ Jssh در پایان فاز ۵..... ۱۵۱
- شکل ۷-۲۶- تغییر مکان عمودی توده سنگ Jssh در پایان فاز ۵..... ۱۵۱
- شکل ۷-۲۷- ناحیه خمیری اطراف تونل دوم در توده سنگ Jssh در پایان فاز ۵..... ۱۵۲
- شکل ۷-۲۸- تغییر مکان‌های افقی توده سنگ Jssh در پایان فاز ۶..... ۱۵۲
- شکل ۷-۲۹- تغییر مکان‌های قائم توده سنگ Jssh در پایان فاز ۶..... ۱۵۳
- شکل ۷-۳۰- ناحیه خمیری در توده سنگ Jssh در پایان فاز ۶..... ۱۵۳
- شکل ۷-۳۱- نمونه‌ای از قاب مشبک فلزی ساخت شرکت Atracquip..... ۱۵۵
- شکل ۷-۳۲- نمونه‌ای از مقطع قاب مشبک فلزی..... ۱۵۵

- شکل ۳۳-۷- بیشینه نیروی محوری در مقطع تونل وارد بر قاب در توده سنگ Jssh
 بلافاصله پس از حفاری ۱۵۶
- شکل ۳۴-۷- بیشینه نیروی برشی وارد بر قاب در مقطع تونل در توده سنگ Jssh
 بلافاصله پس از حفاری ۱۵۶
- شکل ۳۵-۷- بیشینه لنگر خمشی وارد بر قاب در مقطع تونل در توده سنگ Jssh
 بلافاصله پس از حفاری ۱۵۷
- شکل ۳۶-۷- نیروی محوری وارد بر سیستم نگهدارنده اولیه
 در پایان فاز پنجم تحلیل توده سنگ Jssh ۱۵۸
- شکل ۳۷-۷- لنگر خمشی وارد بر سیستم نگهدارنده اولیه
 در پایان فاز پنجم تحلیل توده سنگ Jssh ۱۵۸
- شکل ۳۸-۷- نیروی برشی سیستم نگهدارنده اولیه در پایان فاز پنجم تحلیل توده سنگ Jssh ۱۵۸
- شکل ۳۹-۷- نیروی محوری سیستم نگهدارنده اولیه در پایان فاز ششم تحلیل توده سنگ Jssh ۱۵۹
- شکل ۴۰-۷- لنگر خمشی سیستم نگهدارنده اولیه در پایان فاز ششم تحلیل توده سنگ Jssh ۱۵۹
- شکل ۴۱-۷- نیروی برشی سیستم نگهدارنده اولیه در پایان فاز ششم تحلیل توده سنگ Jssh ۱۵۹
- شکل ۴۲-۷- تغییر شکل قائم ایجاد شده در سطح زمین در توده سنگ Jssh ۱۶۲
- شکل ۴۳-۷- میزان نشست نسبی مجاز ۱۶۳
- شکل ۴۴-۷- رابطه بین کرنش بحرانی و مدول الاستیسیته ۱۶۵
- شکل ۴۵-۷- تغییرات نرخ همگرایی بر حسب فاصله از سینه کار ۱۶۷
- شکل ۴۶-۷- میزان کرنش در پایان مراحل حفاری و نصب پوشش در توده سنگ Jssh ۱۶۸
- شکل ۴۶-۷- کرنش برشی در پایان مراحل حفاری و نصب پوشش در توده سنگ Jssh ۱۶۹
- شکل ۴۷-۷- تغییر شکل قائم ایجاد شده در توده سنگ Jssh پس از پایان حفاری و نصب پوشش .. ۱۶۹

شکل ۸-۱۵- گسیختگی‌های ساختاری محتمل در سینه کار با در نظر گرفتن

۱۸۲.....سه دسته درزه J1J3B.....

شکل ۸-۱۶- گسیختگی‌های ساختاری محتمل در سینه کار تونل با در نظر گرفتن

۱۸۳.....سه دسته درزه J2J3B.....

فصل نهم : تحلیل برگشتی داده‌های همگرایی سنجی تونل‌های متروی دوقلوی اصفهان

شکل ۹-۱- مقایسه بین آنالیز عادی و آنالیز برگشتی..... ۱۹۱

شکل ۹-۲- نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی f، چسبندگی c

و مدول الاستیسته E، بر روی جابجایی..... ۱۹۸

پیوست

شکل الف-۱- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۴ همگرایی سنج..... ۲۰۸

شکل الف-۲- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۵ همگرایی سنج..... ۲۰۸

شکل الف-۳- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۵ همگرایی سنج پنج نقطه‌ای..... ۲۰۹

شکل الف-۴- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۶ همگرایی سنج..... ۲۰۹

شکل الف-۵- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۶ همگرایی سنج پنج نقطه‌ای..... ۲۱۰

شکل الف-۶- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۷ همگرایی سنج..... ۲۱۰

شکل الف-۷- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۷ همگرایی سنج پنج نقطه‌ای..... ۲۱۱

شکل الف-۸- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۸ همگرایی سنج..... ۲۱۱

شکل الف-۹- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۸ همگرایی سنج پنج نقطه‌ای..... ۲۱۲

شکل الف-۱۰- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۹ همگرایی سنج..... ۲۱۲

شکل الف-۱۱- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۰ همگرایی سنج..... ۲۱۳

شکل الف-۱۲- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۰ همگرایی سنج پنج نقطه‌ای..... ۲۱۳

شکل الف-۱۳- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۱ همگرایی سنج..... ۲۱۴

شکل الف-۱۴- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۱ همگرایی سنج پنج نقطه‌ای..... ۲۱۴

شکل الف-۱۵- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۲ همگرایی سنج..... ۲۱۵

- شکل الف-۱۶- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۲- CW همگرایی سنج پنج نقطه‌ای ۲۱۵
- شکل الف-۱۷- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۳- CW همگرایی سنج ۲۱۶
- شکل الف-۱۸- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۴- CW همگرایی سنج ۲۱۶
- شکل الف-۱۹- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۵- CW همگرایی سنج ۲۱۷
- شکل الف-۲۰- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۶- CW همگرایی سنج ۲۱۷
- شکل الف-۲۱- نمودار همگرایی بر حسب فاصله جبهه-کار از ایستگاه همگرایی سنجی ۱۶- CW ۲۱۸
- شکل الف-۲۲- نمودار فاصله ایستگاه همگرایی سنجی ۱۶- CW از جبهه کار بر حسب زمان ۲۱۸
- شکل الف-۲۳- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۶- CW همگرایی سنج پنج نقطه‌ای ۲۱۹
- شکل الف-۲۴- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱- CE همگرایی سنج ۲۱۹
- شکل الف-۲۵- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۲- CE همگرایی سنج ۲۲۰
- شکل الف-۲۶- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۳- CE همگرایی سنج ۲۲۰
- شکل الف-۲۷- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۴- CE همگرایی سنج ۲۲۱
- شکل الف-۲۸- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۵- CE همگرایی سنج ۲۲۱
- شکل الف-۲۹- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۶- CE همگرایی سنج ۲۲۲
- شکل الف-۳۰- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۷- CE همگرایی سنج ۲۲۲
- شکل الف-۳۱- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۸- CE همگرایی سنج ۲۲۳
- شکل الف-۳۲- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۹- CE همگرایی سنج ۲۲۳
- شکل الف-۳۳- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۰- CE همگرایی سنج ۲۲۴
- شکل الف-۳۴- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۱- CE همگرایی سنج ۲۲۴
- شکل الف-۳۵- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۲- CE همگرایی سنج ۲۲۵
- شکل الف-۳۶- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۳- CE همگرایی سنج ۲۲۵
- شکل الف-۳۷- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۴- CE همگرایی سنج ۲۲۶
- شکل الف-۳۸- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۴- CE همگرایی سنج پنج نقطه‌ای ۲۲۶

فصل دوم : زمین شناسی مهندسی محدوده حفاری و بخش بندی تونل های قطار شهری اصفهان

جدول ۱-۲- تونل های قطار شهری اصفهان - قطعه جنوبی (صفه - آزادی)..... ۱۴

جدول ۲-۲- واحدهای لیتولوژی در موقعیت فضای حفاری تونل و ایستگاه های مترو (خط جنوبی)..... ۱۸

فصل سوم : وضعیت درزه ها و آزمایش های ژئوتکنیکی

جدول ۱-۳- کمیت ویژگی های ناپیوستگی ها در سطح حفاری های زیرزمینی

(دیواره راست، چپ، سینه کار) در فاصله میدان آزادی تا ترمینال صفه..... ۲۲

جدول ۲-۳- مقاومت فشاری واحد شیلی..... ۲۴

جدول ۳-۳- مقاومت فشاری واحد ماسه سنگی سخت (SS)..... ۲۵

جدول ۴-۳- مقاومت فشاری واحد ماسه سنگی با سختی کمتر (S)..... ۲۶

جدول ۵-۳- نتیجه آزمایشگاهی هم ارزی σ_{ci} و (δ_0) ۲۷

جدول ۶-۳- نتیجه آزمایشهای سه محوری روی مغزه های گمانه ها

در خط آزادی-صفه (مترو اصفهان)..... ۲۹

جدول ۷-۳- نتیجه آزمایشهای برشی مستقیم روی مغزه های حفاری در خط آزادی-صفه..... ۳۱

جدول ۸-۳- نتیجه آزمایش های مقاومت کششی سنگهای سازند شمشک در خط مترو اصفهان..... ۳۳

جدول ۹-۳- دوام سنگهای میزبان تونل های مترو..... ۳۵

جدول ۱۰-۳- نتیجه آزمایشهای آماس پذیری سنگهای میزبان تونل های مترو..... ۳۶

جدول ۱۱-۳- ویژگی های فیزیکی سنگهای سر راه تونل های مترو..... ۳۷

فصل چهارم : پارامترهای ژئومکانیکی و رده بندی مهندسی توده سنگ های مسیر تونل

جدول ۱-۴- پارامترهای ژئومکانیکی واحد (sh) با توجه به RMR..... ۴۸

جدول ۲-۴- پارامترهای ژئومکانیکی واحد (sh) با توجه به (هوازده / هوانزده)، $GSI=50/31$ ۴۸

جدول ۳-۴- پارامترهای ژئومکانیکی واحد (SS) با روش RMR..... ۴۹

جدول ۴-۴- پارامترهای ژئوتکنیکی واحد (SS) با توجه به (هوازده / هوانزده)، $GSI=58/37$ ۵۰

- جدول ۴-۵- پارامترهای ژئومکانیکی واحد s با روش $GSI = 37$ ۵۲
- جدول ۴-۶- پارامترهای ژئوتکنیکی واحد (sf) با توجه به $GSI=15$ ۵۲
- جدول ۴-۷- پارامترهای ژئومکانیکی سازندهای اصلی واحدهای ترکیبی ۵۳
- جدول ۴-۸- پارامترهای توده سنگهای ترکیبی براساس روش میانگین وزنی ۵۴

فصل هفتم : آنالیز پایداری تونل‌های متروی دوقلوی اصفهان با استفاده از روش‌های عددی و تجربی

- جدول ۷-۱- امتیاز دهی Q برای توده سنگ Jssh ۱۲۴
- جدول ۷-۲- پارامترهای در نظر گرفته شده برای طراحی سازه نگهبان ۱۵۵
- جدول ۷-۳- پارامترهای در نظر گرفته شده برای سنگ‌های اطراف تونل ۱۵۶
- جدول ۷-۴- بیشینه تلاش‌های ایجاد شده در سیستم نگهدارنده اولیه
متشکل از شاتکریت و قاب مشبک فلزی ۱۶۰
- جدول ۷-۵- الف- خصوصیات مکانیکی قاب مشبک فلزی ۱۶۰
- جدول ۷-۵- ب- خصوصیات مکانیکی شاتکریت ۱۶۱

فصل هشتم : کنترل پایداری بلوک‌های ایجاد شده در تونلهای قطار شهری اصفهان (حد فاصل ایستگاه آزادی-صفه)

- جدول ۸-۱- شیب وامتداد شیب دسته درزه‌ها و لایه‌بندی
حد فاصل ایستگاه آزادی - شیخ کلینی ۱۷۲

فصل نهم : تحلیل برگشتی داده‌های همگرایی سنجی تونل‌های متروی دوقلوی اصفهان

- جدول ۹-۱- روش‌های مختلف آنالیز معکوس در مهندسی مکانیک سنگ ۱۸۹
- جدول ۹-۲- مقایسه مقادیر همگرایی بدست آمده از رفتار سنجی و آنالیز عددی ۱۹۵
- جدول ۹-۳- انتخاب محتمل‌ترین جواب در محدوده جواب
که از طریق تحلیل برگشتی بدست آمده است ۱۹۵

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

اصفهان مرکز ارتباطات و تجارت و نقطه جذب عمده فعالیتها در منطقه مرکزی ایران است. در گوشه و کنار این شهر مساجد، کاخها، خیابانها، پلها و پارکهای زیبایی ساخته شده است. در این شهر رشد تعداد وسایل نقلیه و میانگین بالای عمر آنها موجب افزایش روز افزون آلودگی هوا و ترافیک سنگین گردیده است. طبق گزارش آماری در سال ۱۳۷۷ جمعیت استان اصفهان ۴,۳۷۰,۰۰۰ نفر بوده است که نیمی از این جمعیت در شهرها متمرکز شده است (سازمان قطار شهری اصفهان و حومه، ۱۳۸۴). ۳۲ درصد از این جمعیت زیر ۱۶ سال بوده، ۶۲ درصد بین ۱۵ تا ۶۴ سال و ۶ درصد بالای ۶۴ سال می‌باشند و این کاملاً واضح است که جمعیت اصفهان جوان بوده و در ده سال آینده خدمات شهری بیشتری احتیاج خواهد داشت. هر گونه توسعه شهری باید آگاهانه و در جهت حفظ بافت زیبای شهر انجام گیرد. همچنین برای بهبود شرایط بد ترافیکی و مخصوصاً در مسیرهای اصلی و مهم، احداث مترو برای چنین کلان شهری امری ضروری می‌باشد. تکمیل سیستم راه آهن سبک منطقه اصفهان مزایای زیادی برای شهر به ارمغان می‌آورد. این مزایا شامل بهبود دسترسی به محلهای کار، خرید، امکانات تفریحی، اجتماعی، همچنین سهولت سفر، کاهش زمان و هزینه سفر و منافع زیست محیطی می‌گردد. با احداث مترو آینده حمل و نقل جاده‌ای و شرایط محیطی و اجتماعی شهر بهبود یافته و آلودگی هوا بخصوص از نظر گازهای SO₂، CO و ذرات معلق به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت.

۱-۲- خلاصه‌ای از طرح قطار شهری اصفهان

متروی اصفهان پس از حدود ۱۳ سال مطالعه و بهره‌گیری از توان سه مشاور خارجی معتبر دنیا شامل شرکت سوفرتو از فرانسه جهت مطالعه پیش امکان‌سنجی، شرکت PPK از استرالیا جهت مطالعات امکان‌پذیری حمل و نقل ریلی و شرکت SYSTRA از فرانسه و چندین مشاور داخلی، شبکه مترو اصفهان را به طول ۱۲۳ کیلومتر طراحی و جهت اجرا آماده شده است که مطابق نقشه شکل (۱-۱) کل سیستم ریل سبک (LRT) اصفهان شامل پنج خط می‌باشد. تنها پروژه مصوب جهت اجراء در حال حاضر خط شمالی - جنوبی از ترمینال مسافربری کاوه تا ترمینال مسافربری صفه به طول ۱۲/۵ کیلومتر است که ۱۲ کیلومتر آن زیرزمینی و در مجموع شامل ۱۵ ایستگاه از کاوه تا صفه می‌باشد. فعالیت پروژه در اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۲ در زیر سطح خیابان هزارجریب آغاز شده و کارفرمای پروژه سازمان قطار شهری اصفهان و حومه می‌باشد و شرکت مهندسين مشاور هزارراه بر پروژه نظارت دارد. ظرفیت این خط در سال ۲۰۱۱ حدود ۱۹۰۰۰ مسافر در ساعت خواهد بود (سازمان قطار شهری اصفهان و حومه، ۱۳۸۴).

۳-۱- مروری بر کارهای انجام شده و اطلاعات موجود

خط شمالی-جنوبی، حد فاصل ترمینال کاوه تا ترمینال صفه می‌باشد. طول کل این مسیر ۱۲/۵ کیلومتر و دارای ۱۵ ایستگاه زیرزمینی می‌باشد. عملیات اجرایی این مسیر با توجه به نوع زمین، در سه قسمت به شرح زیر صورت می‌گیرد (شکل ۱-۲):

۱-۳-۱- قطعه شمالی

قطعه شمالی از ایستگاه کاوه تا ایستگاه مدرس به طول ۲/۶ کیلومتر به روش^۱ کند و پوش که با حفر زمین، ایجاد سازه‌های نگهبان و ایجاد پوشش سقف احداث می‌گردد و دارای دو خط رفت و برگشت در این زیرگذر است و عملیات اجرایی آن در خرداد ماه ۱۳۸۱ آغاز شده است.

۲-۳-۱- قطعه میانی

قطعه میانی از شفت ورودی TBM (روبروی ترمینال بابلدشت) تا ایستگاه شریعتی و به طول ۵/۵ کیلومتر به وسیله ماشین تونل‌زن (TBM) که از شرکت هرکنشت^۲ آلمان خریداری گردیده، اجرا خواهد شد. که در دو خط مجزا و موازی هر یک با قطر تمام شده ۶ متر می‌باشد. این فاز با گذر از زیر رودخانه زاینده‌رود، خط واصل ارتباطی را بین دو سوی این رودخانه به وجود خواهد آورد (شکل ۱-۲).

۳-۳-۱- قطعه جنوبی

قطعه جنوبی از میدان آزادی تا ترمینال صفه به طول ۴/۴ کیلومتر که آن نیز به شکل دو تونل زیرزمینی موازی یکی برای خط رفت و دیگری برای برگشت با قطر تمام شده ۶ متر و با مقطع نعل اسبی و به عمق متوسط ۱۷ متر می‌باشد (شرکت الموت، ۱۳۸۲).

1 - Cut&Cover
2 - Herrenkencht

به خاطر تغییر وضعیت لایه‌های زمین‌شناسی، حفاری به وسیله ماشینهای حفار کله‌گاو^۱ و به روش حفر مرحله‌ای یا NATM و اجرای یک لایه شاتکریت به عنوان نگهدارنده اولیه صورت می‌گیرد. در شکل‌های (۳-۱) و (۴-۱) و (۵-۱) نماهایی از این ماشین نشان داده شده است. در این پروژه تحلیل پایداری بر روی قطعه جنوبی صورت می‌پذیرد.



کاروبار

چمران

مدرس

شهید

نخعی

امام حسین

انقلاب

سی و سه پل

میرداماد

شریعتی

آزادی

دانشگاه

کارگر

خوابگاه

صفه



سازمان ملی استاندارد
و اندازه‌گیری

راشماس نقشه

قطعه شمالی

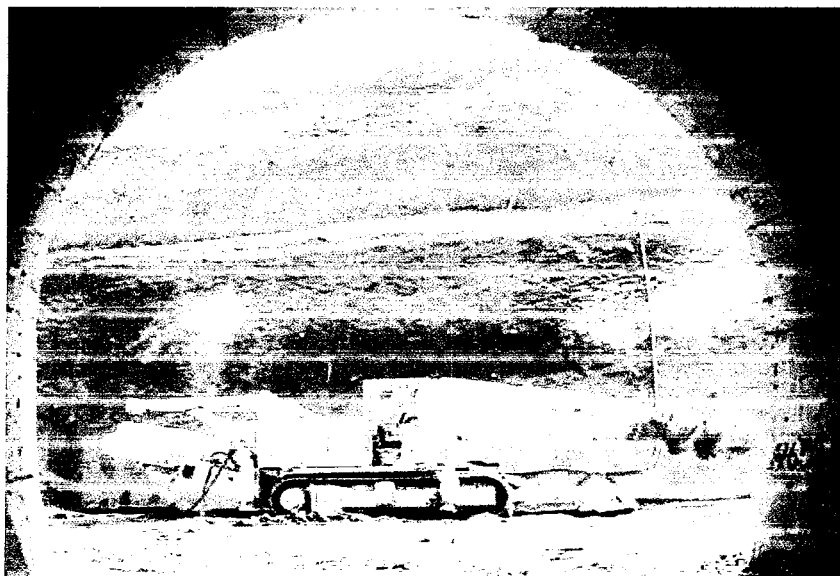
قطعه میانی

قطعه جنوبی

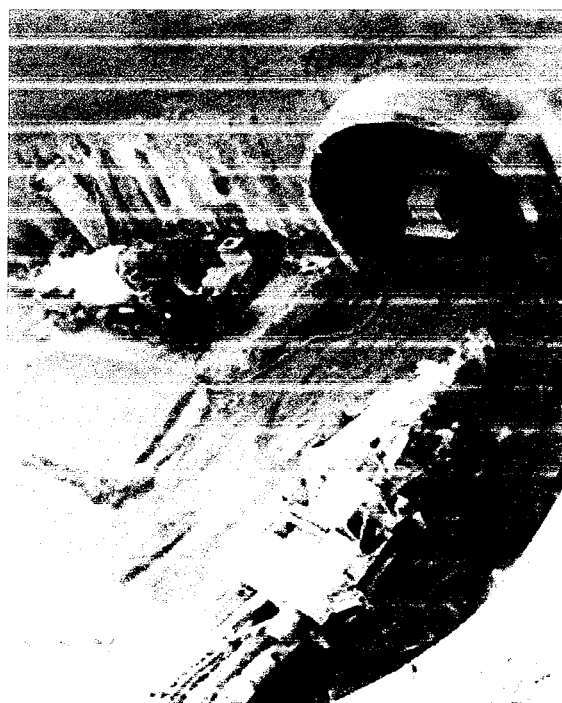
استاد

مقیاس: $\frac{1}{150000}$

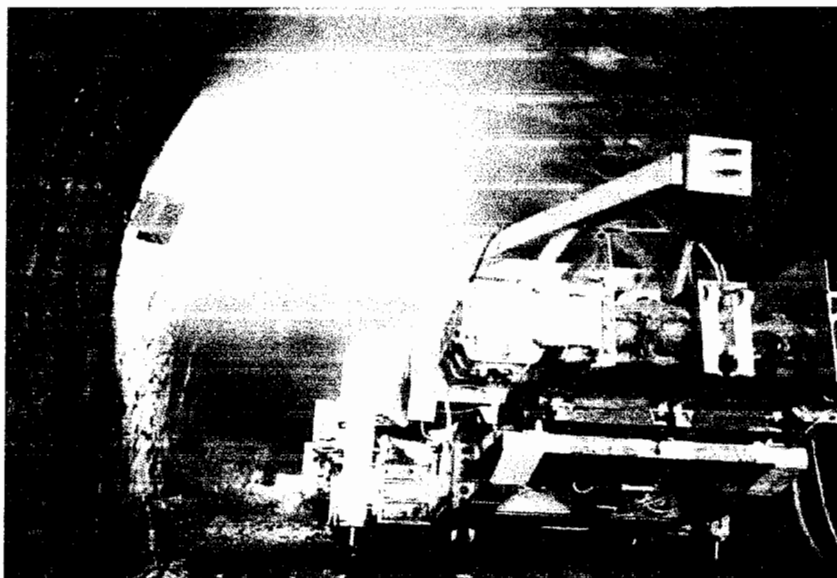
شکل ۱-۲- تقسیم‌بندی خط شماره یک متروی اصفهان به قطعه شمالی، میانی و جنوبی (Esfahanmetro, 2005)



شکل ۱-۳- نمای از Road header



شکل ۱-۴- نمای از Road header واقع در شفت میدان آزادی



شکل ۱-۵- نمای از Road header

۴-۱- اهداف پایان نامه

رفتارسنجی، بررسی عملکرد روش اجرا و نصب سیستم نگهدارنده در تونل‌ها بخصوص تونل‌های اجرا شده در زمین‌های ضعیف یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین روش‌های اجرای تونل‌ها می‌باشد. هدف از انجام این تحقیق، پیش‌بینی امکان بروز ناپایداری در تونل‌های دوقلوی قطعه جنوبی قطار شهری اصفهان با استفاده از نتایج ابزار دقیق و مقایسه نتایج حاصله از ابزار دقیق با روش‌های عددی، تحلیل مناسب و صحیح داده‌ها در مقاطع بحرانی و سپس تحلیل برگشتی با استفاده از نتایج ابزار دقیق و ارائه راهکار مناسب جهت پایدارسازی بخش‌های ناپایدار تونل‌ها می‌باشد.

۱-۵- سازماندهی پایان نامه

پایان نامه حاضر مبتنی بر ۱۰ فصل می باشد. مابقی فصول این پایان نامه به شرح ذیل سازماندهی شده است:

فصل دوم تحت عنوان زمین شناسی محدوده حفاری و بخش بندی مسیر تونل های قطار شهری اصفهان می باشد که در آن ساختار زمین شناسی خط مترو و زمین شناسی مهندسی محدوده پروژه بررسی شده است.

فصل سوم تحت عنوان وضعیت درزه ها و آزمایش های ژئوتکنیکی می باشد که در آن وضعیت درزه ها در طول مسیر خط مترو بررسی شده و نتیجه آزمایش های ژئوتکنیکی انجام شده روی مغزه ها آورده شده است.

فصل چهارم تحت عنوان پارامترهای ژئومکانیکی و رده بندی مهندسی توده سنگ های مسیر تونل می باشد. در این فصل دو رده بندی مهندسی RMR و GSI بکار برده شده و با توجه به این رده بندی ها پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ ها بدست آمده است.

فصل پنجم تحت عنوان روش های تحلیل پایداری تونل ها می باشد، که به بررسی انواع روش های تجربی و روش های مشاهده ای و عددی پرداخته شده است.

فصل ششم تحت عنوان نصب ابزار دقیق و رفتارسنجی تونل های قطار شهری اصفهان، قطعه جنوبی (مسیر میدان آزادی - ترمینال صفه) می باشد. در این فصل به تفسیر داده های همگرایی سنج پرداخته شده و نیز شرح مختصری از وضعیت نشست در سطح زمین در ایستگاه های مختلف نشست سنج آورده شده است.

فصل هفتم تحت عنوان تحلیل پایداری تونل‌های دوقلوی قطار شهری اصفهان با استفاده از روش‌های تجربی و عددی دوبعدی می‌باشد. در این فصل در ابتدا به کمک روش پیشنهادی بنیائوسکی (۱۹۸۹) و همچنین روش امتیازدهی Q ارائه شده توسط گریمستاد و بارتون (۱۹۹۳)، پوشش نگهدارنده اولیه انتخاب شده است. سپس با استفاده از مدلسازی‌های عددی به کمک نرم افزار PLaxis 2D version: 7.2 تحلیل پایداری انجام گرفته و سپس کنترل نشست در تونل‌های دوقلو صورت گرفته شده و در ادامه کنترل پایداری تونل‌ها به روش کرنش بحرانی و کرنش برشی بحرانی ساکورایی و آداچی (۱۹۸۸)، با در نظر گرفتن اثرات ترخیص تنش ناشی از فاصله مابین سینه‌کار و محل نصب پوشش انجام شده است و سیستم نگهدارنده مناسب پیشنهاد شده است.

فصل هشتم تحت عنوان کنترل پایداری بلوک‌های ایجاد شده در تونل‌های مترو اصفهان می‌باشد. در این فصل ابتدا چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی درزه‌های سطوح لغزشی با استفاده از نرم‌افزار RocData محاسبه شده و سپس به کمک نرم‌افزار Unwedge بلوک‌های محتمل که امکان تشکیل آنها در توده سنگ میزبان وجود دارد شناسایی شده و سپس اثر سیستم نگهداری بر روی آن اعمال شده و تأثیر آن بر روی گسیختگی گوه‌ها مجدداً توسط نرم‌افزار محاسبه شده است.

فصل نهم تحت عنوان تحلیل برگشتی داده‌های همگرایی سنجی تونل‌های متروی دوقلوی اصفهان می‌باشد. در این فصل ابتدا به بررسی تفاوت بین آنالیز برگشتی و آنالیز عادی پرداخته شده سپس روش‌های آنالیز برگشتی بیان شده است و در ادامه آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای ژئومکانیکی تأثیرگذار در نتایج تحلیل برگشتی صورت گرفته و سپس نتایج بدست آمده از آنالیز عددی با نتایج رفتار سنجی مقایسه شده و محتمل‌ترین جواب‌ها بدست آمده است. در فصل دهم نتایج بدست

آمده از کلیه فصل‌ها مورد بررسی قرار گرفته شده است و در نهایت پیشنهاداتی ارائه شده است. شکل (۱-۶) مراحل فوق را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۶- سازماندهی پایان نامه

فصل دوم

زمین شناسی مهندسی محدوده حفاری
و بخش بندی مسیر تونل های قطار شهری اصفهان
(قطعه آزادی - صفه)

۲-۱- مقدمه

خط آزادی - صفه مترو اصفهان که بطور کلی در زیر راستای خیابان هزار جریب قرار دارد، در ۵ جایگاه که موقعیت ایستگاه ها می باشد، به طور روباز حفاری می شود و حد فاصل میان ایستگاه ها به صورت زیر زمینی حفاری خواهد شد. تردیدی نیست که شرایط ژئومکانیکی و محیط زمین شناسی مهندسی این دو نوع حفاری روباز و زیرزمینی تفاوت های آشکاری دارند و عنصرهای آنها یکسان نیستند. تقسیم بندی کلی این قسمت از مترو اصفهان در ادامه این فصل آورده شده است.

۲-۲- ملاحظات زمین شناسی مهندسی

۲-۲-۱- سازندهای سنگی

سازندهای سنگی که در نواحی جنوب شهر برونزد دارند از لایه های متوالی شیل و ماسه سنگ با میان لایه هایی از جوش سنگ، رادیولاریت، سنگ آهک و مواد آتشفشانی متعلق به ژوراسیک تشکیل گردیده است. این سازند به سمت شمال تدریجاً به زیر رسوبات آبرفتی کواترنر فرو می رود (شرکت الموت، ۱۳۸۲).

۲-۲-۲- سازندهای آبرفتی

سازندهای آبرفتی در محدوده شهر اصفهان، شامل رسوبات آبرفتی کوهپایه ای و نهشته های

رودخانه ای می باشد.

۳-۲- زمین شناسی مهندسی محدوده پروژه

پایان خط مترو در کیلومتر ۱۲+۹۰۰ و آغاز آن در کیلومتر ۹+۰۲۵ است و این طول ۳۸۷۵

متری با توجه به موقعیت گمانه های حفر شده در طول مسیر، ضخامت آبرفت و سنگ بستر در جدول

(۱-۲) نشان داده شده است (شرکت الموت، ۱۳۸۲).

جدول ۱-۲- تونل های قطار شهری اصفهان - قطعه جنوبی (شرکت الموت، ۱۳۸۲)

ردیف	نام تونل	طول تونل (متر)	موقعیت روی محور قطعه جنوبی از کیلومتر تا کیلومتر	روپاره (متر)	تراز کف تونل (متر)	شیب به سوی ایستگاه (%)
۱	آزادی - دانشگاه	۷۱۶	۹+۱۷۲ - ۹+۸۸۸	۱۱-۸	۱۵۷۴/۳ ۱۶۰۱	۳/۷ آزادی
۲	دانشگاه - کارگر	۸۷۰	۱۰+۸۵۴ - ۹+۹۸۴	۱۷-۱۲/۵	۱۶۰۰/۸۳ ۱۶۳۶/۰۷	دانشگاه
۳	کارگر - خوابگاه	۹۴۹	۱۱+۸۷۸ - ۱۰+۹۲۹	۲۲/۵ - ۷/۵	۱۶۳۶/۵۷ ۱۶۷۴/۵	۳/۹ کارگر
۴	خوابگاه - صفه	۵۶۲	۱۲+۵۳۴ - ۱۱+۹۷۲	۱۱-۶/۵	۱۶۷۶/۸۵ ۱۶۹۵	۳/۲ خوابگاه
		۲۴۶ ^(۱)	۱۲+۷۸۰ - ۱۲+۵۳۴	۷/۵ - ۵	۱۶۹۵ ۱۶۹۵	افقی است

(۱) این قسمت ۲۴۶ متری به صورت روباز اجرا خواهد شد.

۲-۴- سازه های عمرانی - صنعتی در محدوده تونل ها

از آنجا که فضای حفاری تونل ها حداقل در عمق ۷ متری در سطح خیابان هزار جریب قرار دارد، بنابراین در حالت کلی هیچ سازه ای در مسیر تونل ها قرار نخواهد گرفت و مجموعه اتومبیل های در رفت و آمد بر روی سطح خیابان را می توان به عنوان بارگذاری ترافیکی از سطح زمین، در محیط زمین شناسی مهندسی تونل ها در نظر گرفت.

۲-۵- زمین شناسی محدوده خط مترو

با توجه به مجموعه بررسی های انجام شده در برونزدها و مغزه ها مشخص گردید که توده سنگ میزبان تونل ها و ایستگاه های مترو دچار چین خوردگی و گسلش شده است و بنابراین قرارگیری لایه های شیلی - ماسه سنگی سازند شمشک به صورت تک شیب به سوی جنوب نمی باشد ویژگی هایی که در این مدل مشخص شده به شرح زیر است:

الف) چین ها در حالت کلی دامنه کمی دارند (تنگ نیستند) و قسمت لولایی آن ها پهن و پخ گونه است.

ب) سطح محوری چین ها شیب زیادی دارد که از ۷۵ درجه بیشتر است.

پ) تغییر شیب لایه ها در یک محدوده است که پهنای آن از ۲۰ متر کمتر می باشد. در این پهنای شیب لایه ها گاهی به بیش از ۶۰ درجه می رسد. جهت شیب اینگونه لایه ها که در برونزدها دیده می شود به سوی شمال و شیب آنها حدود ۴۵ درجه است.

ث) گسل های خاوری - باختری به نام دستگرد و دنبه به صورت عمود بر مسیر مترو قرار دارند. در موقعیت قرارگیری گسل ها و تونل چون ضخامت آبرفت کم می باشد، بنابراین گسل ها در فضای تونل سر راه خواهد بود و احتمال خرد شدگی توده سنگ و ریزش های محدود امکان پذیر است. محل برخورد با این گسل ها با فضای تونل به احتمال زیاد در فاصله میان ایستگاههای کارگر و خوابگاه می باشد (شرکت الموت، ۱۳۸۲).

۲-۶- زمین شناسی توده سنگ میزبان در ایستگاه های مترو (میدان آزادی - صفه) و

ژئوتکنیک طرح

توده سنگ میزبان تونل ها و ایستگاه های مترو اصفهان (خط صفه - آزادی) از لایه های شیلی و ماسه سنگی تشکیل شده که در زمین شناسی ایران به نام سازند شمشک خوانده شده و به سن ژوراسیک می باشد. با توجه به مطالعات ژئوتکنیک انجام شده چهار توده سنگ اصلی در مسیر قطعه جنوبی متروی اصفهان قرار دارند که عبارتند از:

- توده سنگ شیلی (Sh)
- توده سنگ، ماسه سنگ سخت (SS)
- ماسه سنگ های با سختی کم (S)
- ماسه سنگ شکننده و خرد شونده (Sf)

با توجه به یافته های زمین شناسی و ژئوتکنیکی از مسیر متروی اصفهان، واحدهای مختلف دیگری نیز در مسیر یافت شده اند که ترکیبی از درصد سنگ های شیلی و ماسه سنگی هستند که

پارامترهای ژئوتکنیکی آنها بر پایه واحدهای اصلی تر مسیر تعیین شده است. این واحدهای ترکیبی عبارتند از (شرکت الموت، ۱۳۸۲) :

- تناوب ماسه سنگ و شیل (S/Sh)، ماسه سنگها بیشتر از نوع (S) می باشند.
- تناوب ماسه سنگ با لایه بندی بدون نظم و میان لایه های شیلی (Sib)
- توده سنگ سازند شمشک (Jssh)
- ماسه سنگ شکننده، با میان لایه های شیلی به مقدار خیلی کم (Sf/Sh)

Jssh و Jsss که قسمتهای بزرگی از سازند شمشک می باشند که در آنها به ترتیب شیل و ماسه سنگ چیره است و ۷۰ درصد واحدهای زمین شناسی منطقه را شامل می شود. در هر یک از این دو واحد کلی واحدهای ترکیبی دیگری نیز از آنها تشکیل شده است. سایر واحدهای زمین شناسی در برش ساختاری در راستای خط مترو با توجه به ساختار زمین شناسی آنها در ادامه و در جدول (۲-۲) آورده شده است (شرکت الموت، ۱۳۸۲).

SS/S: تناوب ماسه سنگ های مختلف که مقدار درصد SS بیشتر از S است.

SSbc: ماسه سنگ و کمی شیل که چند لایه بسیار نازک زغال سنگ با آنها تشکیل شده و در ماسه سنگ های آن بیشتر از نوع سختی کمتراند.

shbc: شیل سیاه رنگ با زغال که بسیار نازک لایه می باشد و یا شیل های زغالی^۱ می باشند.

JS: قسمتی از سازند شمشک که مقدار درصد شیل ها و ماسه ها برابر ۵۰ درصد است.

JSt: قسمتی از سازند شمشک که مقادیر درصدی سازندها مانند JS است اما لایه های ماسه سنگی ضخامت بیشتری دارند.

1 - Coaly shale

sh/s: شیل با میان لایه های ماسه سنگی.

جدول ۲-۲- واحدهای لیتولوژی در موقعیت فضای حفاری تونل و ایستگاه های مترو (خط جنوبی) (شرکت الموت، ۱۳۸۲)

ردیف	شماره گمانه	عمق حفاری (متر)	ضخامت آبرفت (متر)	واحد لیتولوژی توده سنگی (متر)	مقدار RQD میانگین/دامنه	روباره (متر)
۱	۰۱۵	۱۷/۳	۲/۸	shl=۱۵/۵	۰-۰	۲/۵
۲	۷۰۱۰۹	۱۸	۴	shd=۲.shl=۱۱/۵	(۱۰۰-۰)/۳۷	۳
۳	۰۱۴	۶/۵	-	shd=۶		۰/۵
۴	۷۰۱۰۸	۶/۵	-	sf=۰/۵.shl=۴.ss=۲	(۴۰-۰)/۱۰	۰
۵	۰۱۳	۶/۵	-	shl=۶/۵	۰-۰	۰
۶	۷۰۱۱۰	۶/۵	-	sid=۳.s/sh=۳/۵	(۴۵-۰)/۳۰	۰
۷	۰۱۲	۱۸	۵/۶	s/sh=۲.ss=۱۰/۴	(۲۳-۰)/(۱۰)	۲/۵
۸	۷۰۱۰۷	۱۵/۵	۶/۷	s/sh=۸.ss=۷/۵	(۹۰-۰)/۱۹/۸	۵/۵
۹	۰۱۱	۶/۵	-	ss=۵.shg=۱/۵	(۸۳-۰)/۳۷	۰
جمع	نه گمانه	≈ ۱۰۱	۱۹/۱۰	.ss=۲۴/۹ .shl=۳۱.shd=۸/۸ .shg=۱/۵jtssh=۶/۵ s/b=۳, s/sh=۱۰	(۱۰۰-۰)/۲۵	۱۲/۵-۲ متفاوت

۲-۷- نتیجه گیری

بر پایهٔ پروفیل ساختار زمین شناسی موجود در مسیر مترو، بحرانی ترین مقاطع از لحاظ ارتفاع روباره، پارامترهای ژئوتکنیکی، ارتفاع آبرفت و فاصله دو تونل از هم انتخاب گردیده است. با دقت در پروفیل زمین شناسی مشخص می شود که سازند اصلی میزبان تونل در این قطعه، توده ترکیبی Jssh می باشد. سازندهای دیگری که در مسیر به چشم می خورد عبارتند از: Shd, Shl, S/Sh. با توجه به آنکه پارامترهای مقاومتی زیر گروه Sh که شامل Shd و Shl است از نظر مقاومتی اندکی بیشتر از Jssh هستند و طول زیادی از مسیر را نیز به خود اختصاص نمی دهند که به صورت پراکنده و به طولهای کوتاه قرار گرفته اند، در این قسمت نیز از سازند Jssh مورد استفاده قرار گرفته است. به طوری که در فصل هفتم، آنالیز پایداری تونل های متروی دوقلوی اصفهان در این سازند صورت پذیرفته است.

فصل سوم

وضعیت درزه ها و آزمایش های ژئوتکنیکی

۳-۱- مقدمه

در پروژه‌های تونلسازی ارزیابی موقعیت و تعداد ناپیوستگی‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند. در این فصل ابتدا وضعیت درزه‌ها در سینه‌کارها در طول مسیر قطعۀ جنوبی قطار شهری اصفهان بررسی شده و سپس نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی انجام شده روی مغزه‌ها در ادامه فصل آورده شده است.

۳-۲- وضعیت درزه‌ها در سینه‌کارها

اندازه‌گیری جهت و تراکم دسته درزه‌ها در حد فاصل میدان آزادی - ترمینال صفه بیانگر این مطلب است که دسته درزه‌ها در سینه‌کار دارای شیب زیاد به سوی توده سنگ‌های اطراف تونل می‌باشند. شیب لایه‌ها به سوی سینه‌کار است و سینه‌کار حفاری ضعیف‌تر از دیواره‌ها می‌باشد و بنابراین احتمال لغزیده شدن آنها به درون تونل در محدوده ایستگاه آزادی تا کیلومتر ۹+۲۷۰ زیاد می‌باشد (پهلوی شمالی تاقدیس در میدان آزادی). در جدول (۳-۱) کمیت ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها در حفاری‌های زیرزمینی از قبیل موقعیت درزه‌ها و لایه‌ها و شیب ظاهری و فاصله‌داری ظاهری بر روی سینه‌کار و دیواره‌ها نشان داده شده است (شرکت الموت، ۱۳۸۲).

جدول ۳-۱- کمیت ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها در سطح حفاری‌های زیرزمینی (دیواره راست، چپ، سینه کار) در فاصله میدان آزادی تا ترمینال صفه (شرکت الموت، ۱۳۸۲)

ردیف	درزه‌ها و لایه‌ها	موقعیت فضایی درزه‌ها*	فاصله‌داری درزه‌ها (متر)	سینه کار (درجه) $d=85$ **		دیواره‌ها (درجه) $d=175$ ***	
				شیب ظاهری (درجه)	فاصله‌داری ظاهری (متر)	شیب ظاهری (درجه)	فاصله‌داری ظاهری (متر)
۱	درزه ۱ J_1	۹۰/۸۳	۰/۳۵	۸۳	۰/۳۵	۴۵	۲
۲	درزه ۲ J_2	۲۳۶/۷۵	۰/۱۵	۴۹	۰/۲	۶۸	۰/۲
۳	درزه ۳ J_3	۲۸۶/۷۵	۰/۴	۸۱	۰/۴	۳۰	۱/۳
۴	لایه B	۱۰/۵۷	۰/۱۵	۲	۰/۲۴	۵۵	۰/۱۵

یادداشت‌ها:

* زاویه شیب / سوی شیب (درجه)

** زاویه ناپیوستگی با راستای عمود بر محور تونل (سینه کار)

*** زاویه ناپیوستگی با راستای محور تونل (دیواره‌ها)

۳-۳- آزمایش‌های ژئوتکنیکی انجام شده روی مغزه‌ها و نتیجه آنها (دانشگاه تربیت

مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲)

روی نمونه‌های انتخاب شده از مغزه‌ها، آزمایش‌هایی انجام شده که عبارتند از آزمایش بار نقطه ای^۱ که یا به صورت قطری (D) و یا محوری (A) آزمایش شده‌اند و آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری که تعداد آنها در مقایسه با آزمایش‌های بار نقطه‌ای کمتر است. البته این یک موضوع عادی در پروژه‌ها می‌باشد. زیرا باتوجه به روابط موجود می‌توان نتیجه آزمایش بار نقطه‌ای را با هزینه خیلی کمتر به مقاومت فشاری تک‌محوری تبدیل کرد.

۳-۳-۱- مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت فشاری تک نقطه‌ای واحدهای سنگی

از مجموعه ۴۷ نمونه انتخاب شده برای آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری ۳۱ مورد پاسخ داده است. بیشترین مقاومت فشاری تک محوری ۹۲ مگاپاسکال و کمترین مقدار آن ۹/۴ مگاپاسکال بوده است. مدول الاستیک سنگ‌ها نیز در دو مرز ۲/۵ و ۲۲ گیگا پاسکال نتیجه شده است. ضریب یا نسبت پواسون نیز ۰/۲ تا ۰/۴۲ تغییر نشان داده است (دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲).

در ادامه مقاومت فشاری تک محوری هر کدام از واحدهای سنگی تعیین می‌گردد. چهار واحد سنگی اصلی شیلی و ماسه سنگی در این ناحیه وجود دارد که بیش از ۹۰ درصد ضخامت متشکله به صورت تناوبی و یا میان لایه‌ای بصورت واحدهای ترکیبی می‌باشند.

۱- واحدهای شیلی (sh): این واحدها عبارتند از shl, shd, shdb, shb, shbc, shg که مقدار کمی هم از لایه‌های ماسه سنگی سخت (SS) و بیشتر با سختی (S) و گاهی مقدار خیلی کم از ماسه سنگ شکننده (sf) در آنها وجود دارد، جدول (۲-۳) مقاومت فشاری تک محوری شیل‌ها که در آزمایشگاه بدست آمده از ۹/۴ تا ۴۵/۴۳ مگا پاسکال تغییر می‌کند.

جدول ۳-۲- مقاومت فشاری واحد شیلی (دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲)

شماره گمانه	مقاومت فشاری تک محوری (آزمایشگاهی) MPa	مقاومت فشاری تک محوری حاصل از آزمایش بار نقطه‌ای MPa	یادداشت
۷۰۱۰۵	۹/۴	۱۵/۵	
۰۰۷	۴۵/۳ و ۸/۱۴	-	
۷۰۱۰۴	۱۰/۵	۹/۸ و ۱۲/۱۸	محاسبه مقدار σ_{ci} با ضریب
۰۰۵	۱۳/۸۵ و ۹/۸۶	۹/۸	$I_S(50)$ انجام شده
۷۰۱۰۳	۲۵/۸	-	است.
۷۰۱۰۲	۳۰/۶ و ۵۲/۲	-	$\sigma_{ci} = 21/5 I_S(50)$
۰۰۳	۱۸/۶	-	
۷۰۱۰۹	۲۱	-	
۱۰۷	۲۷/۸	-	
۱۰۶	۹/۲۴ و ۴	۹/۸ و ۱۹/۷	
۰۱۴	-	۲۵	
۰۱۱	-	۱۹/۹	
۰۰۶	-	۹/۶۶ و ۱۰ و ۱۰	
۱۰۴	-	۹/۸	
۷۰۱۱۰	۲۵/۴	-	
جمع	۳۸۸	۲۴۰	
میانگین	۲۰/۴	۱۶	میانگین ۱۸

۲- مقاومت فشاری واحد ماسه سنگی سخت تر (SS): مقاومت فشاری آن ۶۷ مگاپاسکال بدست آمده است و مقاومت فشاری ۵۸ مگاپاسکال برای ماسه سنگ‌های هوازده در نظر گرفته شده است (جدول ۳-۳).

۳- ماسه سنگ‌های شکننده sf^1 : ۲۱ مگا پاسکال (جدول ۳-۴).

جدول ۳-۳- مقاومت فشاری واحد ماسه سنگی سخت (SS) (دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲)

شماره گمانه	مقاومت فشاری تک محوری MPa (آزمایشگاهی)	مقاومت فشاری بار نقطه‌ای MPa (آزمایشگاهی)	یادداشت
۷۰۱۱۰	۵۸/۴۵	۱۰۳	
۷۰۱۰۲	۵۸/۴	-	
۰۱۰	۵۸/۴	۶۱/۶۸ و ۱۵۴* و ۷۷/۳	محاسبه مقدار σ_{ci} با ضریب
۰۱۱	۶۷/۴ و ۹۲/۳ و ۴۶/۱۷	۱۶۹* و ۶۲/۴ و ۹۹/۳	I_S (۵۰) انجام شده است.
۷۰۱۰۶	-	۴۶/۶	(مقدار ستاره دار قابل پذیرش نیست.)
۰۰۹	-	۸۶/۹ و ۴۹/۷۷ ۱۲۶* و ۴۳/۷	
۱۰۵	-	۴۸/۷	
۰۰۶	-	۹۰	
۷۰۱۱۰	-	۱۰۳	
۰۳	۵۶/۴	-	
جمع و میانگین	(۶۲/۵)۴۳۷	(۷۰)۷۷۰	میانگین $67 \equiv 66/5$

جدول ۳-۴- مقاومت فشاری واحد ماسه سنگی با سختی کمتر (S) (دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲)

شماره گمانه	مقاومت فشاری تک محوری (آزمایشگاهی) MPa	مقاومت فشاری بار نقطه‌ای (آزمایشگاهی) MPa	یادداشت
۷۰۱۰۵	۲۳/۴	۱۸/۷	ضریب هم ارزی بار نقطه ای به فشار تک محوری ۲۱/۵ انتخاب شده است. $\sigma_{ci} = 21/5$ و $I_s (50)$
۰۰۳	۲۲/۵۷	۲۱/۶	
۷۰۱۰۷	۴۱ و ۲۲	-	
۰۰۹	۳۷	۲۴/۸ و ۳۱/۵	
۰۰۲	-	۲۰/۴	
۰۰۶	-	۱۶/۶ و ۲۶/۴۶	
۷۰۱۰۶	-	۳۴/۶	
۷۰۱۱۰	-	۲۴/۸	
۰۱۰	-	۳۴/۲	
۰۱۱	-	۳۷	
۰۱۲	-	۳۷	
جمع	۱۴۵/۹	۳۲۷	
میانگین	۲۹/۱۸	۲۷/۲۵	میانگین کلی ۲۸

۳-۳-۲- برآورد مقدار ضریب هم ارزی $I_s (50)$ و σ_{ci}

به علت اینکه در تهیه نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (σ_{ci}) سنگ نیاز به

دقت زیادی دارد، برای برآورد مقاومت فشاری تک محوری از آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای استفاده

می‌شود که مقاومت در مقابل بار نقطه‌ای از معادله زیر محاسبه می‌شود (فاروق حسینی، ۱۳۷۹).

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

P = بار لازم برای شکستن نمونه و D_e = قطر مغزه معادل (۵۴ میلیمتر)

مقدار I_s بر حسب میزان D_e تغییر می‌کند بنابراین برای بدست آوردن یک مقاومت واحد از

ضریب هم ارزی استفاده می‌شود. ضریب هم ارزی نمونه‌ای با قطر ۵۰ میلیمتر عبارت است از

$$I_{s(50)} = F I_s \quad \text{که در آن} \quad F = \left[\frac{D_e}{50} \right]^{0.45}$$

می‌باشد (فاروق حسینی، ۱۳۷۹). نتیجه ۵ آزمایش بر

روی ۵ مورد قطر مغزه‌های مورد نظر، میانگین عددی مقدار ضریب هم ارزی برابر ۲۱/۵ بدست

می‌آید (جدول ۳-۵).

جدول ۳-۵- نتیجه آزمایشگاهی هم ارزی σ_{ci} و I_s (۵۰) (دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲)

شماره گمانه	ژرفای نمونه (متر)	σ_{ci} (MPa)	I_s مقدار (۵۰) (MPa)	ضریب هم ارزی	یادداشت
۷۰۱۰۷	۱۲/۳-۱۱	۵/۵۶	۲۷/۸	۵	پذیرفتنی
	۲۳-۲۱	۱/۶۹	۲۲	۱۳	نیست
	۲۳-۲۱	۱/۸۱	۲۳/۲	۱۲/۸	
	۲۳-۲۱	۳/۹	۴۱/۴	۱۰/۶	
۰۱۰	۱۶/۵	۳/۰۸	۵۸/۴	۱۸/۹	-
۷۰۱۰۶	۱۵/۵-۱۵	۲/۲۲	۲۴	۱۰/۸	-
۰۰۹	۱۲/۳	۲/۳۷	۳۷	۱۵/۶	-
	۱۲/۶	۱/۵	۳۷	۲۴/۶	-
۷۰۱۰۵	۱۳-۱۲	۰/۸۹	۲۳/۴	۲۶/۳	-
۷۰۱۰۴	۱۳-۱۱	۰/۴۷	۱۰/۵	۲۲/۳	-

۳-۴- آزمایش‌های سه محوری

از مجموع ۱۲ نمونه فرستاده شده به آزمایشگاه، آزمایش سه محوری برای ۴ به علت خردشدگی و هوازگی شدید نمونه‌ها، امکان‌پذیر نبوده و بنابراین برای ۸ مورد آزمایش و مقدار زاویه اصطکاک درونی و نیروی چسبندگی بدست آمده است (جدول ۳-۶). می‌توان دامنه تغییر آنها را برای واحدهای اصلی سنگ‌ها به صورت زیر در نظر گرفت (دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲):

الف) شیل‌ها (بطور کلی)

- زاویه اصطکاک درونی: ۲۶-۴۵ درجه

- نیروی چسبندگی: ۰/۵-۴/۵ مگاپاسکال

ب) ماسه سنگ با سختی کمتر (s)

- زاویه اصطکاک درونی: ۳۵-۳۷ درجه

- نیروی چسبندگی: ۲/۷-۱۲/۵ مگاپاسکال

پ) ماسه سنگ سخت (ss)

- زاویه اصطکاک درونی: ۵۴-۵۵ درجه

- نیروی چسبندگی: ۶-۱۲ مگاپاسکال

ت) ماسه سنگ شکننده (sf)

- برای ماسه سنگ شکننده آزمایش سه محوری امکان‌پذیر نبوده است و بنابراین مقدار

پارامترهای شکست سنگ را با توجه به این که ماسه سنگ شکننده ضعیف‌ترین خواص

مکانیک سنگی در گروه را دارا است، می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت.

- زاویه اصطکاک درونی: مانند شیل‌ها کمترین مقدار ۲۶ درجه
 - نیروی چسبندگی: در حد میانی شیل‌ها و ماسه سنگ با سختی کمتر، ۰/۵-۲/۷ مگاپاسکال
- مقدار پارامترهای بدست آمده برای سنگ، بی‌تردید خیلی بیشتر از همین پارامترها برای توده سنگ می‌باشند که بر پایه رده بندی‌های مهندسی توده سنگ برآورد می‌شوند.

جدول ۳-۶- نتیجه آزمایش‌های سه محوری روی مغزه‌های گمانه‌ها در خط آزادی-صفه (مترو اصفهان)
(دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲)

ردیف	شماره گمانه	واحد لیتولوژی		زاویه اصطکاک درجه	چسبندگی (MPa)	بارگذاری پایایی σ_3 (MPa)
		سنگ مورد آزمایش				
۱	۷۰۱۰۹	shd		۴۵	۴/۵	۱۰-۷/۵-۵-۲/۵-۱/۵
۲		sh		۲۶	۰/۵	۱۵-۱۲/۵-۷/۵-۵-۲/۵
۳		shd		۴۴	۱/۵	۸-۶-۴-۲
۴	۷۰۱۰۷	ss		۵۴	۶	۱۵-۱۰-۲/۵
۵	۷۰۱۰۶	ss		۵۵	۱۲	(۱)۷/۵-۵-۱/۵
۶	۷۰۱۰۵	ss		۳۷	۲/۷	۱۰-۷/۵-۱/۵
۷	۷۰۱۱۱	s/sh		۳۵	۱۲/۵	(۱)۱۰-۷/۵-۵-۳/۵
۸	۰۰۷ (۳)	s/sh		۵۲	۰/۸۶	۶-۴-۲
۹	۷۰۱۱۰	s		-	-	($\sigma_1 = ۴۹/۵$)-۵
۱۰	۷۰۱۰۴	sh/s		-	-	($\sigma_1 = ۲۵/۵$)-۲/۵
۱۱	۰۱۰	ss		-	-	($\sigma_1 = ۱۰۰, ۶۲/۴$)-۱/۲۵
۱۲	۰۱۱	s/sh		-	-	($\sigma_1 = ۶۴$)-۲/۵

یادداشت‌ها: ۱- نیروی چسبندگی به احتمال زیاد مقدار کمتری است.
۲- نیروی چسبندگی ۰/۸۶ مگاپاسکال تردید آمیز است.

(۳) آزمایشگاه شرکت خاک و سنگ نمونه‌های دیگر در
آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس

۳-۵- آزمایش‌های برش مستقیم

نمونه‌هایی که برای آزمایش برش مستقیم انتخاب شده‌اند، بسیار محدوداند و روی هم ۷ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است و آزمایشات در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفته است در جدول (۳-۷) نتیجه آزمایش‌های برشی مستقیم روی مغزه‌های حفاری در خط آزادی-صفه آورده شده است (دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲).

- زاویه اصطکاک درونی از ۱۵ درجه تا ۳۴ درجه تغییر کرده است. از آنجا که توده سنگ‌های میزبان تونل‌های مترو بطور کلی از چند نوع سنگ اصلی شیل (sh)، ماسه سنگ سخت (ss)، ماسه سنگ با سختی کمتر (s) و ماسه سنگ شکننده (sf) تشکیل شده‌اند، بنابراین ارزیابی پایداری‌ها به علت ناپیوستگی، زاویه اصطکاک به طور میانگین عددی ۲۶ درجه می‌شود که برای ساده‌تر شدن کارها و همچنین بدترین حالت‌ها، مقدار آن ۲۰ درجه پیشنهاد می‌شود.

- در مورد پارامترهای مقاومت برشی توده سنگ‌ها با روش هوک و براون (۱۹۹۷) در دست داشتن دست کم ۸ نتیجه آزمایش‌های سه محوری بخش کردن مقاومت فشاری به صورت هم اندازه ضروری بوده که این چنین داده‌هایی در دسترس نبوده تا پارامترهای مقاومت برشی توده سنگ بدست آید.

جدول ۳-۷- نتیجه آزمایش‌های برشی مستقیم روی مغزه‌های حفاری در خط آزادی-صفه
(دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲)

ردیف	شماره گمانه	زرزفای نمونه (متر)	واحد لیتولوژی		زاویه اصطکاک درجه	چسبندگی (Kpa)	یادداشت بارگذاری
			s/sh	سنگ مورد آزمایش			
۱	۷۰۱۰۳	۱۶	s/sh	ss	۳۴	۶۰	از ۳ مقدار بارگذاری
۲	۷۰۱۰۴	۱۲-۱۱	s/sh	s	۲۵	۴۰	از ۴ مقدار بارگذاری
۳	۷۰۱۰۶	۱۵-۱۴	s/sh	sh	۲۱	۲۰	از ۴ مقدار بارگذاری
۴	۷۰۱۰۷	۲۳-۲۱	s/sh	s	۱۷/۵	۴۰	از ۴ مقدار بارگذاری
۵	۷۰۱۱۰	۱۶-۱۵	sib	s	۱۵	۶۰	از ۴ مقدار بارگذاری
۶	۰۱۱	۱۴/۷-۱۴/۵	-	-	۳۵	۲۵۰	از ۳ مقدار بارگذاری
۷	۰۱۱	۱۵/۴-۱۵/۲	-	-	۲۵	۱۵۰	از ۳ مقدار بارگذاری

با توجه به نتیجه آزمایش‌های انجام شده برای واحدهای اصلی سنگ‌ها پارامترهای شکست

به شرح زیر انتخاب می‌شود.

الف) ماسه سنگ سخت (SS):

- زاویه اصطکاک داخلی: ۳۴-۳۵ درجه
- نیروی چسبندگی: ۶۰ کیلو پاسکال

ب) ماسه سنگ با سختی کمتر (S):

- زاویه اصطکاک داخلی: ۱۵-۲۵ درجه
- نیروی چسبندگی: ۶-۴۰ کیلو پاسکال

پ) شیل‌ها (sh) به طور کلی:

- زاویه اصطکاک داخلی: ۲۵-۳۵ درجه
- نیروی چسبندگی: آزمایش به علت ستبرای خیلی کم شیل‌ها روی لایه‌بندی انجام شده است و بنابراین مقدار آن ۱۵۰-۲۰۰ کیلو پاسکال به دست آمده است که در مورد درزه‌ها مقدار آن خیلی کمتر خواهد بود (۳۰-۴۰ کیلو پاسکال).

ث) ماسه سنگ شکننده (sf):

- زاویه اصطکاک درونی و نیروی چسبندگی به علت تیغه‌ای بودن سنگ‌ها که همان مقدار پیشنهادی که برای شیل‌ها نوشته شد در نظر گرفته می‌شود ۲۵ درجه و ۱۵-۲۰ کیلو پاسکال

کیلو پاسکال

۳-۶- آزمایش‌های مقاومت کششی (آزمایش برزلی)

روی ۹ نمونه از مغزه‌های بدست آمده، آزمایش مقاومت کششی انجام شده که نتیجه آن در

جدول (۳-۸) ارائه شده است (دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲).

جدول ۳-۸- نتیجه آزمایش‌های مقاومت کششی سنگهای سازند شمشک در خط مترو اصفهان

(دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲)

ردیف	شماره گمانه	زرزفای نمونه (متر)	واحد لیتولوژی	مقاومت کششی (MPa)	پیشنهاد مقاومت کششی (MPa)
			سنگ مورد آزمایش		
۱	۷۰۱۰۲	۱۳-۱۲	s/sh s	۳/۵	۳/۵
۲	۷۰۱۰۴	۱۲-۱۱	s/sh sh	۱/۱۵	۱/۱۵
۴-۳	۷۰۱۰۵	۱۳-۱۲	s/ss s	۵/۲, ۱/۶۵	دو نمونه از یک مغزه=۳/۴
۵	۷۰۱۰۶	۲۴/۸-۲۴	sshc ss	۵/۳	۵/۳
۶	۷۰۱۰۷	۲۳-۲۱	s/sh ss-s	۵	۵
۷	۷۰۱۰۹	۱۷-۱۶	Sd sh	۵/۵۳, ۴/۳, ۳/۳۶	سه نمونه از یک مغزه=۴/۴
۸	۷۰۱۰۹	۲۱-۲۰	Sd sh	۵/۳	۵/۳
۹	۷۰۱۰۹	۲۷-۲۶	Sd sh	۲/۹, ۱/۳	دو نمونه از یک مغزه=۲/۱

با توجه به نوع سنگ‌ها و تعداد آزمایش‌ها، مقاومت کششی سنگ‌های اصلی به صورت زیر پیشنهاد

می‌شود:

الف) ماسه سنگی با سختی زیادتر (SS)

• مقاومت کششی آزمایشگاهی، ۵-۳ مگاپاسکال

ب) ماسه سنگ با سختی کمتر (S)

• مقاومت کششی آزمایشگاهی، ۳/۴۵ مگاپاسکال (۵/۲-۱/۶۵)

پ) شیل‌ها: روی شیل‌ها آزمایش‌های بیشتری انجام شده است و از یک مغزه تا ۳ آزمایش قابل اجرا بوده است. میانگین عددی ۴ نتیجه آزمایش شماره‌های ردیف ۲، ۷ و ۹ مقادیر ۱/۳-۲/۴ مگاپاسکال
ت) ماسه سنگ شکننده (sf): مقدار مقاومت کششی آن در حد شیل‌های ردیف ۹ پیشنهاد می‌شود
(۲/۹-۱/۳) مگاپاسکال.

۳-۷- آزمایش‌های دوام^۱

این آزمایش در دو چرخه ۱۰ دقیقه ای روی ۱۰ نمونه مختلف از واحدهای توده سنگی انجام شده و به طوری که در جدول (۳-۹) نشان داده شده در پایان چرخه دوم کاهش چندانی در نمونه‌ها بوجود نیامده است (کمترین آنها تا ۹۵/۳ درصد دوام را می‌رساند)، بنابراین توده سنگ میزبان تونل از دیدگاه دوام در محیط اجرایی وضعیت خوبی دارد (دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲).

۳-۸- آزمایش‌های آماس پذیری سنگ‌ها (دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲)

در توضیح ویژگی‌های توده سنگ‌های میزبان تونل‌های مترو مشخص گردید که بطور کلی لایه‌های شیلی چیره‌ترین سنگ‌ها در سازند شمشک می‌باشند، نتیجه آزمایش‌ها در جدول (۳-۱۰)

1 - Slake durability

آورده شده است.

جدول ۳-۹- دوام سنگهای میزبان تونل‌های مترو (دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲)

ردیف	شماره گمانه	زرزفای نمونه (متر)	واحد لیتولوژی		ضریب دوام (چرخه دوام)
			کاهش وزن (گرم)	سنگ مورد آزمایش	
۱	۷۰۱۰۲	۱۳-۱۲	۲۰/۹۳	s/sh s	۹۶/۱۵
۲	۷۰۱۰۳	۱۷-۱۶	۱۵/۲	s/sh s	۹۷/۲۸
۳	۷۰۱۰۴	۱۲-۱۱	۲۹/۶	s/sh	۹۴/۷۵
۴	۷۰۱۰۴	۱۲-۱۱	۱۰/۵	s	۹۷/۹۱
۵	۷۰۱۰۵	۱۳-۱۲	۲۳/۶	Ss ss	۹۵/۲۹
۶	۷۰۱۰۶	۱۰-۱۴	۸/۵	s/sh ss	۹۸/۰۸
۷	۷۰۱۰۹	۱۷-۱۶	۷/۶	Sh	۹۸/۷۳
۸	۷۰۱۰۹	۲۱-۲۰	۷/۰۲	sh	۹۷/۳
۹	۷۰۱۰۹	۲۷-۲۶	۲۸/۳۴	sh	۹۴/۳۷
۱۰	۷۰۱۰۷	۲۱-۲۳	۴۵/۴	s/sh ss-s	۹۹/۱۹
۱۱	۰۶	۳۰/۸-۲۹/۸	-	shd	۹۹/۷
۱۲	۰۱۳	۲۱/۱۰-۲۰/۳	-	shdb	۹۸/۴

جدول ۳-۱۰- نتیجه آزمایش‌های آماس پذیری سنگهای میزبان تونل‌های مترو
(دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲)

ردیف	شماره گمانه	ژرفای نمونه (متر)	واحد توده سنگی	مقدار تورم (%)	فشار تورم (Kg/cm ²)
۱	۰۱۴	۸-۷	shl	۰/۲	-
۲	۰۱۵	۱۳/۶	shd	۰/۱	-
۳	۰۱۵	۲۱/۶-۲۰/۶	shd	۰/۹	۰/۵
۴	۰۱۵	۲۷-۲۶	shd	۰/۶	۰/۳

با توجه به نتیجه آزمایش‌ها به خوبی مشخص می‌شود که شیل‌های تیره تا سیاه رنگ آماس پذیری بیشتری دارند و فشار تورم آنها ۰/۶-۰/۹ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است که به منظور ارتباط بیشتر، مقدار آن را برای شیل‌های سیاه رنگ (و تیره) که در برش ساختاری با نشانه‌های (shb) و (shdb) مشخص شده‌اند فشار تورم حدود ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع پیشنهاد می‌شود.

۳-۹- آزمایش‌های فیزیکی

برای مشخص کردن ویژگی‌های کمی فیزیکی سنگ‌ها آزمایش‌های فیزیکی بر روی ۴۵ نمونه مناسب صورت گرفته است که مقدار پارامترهای چگالی، جذب آب و روزنگی^۱ نمونه‌ها در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ آزمایش شده که نتیجه آن در جدول (۳-۱۱) نشان داده شده است (دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲).

^۱- porosity

جدول ۳-۱۱- ویژگی‌های فیزیکی سنگهای سر راه تونل‌های مترو (خط صاف-آزادی)

(دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، ۱۳۸۲)

ردیف	شماره گمانه	زرفای نمونه (متر)	واحد توده سنگی	γ_w (Kg/m ³)	W.abs. (%)	روزنگی (%)	تعداد آزمایش برای میانگین
۱	۷۰۱۰۱	۷	sh/s	۲۶	۲/۱۶	۵/۶	۲
۲	۷۰۱۰۱	۱۴	shb	۲۶/۵۹	۰/۹	۲/۴۲	۲
۳	۷۰۱۰۳	۱۷-۱۶	s/sh	۲۵/۷	۲/۵۳	۶/۴۶	۲
۴	۷۰۱۰۴	۷	sh	۲۵/۸۲	۲/۴۳	۶/۲۴	۴
۵	۷۰۱۰۴	۱۲-۱۱	s/sh	۲۵/۹۲	۲/۰۹	۵/۴	۴
۶	۷۰۱۰۶	۱۵-۱۴	s/sh	۲۵/۹۷	۱/۶۹	۴/۴	۳
۷	۷۰۱۰۷	۱۲/۳-۱۱	s/sh	۲۵/۹۷	۰/۵۷	۱/۴۹	۳
۸	۷۰۱۰۹	۱۷-۱۶	sh	۲۶/۱	۱/۴۶	۳/۸۱	۲
۹	۷۰۱۱۰	۰/۵-۵	sib	۲۵/۷۲	۱/۳۹	۲/۵۸	۳
۱۰	۷۰۱۱۱	۱۸-۱۷	sh	۲۶/۵۸	۳/۸۹	۱۰/۱۴	۲
۱۱	۷۰۱۱۱	۲۵/۵-۲۵	s/sh	۲۶/۵۸	۰/۵۴	۱/۴۵	۲
۱۲	۰۰۲	۱۴-۱۳	s	۲۷/۲-۲۵/۹۷	۳/۸-۰/۴	۹-۱/۱	۳
۱۳	۰۰۲	۱۵/۵-۱۵	ss	۲۷/۲-۲۵/۹۷	۳/۸-۰/۴	۹-۱/۱	۳
۱۴	۰۰۲	۱۶/۲-۱۶	ss	۲۷/۲-۲۵/۹۷	۳/۸-۰/۴	۹-۱/۱	۳
۱۵	۰۰۴	۱۱/۵-۱۱	s	۲۳/۶	-	۶/۵	۱
۱۶	۰۰۶	۳۰/۸-۲۹/۸	shd	۲۶/۱	-	۰/۸	۱
۱۷	۰۰۸	۱۲/۵۵-۱۲/۴					
۱۸	۰۰۸	۱۴/۵-۱۴	s/sh	۲۵/۸-۲۳/۱	-	۷/۸-۰/۶	۳
۱۹	۰۰۸	۳۶/۳					
۲۰	۰۱۰	۲۴/۵-۹	s	۲۶/۴۳-۲۶	۰/۵۳-۰/۱۵	۱/۴۲-۰/۴	۴
۲۱	۰۱۱	۲۴/۵-۱۶/۳	ss	۲۶/۵۲-۲۶	۱/۶۴-۰/۱۵	۲/۷-۰/۴	۷
۲۲	۰۱۲	۱۵/۲-۹/۵	ss	۲۶/۲۲-۲۶	۰/۹۶-۰/۴	۲/۵-۱/۱	۲
۲۳	۰۱۴	۱۱/۱-۷	shd	۲۶-۲۵/۳	۳/۸-۱/۵	۹-۳/۹	۲
۲۴	۰۱۵	۱۴/۶-۱۳/۶	shl	۲۵/۷۸	۳/۱	۷/۹۵	۱

فصل چهارم

پارامترهای ژئومکانیکی و رده بندی

مهندسی توده سنگهای مسیر تونل

۴-۱- مقدمه

سراسر تونل‌های مترو و بخش اصلی فضای ایستگاه‌های آن درون توده سنگ حفاری خواهند شد که به طور کلی از لایه‌های شیلی، ماسه‌سنگی با تنوع کم‌اند و در زمین‌شناسی ایران به نام سازند شمشک معرفی شده‌اند. در رده‌بندی مهندسی توده سنگ‌ها به طور کلی ناپیوستگی‌ها و دریافت ویژگی‌های زمین‌شناسی آنها پایه‌ای‌ترین کار است و بنابراین از نتیجه بررسی‌های آماری ناپیوستگی‌ها مطرح شده در فصل سوم استفاده شده است. سپس در ادامه فصل با استفاده از رده‌بندی مهندسی توده سنگ، پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌ها برآورد شده است.

در این فصل دو رده‌بندی مهندسی RMR و GSI بکار برده شده و از نتیجه آنها پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها بدست آمده است. نکته مهم در این زمینه این است که پاسخ‌های دو روش یادشده در حالت کلی با هم نابرابر است و انتخاب هر یک از آنها به‌تنهایی مناسب نمی‌باشد. به این علت به‌منظور معرفی مناسب‌تر پارامترهای مورد نیاز، روش وزن‌دهی و آنگاه تعیین پارامتر مورد نظر بکار برده شده است.

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

در این رده بندی، پارامترهای ۶ گانه ای که مورد امتیازدهی قرار می گیرند عبارتند از (Bieniawski, 1989):

(۱) مقاومت فشاری سنگ سالم

توده سنگ‌های سر راه تونل به طور کلی از سه نوع سنگ شیل، ماسه سنگ و ماسه سنگ شکننده درست شده، برای انتخاب مقدار مقاومت کلی واحد مورد رده بندی، با در نظر گرفتن مقدار درصد هر نوع سنگ در توده سنگ انتخاب شده است.

(۲) مقدار RQD

در حالت کلی مقدار این پارامتر در گمانه‌ها و مغزه‌های بدست آمده اندازه گیری می شود اما در این ناحیه به علت نهاد لیتولوژی توده سنگ در بیشتر گمانه‌ها، مقدار RQD واقعی بدست نیامده است و به طوری که مقدار آن در برخی از قسمت‌ها نزدیک به صفر است. در چنین شرایطی برای امتیازدهی به RQD از دو روش (الف) و (ب) که در ادامه توضیح داده شده، می توان استفاده کرد. (الف) روش بنیادوسی در مورد $RQD=0$ امتیاز آن $R=5$ در نظر گرفته شده که هم ارز مقدار $RQD=10$ است (Bieniawski, 1989).

(ب) روش پالمستروم که با توجه به مقدار فاصله داری ناپیوستگی‌ها و تعداد آنها در واحد حجم (JV) و از رابطه $RQD = 115 - 33 \times JV$ محاسبه شده است. در این برآورد و محاسبه، چنین انگاشته شده که دست کم دو تا از ناپیوستگی‌ها در گوشه مکعب واحد حجم، یکدیگر را قطع کرده‌اند و لایه بندی نیز منظور شده است (Palmstrom, 1996).

(۳) فاصله داری درزه‌ها و ضخامت میانگین تک لایه‌ها

امتیاز این دو پارامتر به روش حداقل مقدار فاصله‌داری مورد امتیازدهی قرار گرفته است و آنگاه مقدار انتخابی با در نظر گرفتن محافظه‌کاری در نامناسب‌ترین حالت پیشنهاد شده است (Bieniawski, 1989).

(۵) وضعیت ناپیوستگی‌ها

این پارامتر اصلی برای امتیازدهی به ۵ پارامتر کوچکتر درازا، بازشدگی، هوازدهی، ماده پر کننده و زبری سطح درزه‌ها تبدیل شده و امتیاز هر یک از این پارامترهای کوچکتر برآورد و مجموع آنها برای وضعیت ناپیوستگی‌ها بکار گرفته شده است.

(۵) آبهای زیرزمینی

وجود آب زیرزمینی در محیط‌کاری در صورتی که نفوذپذیری محیط زیاد باشد، اهمیت زیادی دارد. در توضیح پارامترهای زمین شناسی مهندسی به این موضوع اشاره شده که شیل‌ها به طور کلی نفوذپذیری خیلی پایینی دارند و برای ماسه سنگها نفوذپذیری متوسطی در نظر گرفته شده است. به این ترتیب امتیاز پارامتر آبهای زیرزمینی در رده‌بندی مهندسی RMR، به صورت قطره‌ای^۱ تا جریان آب^۲ در نظر گرفته شده که با توجه به مقدار درصد شیل‌ها و ماسه‌ها متغیر می‌باشند و در مورد واحدهای شیلی در بیشتر حالت‌ها نفوذ ناپذیر^۳ بشمار می‌آیند. بی‌تردید در آن لایه‌های ماسه سنگی نیز وجود دارد که می‌توانند نفوذپذیری را افزایش دهند و به همین

1 - Dripping
2 - Water Flow
3 - Impermeable

علت در واحدهای شیلی مقدار $R = 5$ ، در واحدهای دیگر (3 و 2 و 1) انتخاب شده است، که به مقدار ماسه سنگ‌ها بستگی دارد.

نکته: امتیاز 5 پارامتر یاد شده با هم به نام امتیازهای پایه‌ای در رده‌بندی مهندسی با روش بنیادوسکی نامبرده شده‌اند که با نشانه BRMR آورده شده است.

(6) جهت‌داری ناپیوستگی‌ها

این پارامتر با توجه به چگونگی پیشروی تونل به سمت توده سنگ درزه‌دار، مقدار شیب لایه‌ها و ناپیوستگی‌ها انتخاب می‌شود. امتیاز پارامتر 6 از BRMR کم شده و تحت عنوان TRMR نامیده می‌شود (Bieniawski, 1989).

4-3- روش پیشنهادی هوک و براون

در سال 1997 پیشنهاد اصلی برای رده‌بندی مهندسی توده سنگ به نام شاخص مقاومت زمین‌شناسی (Geological Strength Index=GSI) توسط هوک و براون ارائه شد. در این رده‌بندی الگوهایی از توده سنگ‌ها معرفی شده که بر پایه ناپیوستگی‌ها و چین خوردگی آنها است و به وضعیت توده سنگ در برونزدگی‌ها به ویژه هوازدگی و زبری آنها نیز توجه شده است. به این ترتیب، مجموعه سنگ‌های رسوبی، آذرین و دگرگونی و ترکیب آنها با هم در 25 گروه توده سنگی جای داده شده و دامنه تغییر مقدار GSI آنها در نمودارهایی آورده شده است. در بررسی توده سنگ سازند شمشک سر راه تونل‌ها و ایستگاه‌های مترو اصفهان، مقدار شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده سنگ‌های میزبان سازه‌های مترو با توجه به مقادیر محاسبه شده توسط نرم‌افزار Roclab، مشخص شده است.

۴-۴- رده بندی مهندسی توده سنگ‌ها در فاصله میان ایستگاه آزادی و صفه

۴-۴-۱- فاصله آزادی - دانشگاه

در حالت کلی می‌توان توده سنگ‌های شیلی و J_{ssh} را در نظر گرفت که امتیاز آن‌ها در رده بندی‌های مورد بحث به ترتیب $BRMR=33-32$ ، $TRMR=29-27$ و $GSI=50-35$ است. در قسمت‌های بالایی توده سنگ‌ها در ایستگاه‌ها از امتیازها حدود ۲ تا ۵ واحد کم می‌شود.

۴-۴-۲- دانشگاه - کارگر

حالت کلی توده سنگ J_{ssh} است و ماسه سنگ‌ها بیشتر از شیل‌ها می‌باشند، که s/sh به-عنوان حالت کلی می‌توان در نظر گرفت. امتیاز کلی در رده بندی‌های دو گانه یاد شده به ترتیب $BRMR=37-35$ ، $TRMR=35-32$ و $GSI=53-50$ برآورد شده است. برای قسمت‌های هوازده در این مورد نیز از مقدار آن‌ها ۲ تا ۵ مقدار کم می‌شود.

۴-۴-۳- کارگر - خوابگاه

حالت کلی لیتولوژی سازند شمشک بصورت J_s است که مقدار درصد شیل‌ها و ماسه سنگ‌ها کم و بیش به یک اندازه می‌باشد و ماسه سنگ‌های با مقاومت کمتر مقدار بیشتری دارند (واحد SS) بنابراین امتیازهای رده بندی مهندسی به صورت $BRMR=37-36$ ، $TRMR=36-35$ و $GSI=55-53$ که مقادیر فوق برای قسمت‌های هوازده از مقدار یاد شده ۲ - ۵ واحد کمتر خواهد شد.

۴-۴-۴- خوابگاه - صفه

حالت کلی Jst می‌باشد که مقدار درصد شیل و ماسه سنگ کم و بیش به یک اندازه است اما ماسه سنگ‌های SS بیشتراند و شیل‌های سیاه گسترش زیادتری دارند.

$$GSI=53-50 \text{ و } TRMR=35-32, BRMR=37-35$$

۴-۵-۵- نتیجه کلی رده‌بندی مهندسی توده سنگ‌ها و خاک‌ها

بر پایه مجموعه ویژگی‌های توده سنگ‌های واقع در بالای خط مترو از میدان آزادی تا ترمینال صفه روی هم ۱۵ واحد لیتولوژی یا توده سنگی معرفی شد که با دو روش پیشنهادی بنیائوسکی (۱۹۸۹) و هوک و براون ۱۹۹۷، مورد رده‌بندی مهندسی قرار گرفتند.

۴-۶- برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های میزبان سازه‌های مترو با استفاده از

روش برآورد RMR و GSI

در این بخش روابط مورد نیاز برای برآورد با دو روش RMR و GSI آورده شده است و با توجه به اینکه نتایج پارامترهای بدست آمده از هر دو روش با یکدیگر فرق دارد، پارامترهای ژئومکانیکی واحدهای سنگی با هر دو روش محاسبه شده است. سپس در ادامه به مقایسه نتایج بدست آمده از هر دو روش پرداخته شده است.

۴-۶-۱- روابط مورد نیاز برای برآورد پارامترهای ژئومکانیکی با روش RMR

(۱) رابطه‌های محاسبه مقاومت فشاری توده سنگ شامل:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \times \exp\left(\frac{RMR-100}{18.75}\right) \quad (a) \quad (\text{Zhang, L., 2005})$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \times \exp\left(\frac{RMR-100}{13.07}\right) \quad (b) \quad (\text{Zhang, L., 2005})$$

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (c) \quad \text{حالت کلی (فاروق حسینی، ۱۳۷۹)}$$

(۲) رابطه‌های محاسبه مدول دگر شکلی:

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40} \quad (\text{GPa}) \quad (a) \quad (\text{Serafim and Pereira, 1983})$$

$$E_m = 0.0736e^{0.0755RMR} \quad (\text{GPa}) \quad (b) \quad (\text{Zhang, 2005})$$

(۳) رابطه برآورد مقاومت کششی:

$$\sigma_{tm} = \sigma_t \times \exp\left(\frac{RMR - 100}{27}\right) \quad (a) \quad (\text{Bieniawski, 1989})$$

$$\sigma_t = 0.053 + 0.07\sigma_{ci} \quad (b) \quad (\text{Zhang, 2005})$$

(۴) رابطه سینگ برای تقریب مدول برشی:

$$G = \frac{E}{10} \quad (a) \quad (\text{Zhang, 2005})$$

۴-۶-۲- روابط مورد نیاز برای برآورد پارامترهای ژئومکانیکی با روش GSI

(۱) معیارهای هوک و براون: m_i پارامتر مربوط به خصوصیات اصطکاکی مواد تشکیل دهنده سنگها می‌باشد و تأثیر مهمی بر روی خصوصیات مقاومتی سنگها دارد و از روی آزمایشات سه محوره بدست می‌آید، D عبارت است از روش حفاری با فرض اینکه حفاری بصورت مکانیکی یا انفجاری انتخاب شود.

$$m_r = m_i \times \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (a)$$

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

(۵) نمودارهای ϕ ، C : مقدار پارامترها برای حالت توده سنگ با روباره کم تا متوسط مناسب

می‌باشد و با در نظر گرفتن وضعیت توده سنگ، روش حفاری و میدان تنش رابطه‌ی مربوط به برآورد

پارامترهای ϕ و C ارائه شده است (Hoek and Brown, 1997).

$$E = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \left(10^{\frac{(GSI - 10)}{40}}\right) \quad (۵) \text{ رابطه مدول دگرشکلی:}$$

$$\sigma_{cm} = f(mi, GSI, \sigma_{ci}) \quad (۶) \text{ رابطه مقاومت فشاری توده سنگ:}$$

$$\sigma_t = -\frac{S \cdot \sigma_{ci}}{M} \quad (۷) \text{ مقاومت کششی:}$$

(۸) مدول برشی: مانند روش RMR

۴-۶-۳- مقایسه و انتخاب پارامترها برای طراحی

نتیجه برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ در دو روش رده‌بندی مهندسی RMR و

GSI با یکدیگر تفاوت دارند و اختلاف‌ها به ویژه در مورد چسبندگی و مقاومت فشاری توده سنگ

زیاد است. با این حال به دلیل کامل‌تر بودن روش GSI مقادیر c و ϕ با در نظر گرفتن دو روش

RMR و GSI و سایر پارامترها بیشتر بر اساس روش GSI برآورد شده‌اند. در مورد برآورد مقدار

زاویه اصطکاک و نیروی چسبندگی از برنامه رایانه ای Roclab که روش جدیدتری است، استفاده

شده است. نتایج برای اعماق مختلف تونل و شیب‌های با ارتفاع مختلف در جداول آورده شده است.

با توجه به آنکه در روش GSI-2002 بسته به نوع کاربرد (تونل و یا ترانشه) مقادیر پارامترهای مقاومتی تفاوت خواهد کرد (Marions and Hoek, 2001). بنابراین نتایج مربوط به این روش در تمامی حالات در جداول آورده شده است. پارامترهای مورد استفاده جهت طراحی در تونل با (T) و در ترانشه با (S) نشان داده شده‌اند، اعماق تونل، ارتفاع تونل و ارتفاع ترانشه نیز در زیر خط کسری نمایش داده شده است.

۴-۶-۴- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های فاصله ایستگاه آزادی - صفه

پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های در بین فاصله ایستگاه آزادی تا صفه، بر اساس واحدهای توده سنگی بدست آمده است. واحدهای توده سنگی در بین فاصله ایستگاه‌ها عبارتند از: واحد sf, s, ss, sh و واحدهای ترکیبی: Ss, Ssh, Jst, Jss, Jssh, Js, S/sh, Sib, Sf/Sh, SS/s, Shb/Shbc و SShc که پارامترهای ژئومکانیکی هر کدام از دو روش RMR و GSI در جداول جداگانه‌ای آمده است.

۴-۶-۵- پارامترهای ژئومکانیکی واحد (sh)

با بهره‌گیری از رابطه‌های یاد شده مقدار پارامترهای محاسبه شده به روش RMR در جدول (۴-۱) آمده است. رابطه‌ها به ترتیب شماره‌گذاری شده‌اند (a, b و c) و بر اساس اهمیت رابطه‌ها وزن دهی شده‌اند. مقدار پارامترهای محاسبه شده به روش GSI در جدول (۴-۲) آورده شده‌است.

جدول ۴-۱- پارامترهای ژئومکانیکی واحد (sh) با توجه به RMR

ردیف	پارامتر توده سنگ	واحد	مقدار محاسبه شده از رابطه‌ها			توضیح ضروری
			a	b	c	
۱	زاویه اصطکاک درونی	درجه	۲۲	-	-	۲۱ برای زون هوازده
۲	نیروی چسبندگی	Kpa	۱۷۰	-	-	۱۵۵ برای زون هوازده
۳	مدول دگرشکلی	Gpa	۵	۱۰	-	۵ ^(۱) از آزمایش $E_i=5/5Gpa$
۵	مقاومت فشاری	Mpa	۰/۶۵	-	۰/۵	۰/۵۸ ^(۱) برای زون هوازده
۵	مقاومت کششی	Mpa	۰/۲۶	۰/۱۱	-	$\sigma_{ii}^{(۳)} = 5/6$ ۰/۲۱ ^(۱)
۶	مدول برشی	Gpa	-	-	-	۰/۳ ^(۳)
۷	مقاومت فشاری سنگ	Mpa	-	-	-	۲۲ زون هوازده=۱۸

توضیحات:

- ۱- وزن نتیجه رابطه b با توجه به کاربرد کمتر آن، نصف وزن رابطه های دیگر انگاشته شده است.
- ۲- مقدار مدول برشی به طور تقریبی و تجربی ۰/۱ مدول دگرشکلی است (Zhang, 2005).
- ۳- مقاومت کششی سنگ سالم از ۶ آزمایش گمانه‌های ۱۰۷ و ۱۰۹ برابر ۵/۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مقاومت کششی زون هوازده ۱/۳ مگاپاسکال.

جدول ۴-۲- پارامترهای ژئومکانیکی واحد (sh) با توجه به $GSI=50/31$ (هوازده/ هوانزده)

مقادیر مورد استفاده جهت طراحی (مقادیر برآورد شده براساس GSI2002)						واحد	پارامتر توده سنگ	ردیف
هوازده S_{20}	هوازده S_{10}	S_{20}	S_{10}^*	T_{20}^*	T_{10}			
۳۰	۳۵	۳۶	۵۱	۵۸	۵۳	درجه	زاویه اصطکاک	۱
۷۱	۵۸	۱۰۷	۷۵	۱۵۷	۱۱۷	Kpa	چسبندگی	۲
۰/۹	۰/۹	۱/۷	۱/۷	۲/۶	۲/۶	Gpa	مدول دگرشکلی	۳
۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۷۲	۰/۷۲	Mpa	مقاومت فشاری	۵
۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۲۶	۰/۲۶	Gpa	مدول برشی	۵
۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۳	Mpa	مقاومت کششی	۶
۱۸	۱۸	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	Mpa	مقاومت فشاری سنگ	۷
۷/۰,۱۵	۷/۰,۱۵	۷/۰,۲۵	۷/۰,۲۵	۷/۰,۸۲	۷/۰,۸۲	-	$\frac{mi}{mr}$	۸
۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۱۲	-	Str	۹
۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۲	-	نسبت پواسون	۱۰
۲/۷	۲/۷	۲/۷	۲/۷	۲/۷	۲/۷	g/cm_3	چگالی	۱۱

* T بیانگر تونل و S بیانگر ترانشه می‌باشد و اعداد اندیس نمایانگر عمق تونل و یا ارتفاع ترانشه می‌باشند.

۴-۶-۶- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ (ss) ماسه سنگ‌های سخت‌تر

در جدول (۳-۴) مجموعه پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ ماسه سنگی سخت‌تر با توجه

به $(\sigma_{ci} = 67 \text{ Mpa})$ ، آورده شده است.

جدول ۳-۴- پارامترهای ژئومکانیکی واحد (ss) با روش RMR

توضیح ضروری	میانگین	مقدار برآورد شده از رابطه‌ها BRMR=50/37			واحد	پارامتر توده سنگ	ردیف
		c	b	a			
هوازده- توده سنگ با هوازدهگی کم	۲۳ - ۲۵	-	-	۲۳ - ۲۵	درجه	زاویه اصطکاک	۱
هوازده/ توده سنگ با هوازدهگی کم	۱۸۵ - ۲۰۰	-	-	۱۸۵ - ۲۰۰	KPa	چسبندگی	۲
هوازده/ توده سنگ از ۵ آزمایش $E_i=12/10$	۵/۷ - ۶	-	۵/۷ - ۶/۷	۵/۶ - ۵/۷	GPa	مدول دگرشکلی	۳
قضاوت مهندسی	۱/۵ - ۲	۰/۱۵۶ - ۰/۱۶۳	۰/۱۷ - ۰/۱۵	۲ - ۳/۷	MPa	مقاومت فشاری	۵
-	۰/۱۵	-	-	۰/۱۵	MPa	مقاومت کششی	۵
از پیشنهاد سینک ۱۹۹۹ (Zhang, 2005)	۰/۱۵ - ۰/۲	-	-	-	GPa	مدول برشی	۶
نتیجه ۵ آزمایش	۵۸ - ۶۷	-	-	-	MPa	مقاومت فشاری سنگ	۷

جدول ۴-۴- پارامترهای ژئوتکنیکی واحد (SS) با توجه به $GSI=58/37$ (هوازده/هوازده)

مقادیر مورد استفاده جهت طراحی (مقادیر برآورد شده براساس GSI2002)						واحد	پارامتر توده سنگ	ردیف
هوازده S_{20}	هوازده S_{10}	S_{20}	S_{10}^*	T_{20}^*	T_{10}			
۵۰	۵۵	۵۵	۵۹	۶۵	۶۷	درجه	زاویه اصطکاک	۱
۱۸۹	۱۲۸	۲۹۰	۲۱۵	۳۹۵	۳۳۸	Kpa	چسبندگی	۲
۲/۳	۲/۳	۵/۷	۵/۷	۷/۲	۷/۲	Gpa	مدول دگرشکلی	۳
۰/۵۳	۰/۵۳	۱/۵	۱/۵۷	۳/۵	۳/۵	Mpa	مقاومت فشاری	۵
۰/۲	۰/۲	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۰/۷	Gpa	مدول برشی	۵
۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۶	Mpa	مقاومت کششی	۶
۵۸	۵۸	۶۷	۶۷	۶۷	۶۷	Mpa	مقاومت فشاری سنگ	۷
۱۹/۰,۵۹	۱۰,۵۹ ۱۹	۱۹/۱,۰۹	۱۹/۱,۰۹	۱۹/۲,۹۶	۱۹/۲,۹۶	-	$\frac{m_i}{m_r}$	۸
۰/۰۰۰۱	۱/۰۰۰۱ ۰	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳	-	Sr	۹
۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	-	نسبت پواسون	۱۰
۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	g/cm ³	چگالی	۱۱

* T بیانگر تونل و S بیانگر ترانشه می‌باشد و اعداد اندیس نمایانگر عمق تونل و یا ارتفاع ترانشه می‌باشند.

۴-۶-۷- ماسه سنگ شکننده^۱ (sf)

ویژگی‌های زمین شناسی مهندسی این ماسه سنگ در مقایسه با شیل‌ها، خیلی نامناسب‌تر است و در سطح برونزدها، خرده‌ریزهای کوچک به صورت‌های مختلف مدادی و ورقی است و به همین علت در گمانه‌ها تکه سنگ درخور بررسی و آزمایش بدست نمی‌آید.

از آنجا که وضعیت ناپیوستگی‌ها در توده سنگ به علت خرد شدگی چندان مشخص نیست، بنابراین برای رده‌بندی مهندسی آن و در نتیجه برآورد پارامترهای ژئومکانیکی، از روش GSI بهره‌گیری شده است. به این منظور ثابت‌های هوک و براون برای آن در نظر گرفته شده است.

به علت بدست نیامدن تکه‌های مناسب برای آزمایش‌های ژئوتکنیکی، تنها مقدار چگالی آن در حالت اشباع قابل اندازه‌گیری بوده که $2/6$ گرم بر سانتی‌متر مکعب بدست آمده است ($\gamma = 2/513$). در مورد نسبت پواسون، مقدار آن مانند واحد شیلی در نظر گرفته شده است ($\nu = 0/32$). در جدول (۴-۵) پارامترهای ژئومکانیکی واحد s به روش GSI آورده شده است. به این ترتیب پارامترهای ژئومکانیکی برآورد شده که مقدار آن‌ها در جدول (۴-۶) آورده شده است (شرکت الموت، ۱۳۸۲).

1 - sf = Friable Sandstone

جدول ۴-۵- پارامترهای ژئومکانیکی واحد S با روش $GSI = 37$

مقادیر مورد استفاده جهت طراحی (مقادیر برآورد شده براساس GSI2002)				واحد	پارامتر توده سنگ	ردیف
S_{20}	S_{10}^*	T_{20}	T_{10}^*			
۵۲	۵۹	۵۶	۶۱	درجه	زاویه اصطکاک	۱
۱۳۷	۹۱	۱۶۱	۱۱۵	Kpa	چسبندگی	۲
۱/۶	۱/۶	۲/۵	۲/۵	Gpa	مدول دگر شکلی	۳
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۷۶	۰/۷۶	Mpa	مقاومت فشاری	۵
۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱	Mpa	مقاومت کششی	۵
۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۲۵	Gpa	مدول برشی	۶
۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	Mpa	مقاومت فشاری سنگ	۷
۱۹/۰,۵۳	۱۹/۰,۵۳	۱۷/۱,۷۹	۱۷/۱,۷۹	-	$\frac{mi}{mr}$	۸
۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۹	-	Sr	۹
۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	-	نسبت پواسون	۱۰
۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	g/cm ³	چگالی	۱۱

T^* بیانگر تونل و S بیانگر ترانشه می‌باشد و اعداد اندیس نمایانگر عمق تونل و یا ارتفاع ترانشه می‌باشند.

جدول ۴-۶- پارامترهای ژئوتکنیکی واحد (sf) با توجه به $GSI=15$

مقادیر مورد استفاده جهت طراحی (مقادیر برآورد شده براساس GSI2002)				واحد	پارامتر توده سنگ	ردیف
S_{20}	S_{10}	T_{20}	T_{10}			
۲۱	۲۵	۳۸	۵۳	درجه	زاویه اصطکاک	۱
۳۶	۲۳	۵۳	۵۳	Kpa	چسبندگی	۲
۰/۳	۰/۳	۰/۵	۰/۵	Gpa	مدول دگر شکلی	۳
۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۵	۰/۰۵	Mpa	مقاومت فشاری	۵
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	Mpa	مقاومت کششی	۵
۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۵	Gpa	مدول برشی	۶
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	Mpa	مقاومت فشاری سنگ	۷
۱۱/۰,۱۰۳	۱۱/۰,۱۰۳	۱۱/۰,۵۲	۱۱/۰,۵۲	-	$\frac{mi}{mr}$	۸
$5/57(10^{-6})$	$5/57(10^{-6})$	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۷	-	Sr	۹
۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۲	-	نسبت پواسون	۱۰
۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲/۶	g/cm ³	چگالی	۱۱

۴-۶-۸- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های ترکیبی

در توضیح توده سنگ‌های سر راه تونل و ایستگاه‌های مترو به توده سنگ‌های ترکیبی اشاره شد که از مجموعه واحدهای یاد شده (sf, s, ss, sh) با ترکیب‌های مختلف تشکیل شده‌اند. این گونه واحدها که در فاصله میان ایستگاه‌های آزادی - صفا وجود دارند با مقدار درصد تقریبی سازندهای آنها آورده شده است. هر یک از این سازندها، پارامترهای ژئومکانیکی خود را دارند که ترکیبی از آنها را می‌توان برای توده سنگ مورد نظر محاسبه نمود. در جدول (۴-۷) پارامترهای چهار واحد اصلی مشخص شده است. هر یک از سازندهای اصلی با مقدار درصد در ترکیب P و مقدار پارامتر x مشخص است. محاسبه را می‌توان به این روش انجام داد که میانگین وزنی پارامتر با توجه به نسبت درصد سازندها برای توده سنگ در رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود که در آن مقدار x_i مقدار پارامتر توده سنگ سازند و p_i مقدار درصد توده در توده سنگ ترکیبی است. در جدول (۴-۸) پارامترهای توده سنگ‌های ترکیبی به روش میانگین وزنی آورده شده است.

$$X = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{i=n} [x_i \cdot p_i]^4 \quad (\text{Laubscher, 1993})$$

جدول ۴-۷- پارامترهای ژئومکانیکی سازندهای اصلی واحدهای ترکیبی

نوع سنگ	S/W_{20}^*	S/W_{10}^*	S_{20}	S_{10}	T_{20}	T_{10}	پارامترها
sh	۳۰	۳۵	۳۶	۳۸	۵۰	۵۲	φ (deg)
	۷۱	۵۸	۱۰۷	۸۰	۱۹۰	۱۷۰	c (kpa)
ss	۵۰	۵۵	۵۵	۵۶	۵۷	۵۸	φ (deg)
	۱۸۹	۱۵۰	۳۰۰	۲۸۰	۳۶۰	۳۸۰	c (kpa)
S	-	-	۵۵	۵۶	۵۵	۵۶	φ (deg)
	-	-	۱۳۷	۹۱	۱۸۰	۱۵۰	c (kpa)
Sf	-	-	۲۱	۲۵	۳۸	۵۳	φ (deg)
	-	-	۳۶	۲۳	۵۳	۳۵	c (kpa)

* توده سنگ هوازده در ترانشه

جدول ۴-۸- پارامترهای توده سنگ‌های ترکیبی براساس روش میانگین وزنی

نوع سنگ	پارامترها	T_{10}	T_{20}	S_{10}	S_{20}	S/W_{10}^*
JSSH	φ (deg)	۵۳	۵۱	۳۹	۳۷	۳۶
	c (kpa)	۱۹۲	۲۰۸	۱۰۸	۱۳۵	۶۵
JSSS	φ (deg)	۵۵	۵۵	۵۲	۵۰	۵۰
	c (kpa)	۲۳۵	۲۵۲	۱۵۷	۱۸۳	۹۱
JSt	φ (deg)	۵۵	۵۳	۵۱	۳۹	۳۸
	c (kpa)	۲۲۱	۲۳۳	۱۳۹	۱۶۶	۸۱
JS	φ (deg)	۵۵	۵۳	۵۱	۳۹	۳۹
	c (kpa)	۱۹۸	۲۱۵	۱۲۰	۱۵۰	۷۸
S/SH	φ (deg)	۵۸	۵۷	۵۶	۵۵	۵۳
	c (kpa)	۲۷۸	۲۸۳	۱۸۶	۲۱۵	۱۰۵
Sib	φ (deg)	۵۲	۵۰	۵۸	۵۶	۵۶
	c (kpa)	۳۳۸	۳۳۰	۲۵۳	۲۶۸	۱۲۸
Sf/SH	φ (deg)	۵۷	۵۲	۳۰	۲۶	۲۹
	c (kpa)	۵۶	۷۸	۳۵	۵۲	۳۱
Shb/,Shbc	φ (deg)	۵۳	۵۱	۳۹	۳۷	۳۵
	c (kpa)	۱۷۹	۱۹۸	۹۱	۱۱۸	۵۵
SS/S	φ (deg)	۵۷	۵۵	۵۵	۵۳	۵۳
	c (kpa)	۲۸۱	۲۸۳	۲۰۰	۲۲۷	۱۱۳
SShc	φ (deg)	۵۷	۵۵	۵۵	۵۳	۵۳
	c (kpa)	۲۸۰	۲۸۲	۲۰۰	۲۲۸	۱۱۵

T^* بیانگر تونل و S بیانگر ترانشه می‌باشد و اعداد اندیس نمایانگر عمق تونل و یا ارتفاع ترانشه می‌باشند.
 ** منطقه هوازه تا عمق حد اکثر ۱۰ متر می‌باشد و لذا فقط برای این عمق پارامترها انتخاب شده است.

فصل پنجم

روش های تحلیل پایداری تونل ها

۵-۱- مقدمه

معیارها و روش‌های طراحی در مهندسی تونل مبتنی بر سه روش کلی می‌باشد:

Empirical Methods	۱- روش‌های تجربی
Observational Methods	۲- روش‌های مشاهده‌ای
Analytical Methods	۳- روش‌های تحلیلی

که در این فصل به اختصار در مورد هر روش توضیح داده می‌شود.

۵-۲- روش‌های تجربی

در روش‌های تجربی پایداری تونل‌ها و معادن را با استفاده از تحلیل آماری مشاهدات زیرزمینی ارزیابی می‌کنند. طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ بهترین روش تجربی شناخته شده برای ارزیابی پایداری فضاهای زیرزمینی در سنگ هستند. در حقیقت در بسیاری از پروژه‌ها، طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها به عنوان تنها معیار برای طراحی سازه‌های پیچیده زیرزمینی تلقی می‌گردد. بیشتر تونل‌هایی که امروزه احداث می‌شوند از طبقه بندی سنگ‌ها برای طراحی و ارزیابی پایداری استفاده می‌کنند. مهمترین این طبقه‌بندی‌ها عبارتند از:

الف) طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR) که توسط بیناوسکی در سال ۱۹۷۳ ارائه گردید.

ب) شاخص کیفی توده سنگ (Q) که توسط بارتن و همکارانش در سال ۱۹۷۳ ارائه شد

(Hoek, 2000-a).

ج) شاخص توده سنگ (RMI) که در سال ۱۹۹۶ توسط پالمستروم ارائه شد.

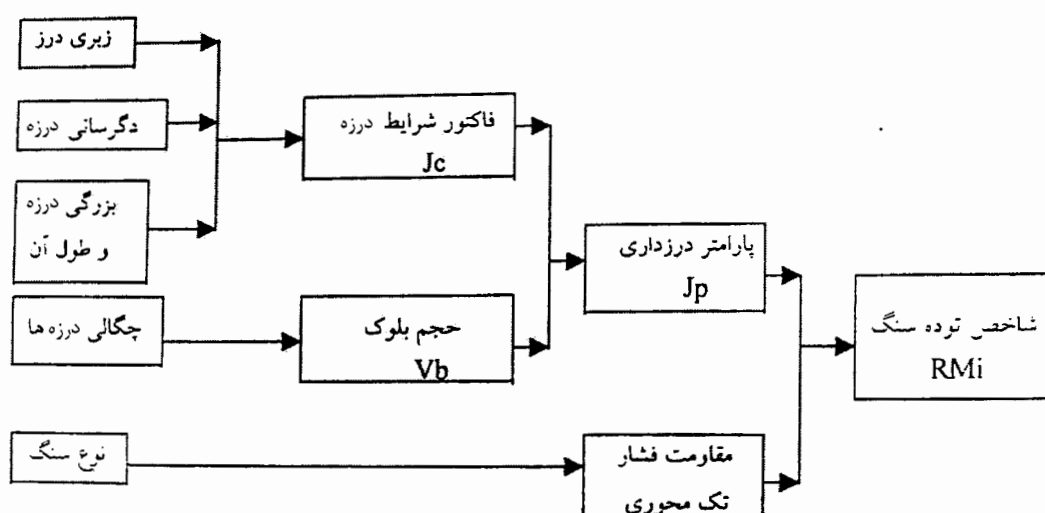
در هر یک از این روش‌ها با توجه به مشخصه‌های توده سنگ برای آن امتیازی در نظر گرفته می‌شود و همچنین جداول و دیاگرام‌های مخصوص وجود دارند که با مراجعه به آنها می‌توان با توجه به نوع سنگ و شرایط محیط، امتیاز آن را تعیین کرد و سپس سیستم نگهداری مناسب را برای آن تعیین کرد. از آنجا که روش‌های تجربی مذکور حاصل جمع آوری و تحلیل تجارب گذشتگان در تونل‌های احداث شده می‌باشد و نتایج بدست آمده جنبه کاربردی دارند، این روش‌ها زمانی بهترین جواب را می‌دهند که تونل مورد نظر دارای شرایط یکی از روش‌های مذکور باشد. لذا باید حوزه کاربرد هر یک از این روش‌ها مشخص گردد تا بتوان تشخیص داد که در هر مورد بایستی از چه روش طبقه‌بندی استفاده کرد.

بارتن و همکاران حوزه کاربرد روش‌های Q و RMR را توضیح داده‌اند. مواردی که در تقسیم‌بندی Q جمع آوری و تحلیل شده‌اند اکثراً تونل‌های کم درزه و با سنگ‌های یکپارچه و در اعماق زیاد بوده و طبیعی است بهترین نتایج را در مورد چنین شرایطی خواهد داد. حال آنکه تونل‌هایی که در تقسیم بندی RMR به عنوان مبنا انتخاب شده‌اند اکثراً کم عمق و به طور متوسط دارای سه دسته درزه می‌باشند. شاخص توده سنگ (RMI) طبقه بندی نسبتاً جدیدی بوده و به منظور مشخص کردن مقاومت توده های سنگ برای استفاده در طراحی سازه‌های سنگی ارائه شده است. سیستم RMI بر اساس پارامترهای ذاتی توده سنگ تعریف شده است و از ترکیب مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر و پارامتر نوع و تعداد درزه‌ها بدست می‌آید. این روش مقیاسی از کاهش

مقاومت سنگ بکر را که توسط ناپیوستگی‌ها حاصل می‌شود، بدست می‌آورد. برای تخمین RMi از رابطه (۱-۵) استفاده می‌شود.

$$RMi = \sigma_c \times J_p \quad \text{رابطه (۱-۵)}$$

که در آن σ_c مقاومت فشاری تک محوری و J_p پارامتری است که متأثر از اندازه قطر بلوک‌های حاصل از دسته درزه و ویژگی‌های خود درزه شامل زبری درزه، هوازدگی و طول درزه می‌باشد. در شکل زیر مهمترین پارامترهای بکار رفته در این سیستم نشان داده شده است (بلیغ، ۱۳۷۹).



شکل ۱-۵- پارامترهای به کار رفته در شاخص توده سنگ RMi (بلیغ، ۱۳۷۹)

۳-۵- روش‌های مشاهده‌ای

این روش‌ها بر مبنای اندازه‌گیری‌های برجای می‌باشد. در این روش‌ها تا حدودی از روش‌های تجربی کمک گرفته می‌شود ولی بطور کلی اساس تحلیل و طراحی و قضاوت مهندسی در مورد نحوه اجرای سازه و سیستم نگهدارنده کلاً بر اساس ابزاربندی سازه مورد نظر استوار می‌باشد. بطور کلی

طراحی فضاهای زیرزمینی براساس روش‌های مشاهده‌ای مستلزم تفسیر داده‌های رفتارنگاری در طول اجرای پروژه می‌باشد (امامی تبریزی، ۱۳۷۶).

واژه ابزار دقیق^۱ به طیف وسیعی از ابزارهای اندازه‌گیری تغییر کمیت‌های فیزیکی اطلاق می‌شود که مهندسين در حوزه وسیع فعالیت خود به خدمت می‌گیرند. ابزارهای دقیق در حوزه مهندسی برای اندازه‌گیری تغییر کمیت‌هایی مانند: جابجایی توده سنگ، نیروی وارد به سیستم نگهداری، فشار آب زیرزمینی و ... را با دقت مورد نیاز اندازه‌گیری می‌نماید.

تنها دو کمیت مهم فیزیکی جابجایی و فشار است که نسبتاً بطور مستقیم با کمک تکنولوژی موجود اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری جابجایی می‌تواند بصورت اندازه‌گیری جابجایی مطلق نقاط واقع بر سطح فضای حفاری یا با مشکلات بیشتر واقع در درون توده سنگ باشد و یا می‌تواند به صورت اندازه‌گیری جابجایی نسبی دو نقطه واقع بر مرز فضای حفاری باشد که مورد اخیر آسانتر است.

اندازه‌گیری دیگر متغیرهای وابسته اغلب نیازمند استفاده از مدل‌های ریاضی، خواص مواد (مانند ثابت‌های الاستیک)، مقادیر تغییر شکل‌ها و فشارهای اندازه‌گیری شده می‌باشد. اما امروزه استفاده از پارامترهایی که مستقیماً قابل اندازه‌گیری هستند نسبت به پارامترهایی که از مدل‌های ریاضی استفاده شده و در آنها پارامترهای اندازه‌گیری شده به عنوان ورودی بکار می‌روند ترجیح داده می‌شوند و تنها در شرایطی که پارامترها قابل اندازه‌گیری به روش مشاهده‌ای نباشد از مدل‌های ریاضی برای تخمین پارامترها استفاده می‌شود (تراپی، ۱۳۸۰).

کار جمع‌آوری، پردازش، نمایش و تجزیه و تحلیل داده‌های کسب شده از ابزارهای دقیق را

1 - Instrument

رفتارنگاری^۱ گویند. لذا بحث ابزار دقیق و رفتارنگاری در پروژه‌های ژئوتکنیکی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. بطور خلاصه ابزارهای دقیق در سازه‌های ژئوتکنیکی در دوره‌های زمانی قبل، حین و بعد از اجرای پروژه هدف‌های زیر را دنبال می‌کند:

الف) قبل از اجرا: برای ثبت مقادیر طبیعی و تغییرات ایجاد شده در پارامترهای ژئوتکنیکی همچون سطح و فشار آب زیرزمینی، مدول تغییر شکل پذیری، مقاومت بر جای سنگ و وضعیت تنش‌های برجا از پارامترهای ثبت شده در فاز طراحی استفاده می‌شود.

ب) حین اجرا: این مرحله شامل اعلام قریب الوقوع بودن تخریب یا گسیختگی، آشکار سازی موارد و جوانب ناشناخته و ارزیابی آن‌دسته از فرضیات طراحی که در هنگام طراحی ساده سازی شده و به شکل محافظه کارانه طراحی شده‌اند، به حداقل رساندن آسیب‌های وارده به تأسیسات و سازه‌های مجاور و نهایتاً کنترل پیشرفت بهینه پروژه و انتخاب روش مناسب اصلاح و بهسازی.

ج) بعد از اجرا: با اتمام یک پروژه ژئوتکنیکی لازم است رفتار آن تا زمان حصول اطمینان از عدم توسعه درازمدت ناپایداری کنترل گردد. برای کنترل رفتار کلی سازه در طول بهره برداری، اندازه‌گیری و مراقبت از واکنش‌ها و پاسخ‌های سازه بر خود سازه و عملیات‌های مجاور سازه مورد نظر (خصوصاً در مرحله آبگیری یا تخلیه آب در سدها) ضرورت دارد.

روش‌های مشاهده‌ای بطور مستقیم مبتنی بر اطلاعات واقعی از رفتارسنجی تغییرات فشار و نیروهای اطراف تونل موجود در سیستم نگهدارنده و همچنین جابجایی‌های اطراف تونل (قبل، در حین حفاری، زمان اجرای سیستم نگهدارنده، در کلیه مراحل اجرایی و حتی زمان بهره برداری) می‌باشد.

۵-۳-۱- خصوصیات کلی سیستم‌های مشاهده

انتخاب و استفاده از ابزار برای مشاهده یک متغیر فرضی، (به طور مثال جابجایی) شامل مراحل ذیل می‌باشد. اولاً ابزار مشاهده، خود شامل سه بخش مجزا است: یک واحد سنسور یا تشخیص دهنده^۱ که نسبت به تغییرات در یک پدیده که در حال مشاهده شدن است واکنش نشان می‌دهد، یک سیستم انتقال که ممکن است از لوله، کابل الکتریکی، واسطه هیدرولیکی یا سیستم رادیوتله‌متری تشکیل شده باشد و خروجی از سنسور را به محل قرائت منتقل می‌کند و بالأخره واحد بازخوانی یا قرائت ثبت اطلاعات دریافت شده، نظیر نمایشگر مندرج به اشکال مختلف فشار سنج^۲، نوار مغناطیسی و غیره (بلیغ، ۱۳۷۹).

ثانیاً از آنجا که سیستم مشاهده باید وظیفه خود را به طور قابل اطمینان و اقتصادی انجام دهد لذا باید شماری از احتیاجات را به شرح ذیل مرتفع نماید :

۱- قابلیت نصب آسان حتی در شرایط سخت

۲- حساسیت کافی، صحت و قابلیت تکرار سنجش‌ها.

۳- استحکام کافی و سیستم حفاظتی مناسب برای اطمینان از دوام در کل زمان عملیات.

۴- قابلیت قرائت آسان و دسترسی سریع به اطلاعات توسط مهندسین.

۵- حداقل مزاحمت برای عملیات تونل زنی همراه با ایمنی کافی.

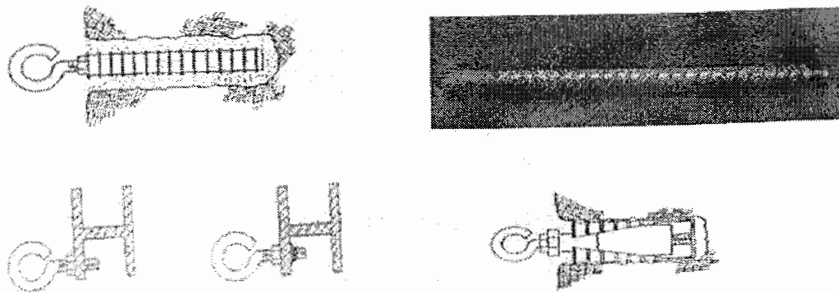
1 - Detector
2 - Pressure gauge

۵-۳-۲- همگرایی سنجی

همگرایی سنج ابزاری است که برای سنجش جابجایی نسبی نقاط سطحی سازه‌ها کاربرد دارد. این وسیله در انواع مختلف فضاهای زیرزمینی مانند تونل، چاه و مغار استفاده می‌شود. سیستم همگرایی‌سنجی از دو قسمت اصلی، پین و متر همگرایی سنج تشکیل شده است. در حفاری‌های زیرزمینی پین‌های همگرایی‌سنجی بایستی در اولین فرصت نصب گردند تا تغییر شکل سطحی ناشی از دور شدن سینه‌کار حفاری، خزش زمین و یا کنش حایل بندی تعیین گردد. بسته به جنس زمین فاصله مقاطع می‌تواند بین ۲۵ تا ۱۰۰ متر باشد. البته در موارد خاص مانند محل عبور فضاهای زیرزمینی از نزدیکی یکدیگر (کنار یا روی هم) این فاصله می‌تواند به حدود چند متر تقلیل یابد. از مزایای روش همگرایی‌سنجی می‌توان به سرعت، سهولت و ارزانی نسبی در نصب نقاط اندازه‌گیری و قرائت‌های مربوطه اشاره کرد.

۵-۳-۱- پین همگرایی سنجی

نحوه اتصال پین به سازه به ویژگی‌های سازه بستگی دارد (شکل ۵-۲). توصیه می‌شود طول پین‌ها در فضاهای زیرزمینی در حدود ۴۰ سانتیمتر در درون توده سنگ قرار داده شده باشد. اتصال پین‌ها به سازه با دوغاب، پوسته منبسط شونده، پیچ و مهره یا جوش ممکن می‌گردد. سر پین می‌تواند به صورت حلقه ای یا پیچی باشد که نوع دوم بیشتر توصیه می‌شود. نصب پوشش محافظ بر روی پین‌ها ضروری است (Dunncliff, 1993).



شکل ۵-۲- نمائی از انواع پین‌های همگرایی‌سنجی، پین تزریقی با سر پیچی (بالا راست)، پین تزریقی با سر حلقه‌ای (بالا چپ)، پین پوسته‌منبسط‌شونده با سر حلقه‌ای (پایین راست)، پین پیچی با سر حلقه‌ای (پایین چپ) (Dunnicliff, 1993)

۵-۲-۳-۲- متر همگرایی‌سنج

متر همگرایی‌سنج می‌تواند به صورت‌های نواری، سیمی، لوله‌ای و التراسونیک باشد. مترهای

همگرایی‌سنج سیار بوده و بایستی در محل مورد نظر قبل از انجام قرائت کالیبره شوند.

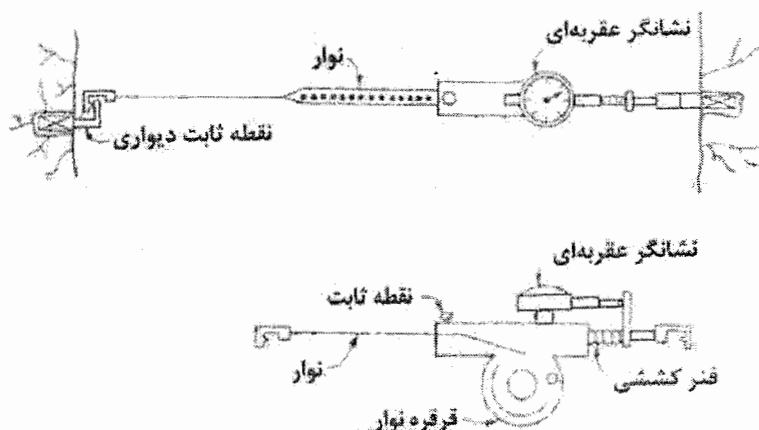
الف) متر نواری

این متر از یک نوار فولادی سوراخکاری شده با فواصل ۵۰ میلیمتری تشکیل شده است. یک

سر متر به نقطه اندازه‌گیری اول و سر دیگر متر که به نوار فولادی متصل است به نقطه اندازه‌گیری

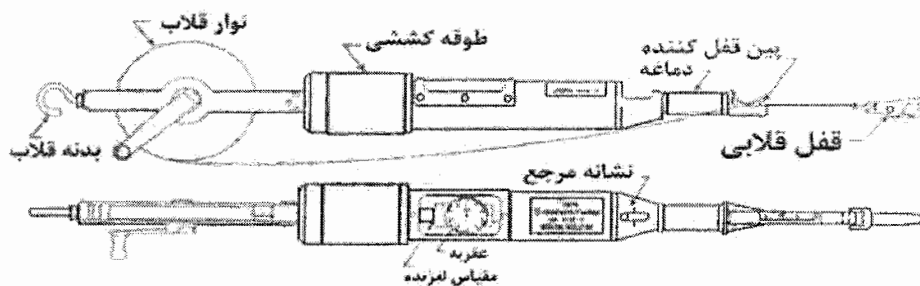
دوم وصل شده سپس نوار فولادی کشیده می‌شود (شکل ۵-۳). بایستی از عدم تاب برداشتن متر

نواری قبل از کشش مخصوصاً در طول‌های زیاد مطمئن شد.



شکل ۵-۳- طرح شماتیک متر نواری (ASTM, 1996)

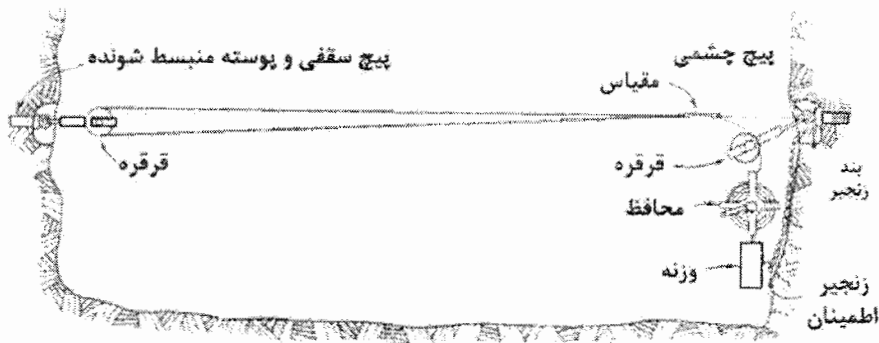
در برخی از انواع متر، مقدار کشش توسط فنر قابل انقباض کنترل می‌شود و در برخی دیگر کشش با چرخاندن یک طوقه کششی تا زمانی که نشانگر تعبیه شده در متر در موقعیت خود قرار گیرد کنترل شده و پس از مرحله کشش قرائت انجام می‌شود (شکل ۴-۵). تکرار پذیری اندازه‌گیری در این شیوه در حدود $\pm 0.13\text{mm}$ در یک دهانه ۱۰ متری است و با افزایش دهانه دقت کاهش می‌یابد. حداکثر طول دهانه تقریباً ۶۰ متر است (Dunnicliff, 1993).



شکل ۴-۵- متر نواری با نشانگر تنظیم کشش ساخت شرکت Slopeindicator (Slopeindicator, 2004)

(ب) مترسیمی

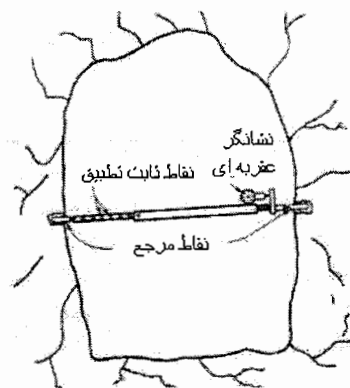
مترسیمی از نظر کاربرد و دقت مانند متر نواری است. سیم این مترها طولشان در مقابل تغییر دما بسیار مقاوم است (با ۱۰ درجه تغییر دما در طول ۳ متری فقط 0.05 میلیمتر افزایش طول بوجود می‌آید). با توسعه و پیشرفت انواع سیم‌های مقاوم، تکرارپذیری اندازه‌گیری تا $\pm 0.3\text{mm}$ برای دهانه ۲۰ متری و معادل ± 0.5 برای دهانه‌های تا ۵۰ متر افزایش یافته است (شکل ۵-۵).



شکل ۵-۵- شمائی از متر سیمی (ASTM, 1996)

ج) متر میله و لوله

این متر معمولاً از میله‌های تلسکوپی یا لوله‌های صلب، نشانگر عقربه‌ای یا میکرومتر و نشیمنگاهی که توسط میخ‌هایی چفت و بست می‌شود، تشکیل شده است. بازه مورد استفاده از این ابزار بسته به مدل آن از ۱۵۰ میلیمتر تا ۸ متر است. این ابزار جایگزینی برای مترهای سیمی و نواری در دهانه‌های قائم تونل‌ها و معادن است که دسترسی به نقاط اندازه‌گیری مرتفع به سهولت امکان پذیر نیست. تکرارپذیری اندازه‌گیری برای دهانه‌های قائم به طور معمول $\pm 0.13\text{mm}$ است (شکل ۵-۶). به هر حال تکرارپذیری در دهانه‌های افقی یا آریب (به علت شکم دادگی) کمتر شده و برای دهانه‌های بیشتر از ۳ متر به کمتر از $\pm 0.3\text{m}$ می‌رسد (امامی تبریزی، ۱۳۷۶).

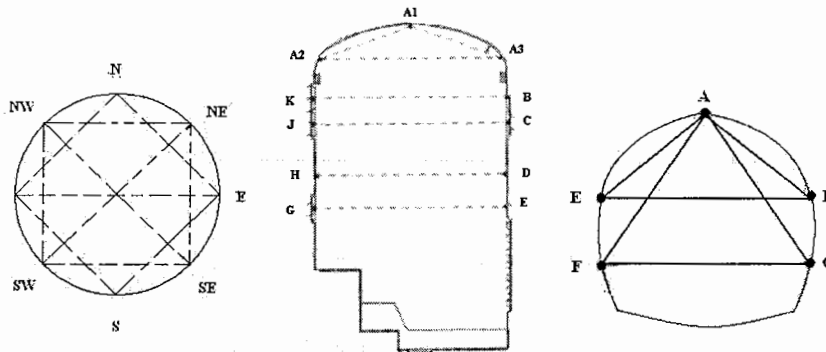


شکل ۵-۶- شمائی از سیستم متر، میله و لوله (Dunnicliff, 1993)

در تونل‌ها غالباً مقاطع اندازه‌گیری ۳ یا ۵ پینی است. ولی در چاه‌ها و مغارها تعداد این

نقاط معمولاً بیشتر است. در شکل (۵-۷) نمونه‌هایی از مقاطع همگرایی سنجی آورده شده است

(Dunnicliff, 1993)



شکل ۵-۷- انواع مقاطع همگرایی سنج در فضاهای زیرزمینی، تونل (راست)، مغار نیروگاه (وسط) و چاه (چپ)،

(فاروق حسینی، ۱۳۷۹)

د) متر التراسونیک

این ابزار توسط اداره معادن آمریکا در سال ۱۹۸۴ معرفی شد و در آن از فناوری امواج مافوق صوت برای برآورد همگرایی استفاده می‌شود. در این ابزار از یک فرستنده کوچک مافوق صوت که در هر ۶ ثانیه موجی را می‌فرستد، استفاده شده است. این امواج از طریق هوا فرستاده و پس از انعکاس به روی هر سطحی که فرستنده در آن تعبیه شده باز می‌گردد. زمان سیر موج بوسیله ابزارهای دقیقی محاسبه و به فاصله تبدیل می‌شود. این ابزار بیشتر در معادن و برای اندازه‌گیری سرعت تغییرات فاصله سقف و کف و یا قاب با قاب و اعلام زمان خطر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ابزار برای همگرایی‌های کمتر از $\frac{1}{3}$ میلیمتر توصیه نمی‌شود و بازه اندازه‌گیری آن از $\frac{0}{3}$ تا ۱۱ متر است. لذا

این ابزار بیشتر برای استخراج‌های جبهه کار طولانی، برداشتن ستون‌ها و سایر عملیات‌های معدنی که در آنها حرکات بزرگی در زمین رخ می‌دهد مناسب است (Dunnicliff, 1993).

پس از تعیین موقعیت پین‌ها در سطح سازه زیرزمینی، چالهایی متناسب با قطر و طول پین، بر اساس مشخصات کارخانه سازنده پین حفر می‌گردد (قطری در حدود دو برابر قطر پین توصیه می‌شود).

۵-۳-۳- کشیدگی سنج

از کشیدگی سنج^۱ برای اندازه‌گیری جابجایی‌های سطحی و عمقی مصالح پیرامون گمانه حفاری شده استفاده می‌گردد. گمانه می‌تواند در توده سنگ پیرامون فضای زیرزمینی، بدنه یک سازه خاکی و یا بتنی باشد.

کشیدگی سنج‌ها به سه گروه زیر تقسیم می‌شوند:

(۱) کشیدگی سنج‌های لغزنده^۲

(۲) کشیدگی سنج‌های ثابت درون گمانه‌ای^۳

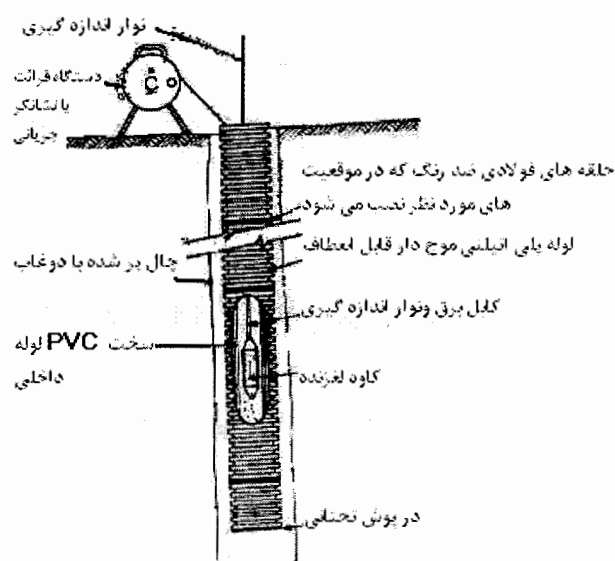
(۳) کشیدگی سنج‌های مدفون در خاکریز^۴

کشیدگی سنج‌ها بسته به تعداد نقاط اندازه‌گیری یا نشانه در چال به انواع: تک نقطه‌ای^۵ SP و چند نقطه‌ای^۶ MP تقسیم می‌شوند.

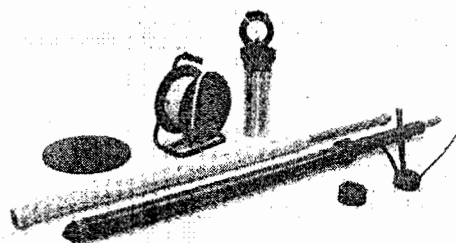
1 - Extensometer
2 - Probe extensometer
3 - Fixed extensometer
4 - Embedded extensometer
5 - Single point
6 - Multiple point

الف) کشیدگی سنج لغزنده

ابزاری است که برای رفتارنگاری تغییرات فاصله بین دو یا چند نقطه در طول محور چال به-کار می‌رود. این کار با عبور یک کاوه لغزنده از درون لوله راهنما انجام می‌شود (شکل ۵-۸). نقاط اندازه‌گیری در طول لوله راهنما بوسیله شاخص‌های مکانیکی، الکتریکی یا مغناطیسی (شکل ۵-۹) توسط کاوه لغزنده شناخته می‌شود و فاصله بین آنها بوسیله اندازه‌گیری موقعیت کاوه لغزنده تعیین می‌گردد (Dunnicliff, 1993).



شکل ۵-۸- شمائی از کشیدگی سنج لغزنده (Dunnicliff, 1993)



شکل ۵-۹- شمائی از کشیدگی سنج لغزنده ساخت شرکت Sisgeo (sisgeo, 2004)

از کاربردهای رایج کشیدگی سنج لغزنده رفتارنگاری فشرده‌گی قائم در داخل توده‌های خاکی یا فونداسیون، نشست در طول حفاری‌های زیرزمینی، بالآمدگی در کف حفاری‌های روباز و تغییر

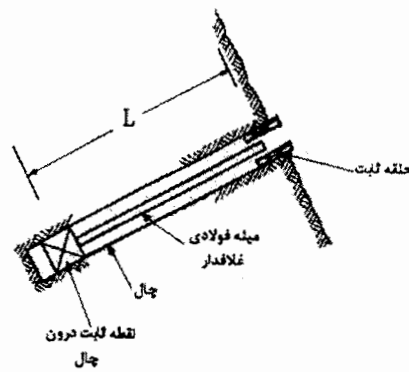
شکل‌های ثانویه در خاکریزها می‌باشد. در شرایطی که محدودیت تعداد نقاط اندازه‌گیری در کشیدگی سنج درون گمانه ای ثابت وجود داشته باشد معمولاً کشیدگی سنج لغزنده توصیه می‌شود. در این روش مجموع هزینه‌های نصب و قرائت در طولانی مدت کمینه می‌شود اما معمولاً اندازه‌گیری از دقت کمتری نسبت به اندازه‌گیری‌های کشیدگی سنج ثابت درون گمانه‌ای برخوردار است.

ب) کشیدگی سنج درون گمانه ای ثابت

این کشیدگی سنج غالباً درون گمانه‌ای در خاک یا سنگ نصب می‌گردد تا تغییر فاصله نسبی بین دو یا چند نقطه در طول محور گمانه را بدون استفاده از کاوه لغزنده اندازه‌گیری نماید. هر گاه موقعیت یکی از نقاط اندازه‌گیری نسبت به یک نقطه مبنا معین باشد می‌توان تغییر مکان مطلق را نیز با استفاده از این ابزار بدست آورد. در فضاهای زیرزمینی کشیدگی سنج را می‌توان در سطح زمین در صورت کم عمق بودن روباره نصب کرد، در غیر اینصورت باید از تونل‌های دسترسی، سایر فضاهای زیرزمینی مجاور یا از داخل خود فضاهای زیرزمینی نصب کرد. اگر ابزار قبل از حفر فضای زیرزمینی نصب شود می‌توان کل جابجایی حاصل از حفر فضای زیرزمینی (تغییر مکان مطلق) را اندازه‌گیری کرد. به این ترتیب امکان اندازه‌گیری بخش همگرایی حاصل گذشتن از سینه کار، بیشتر فراهم می‌گردد و امکان مقایسه مناسب‌تر نتایج تحلیل‌های عددی با مقادیر واقعی فراهم می‌شود (Dunncliff, 1993).

از مهمترین کاربردهای این ابزار رفتارنگاری تغییر مکان‌های توده سنگ پیرامون فضاهای زیرزمینی و سطوح شیبدار است. به علاوه این ابزار برای رفتار نگاری نشست‌های ناشی از متراکم شدن خاک، بالا آمدگی کف در حفاری‌های روباز و کرنش در سازه‌های بتنی نیز استفاده می‌شود.

اساس عملکرد کشیدگی سنج‌های ثابت درون گمانه ای در شکل (۵-۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰- طرح شماتیک اصول عملکرد کشیدگی سنج ثابت درون گمانه ای (Dunnicliff, 1993)

تغییر فاصله نقاط اندازه‌گیری از سر کشیدگی سنج بوسیله یک رابط که یک سر آنها به نقاط ثابت و سر دیگر آنها در نزدیکی سر ابزار است با استفاده از ابزارهای مکانیکی یا انتقال دهنده‌های الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود. می‌توان چندین نقطه درگیر در یک گمانه تعبیه کرد که هر یک به وسیله رابطی به قسمت سر گمانه ارتباط پیدا می‌کنند. در این حالت یک کشیدگی سنج چند نقطه ای بوجود می‌آید. کشیدگی سنج‌های چند نقطه‌ای برای رفتارنگاری تغییر مکان یا بررسی الگوی کرنش در طول محور گمانه بکار می‌رود. یک کشیدگی سنج چند نقطه‌ای معادل چند کشیدگی سنج تک نقطه‌ای است که در نزدیکی همدیگر نصب شده‌اند.

کشیدگی سنج‌های ثابت درون گمانه‌ای از نظر نوع وسیله انتقال دهنده جابجایی از نقاط ثابت به سر کشیدگی سنج به دو گروه میله‌ای و سیمی تقسیم می‌شوند. این ابزار از نقطه نظر نوع گیرداری نقاط ثابت به شش گروه پوسته منبسط شونده، دوغابی، هیدرولیکی، فنری، صفحه مدفون و بالنی تقسیم بندی می‌شود (Dunnicliff, 1993).

۵-۳-۴- نشست سنج

نشست سنج^۱ ابزاری است که برای اندازه‌گیری میزان نشست یا بالازدگی سطح زمین یا مصالح زیر آن به کار گرفته می‌شود. از مهمترین موارد کاربرد این ابزار رفتارنگاری نشست و بالازدگی در حفاری‌ها، فونداسیون، سدها و پشته‌های خاکی است. به علاوه این ابزار در مواردی چون ستون و دیوارهای محافظ، دیوارهای دیافراگمی، بالای فضاهای زیرزمینی مانند تونل‌های مترو و چاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

نشست سنج‌ها به دو دسته زیر تقسیم می‌گردد:

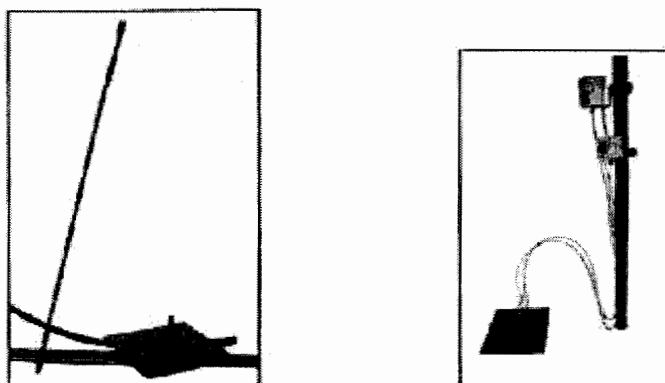
الف) نشست سنج‌های سطحی

ب) نشست سنج‌های زیر سطحی

الف) نشست سنج‌های سطحی

از نشست سنج‌های سطحی برای اندازه‌گیری طولانی مدت نشست تاج سدها یا سطح پایین دست سدهای خاکی استفاده می‌شود. اندازه‌گیری‌ها غالباً با ابزارهای نوری یا ترازیبانی مثلثاتی و اگر بسامد قرائت‌ها در آینده رو به افزایش باشد، از سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای استفاده می‌شود، (شکل ۵-۱۱).

۱ - Settlement

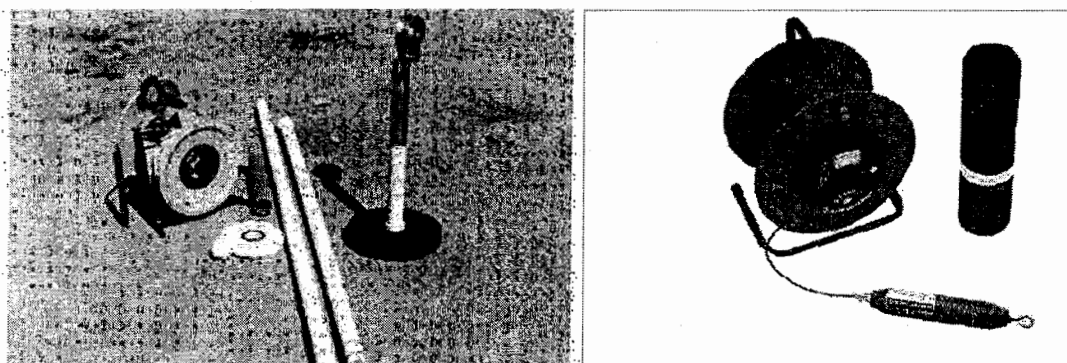


شکل ۵-۱۱- شمائی از نشست سنج صفحه‌ای (سمت راست)، نشست سنج مکانیکی (چپ) ساخت Interfels (Interfels, 2004)

ب) نشست سنج‌های زیر سطحی

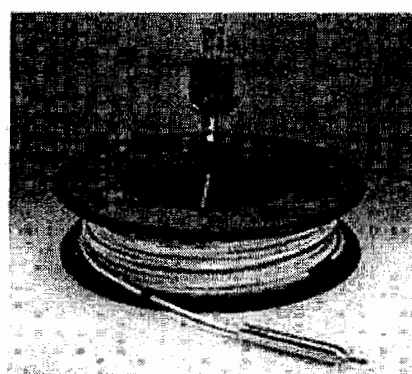
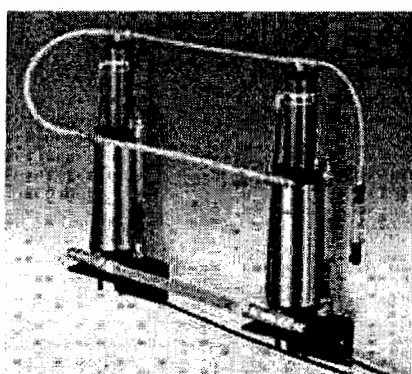
برای اندازه‌گیری نشست‌ها و بالازدگی زیر سطحی می‌توان از نشست سنج کاوه لغزنده استفاده کرد. به کمک این ابزار می‌توان علاوه بر تعیین نشست کل، روند تغییرات نشست در همه نقاط را تعیین کرد. اگر آخرین نقطه ثابت باشد می‌توان بدون نیاز به نقشه برداری نشست مطلق را اندازه‌گیری کرد. می‌توان این ابزار را با یک انحراف سنج تلفیق کرد.

سیستم کاوه شامل: کاوشگر، کابل سیگنال (کابلی که بر روی آن شماره حلقه مغناطیسی مشخص شده و منبع برقراری اختلاف پتانسیل است)، یک متر نواری برای سنجش عمق به کاوه وصل می‌شود. پس از ارسال کاوه به درون لوله راهنما و نزدیکی به محل حلقه‌هایی که از پیش قرار داده شده‌اند، صدایی از ابزار بگوش می‌رسد و مقدار قرائتی ولتاژ، به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در این حال، کاربرد با توجه به متر نواری متصل به کاوه عمل حلقه را ثبت می‌کند. میزان نشست یا بالازدگی با مقایسه قرائت اولیه با قرائت های ثانویه امکان پذیر می‌گردد (اشکال ۵-۱۲ و ۵-۱۳).
بعلاوه می‌توان از لوله‌های راهنمای آن برای کشیدگی سنج های لغزنده قائم، انحراف سنج های افقی و گنج های نشان دهنده تر از سطح مایع نیز استفاده کرد.



شکل ۵-۱۲- نشست سنج کاوه دار ساخت شرکت Interfels (راست)، شرکت پایاب زمزم (چپ)

(payab-zamzam,2004), (Interfels,2005)



شکل ۵-۱۳- شمائی از نشست سنج مدل ۴۶۵ (راست)، نشست سنج دقت بالایی مدل ۴۶۷۵ (چپ) ساخت Geokon (Geokon, 2004)

۴-۵- روش‌های تحلیلی

در روش‌های تحلیلی از تحلیل تنش‌ها و دگرشکلی‌ها در اطراف تونل استفاده می‌شود. این روش‌ها شامل تکنیک‌هایی از قبیل جواب‌های فرم بسته، روش‌های عددی، شبیه‌سازی قیاسی (الکتریکی، فتوالاستیک) و مدل‌سازی فیزیکی می‌باشد.

از روش فرم بسته برای تحلیل پایداری تونل‌هایی استفاده می‌شود که شکل هندسی ساده‌ای مانند دایره یا بیضی دارند. برای تحلیل اینگونه تونل‌ها می‌توان از تئوری الاستیک و روابط کیرش^۱

1- Kirsch

استفاده نمود. اما از آنجایی که تونل‌ها به ندرت دارای شکل هندسی ساده می‌باشند، این روش کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و بیشتر از روش‌های عددی استفاده می‌شود.

اساس روش‌های عددی شبیه‌سازی یک محیط با بینهایت درجه آزادی، توسط محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط می‌باشد. در این حال اثر نیرو و بارگذاری در این نقاط بررسی شده و پس از تعیین میزان تغییر شکل در این نقاط برای سایر نقاط با روش‌های درون‌یابی و تغییر شکل محاسبه می‌گردد. در اغلب این مسائل محیط دارای شکل دلخواه می‌باشد که تحت بارگذاری ثقی، نیروهای خارجی، تنش‌های برجا، تغییرات درجه حرارت، فشار سیال، بیش تنش یافتگی^۱، نیروهای دینامیکی و... قرار گرفته و برای پیدا کردن تغییر شکل‌ها از روابط تنش- کرنش استفاده می‌شود.

روش‌های عددی به دو گروه عمده تقسیم می‌شود: یک گروه برای محیط‌های پیوسته و گروه دوم برای محیط‌های ناپیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرند. گروه اول زمین را همانند یک محیط پیوسته در نظر گرفته و برای حل، آن را به اجزای کوچکتر تقسیم می‌کنند. در صورتیکه در گروه دوم زمین را به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا در نظر می‌گیرد که در آن درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها مرز بین بلوک‌ها را تشکیل می‌دهد. روش‌های المان محدود^۲، المان مرزی^۳، المان مرزی^۴ FDM^۴ مربوط به گروه اول و المان مجزا^۵ DEM^۵ از گروه دوم می‌باشد. مدل‌های فیزیکی اطلاعات مفیدی را مخصوصاً برای امتحان مدل شکست فراهم می‌کنند. از مدل‌های فیزیکی مخصوصاً در معادن زغال

1 - Over stressed

2 - Finite Element Method

3 - Boundary Element Method

4 - Finite Difference Method

5 - Distinct Element Method

سنگ بسیار استفاده شده است.

۵-۴-۱- روش المان محدود

اساس روش المان محدود تقسیم مسئله به یکسری زیر ناحیه کوچک به نام المان با شکل‌های مختلف از قبیل سه ضلعی و چهارضلعی برای مسائل دوبعدی و چهار و شش وجهی برای مسائل سه بعدی است. این المانها در نقاط گره‌ای به یکدیگر وصل می‌شوند. به منظور فرموله کردن جابجایی، توابعی که تعریف کننده مؤلفه‌های جابجایی در هر نقطه از المان و همچنین در نقاط گره‌ای انتخاب می‌گردند، سپس با استفاده از روابط کرنش - جابجایی، کرنش‌ها محاسبه می‌شوند. در روش المان محدود فرض بر این است که اثر نیروهای داخلی بین لبه‌های المان مجاور به وسیله عکس العمل‌های آنها در نقاط گره ای بیان می‌شود. این امر نیازمند تعیین معادلاتی برای نیروهای گرهی است. به طوری که این معادلات استاتیکی، نیروهای عمل کننده بین المانها در طول لبه‌های مجاور باشند. یکی از معایب این روش آن است که تلاش قابل توجهی جهت تهیه داده‌های ورودی برای حل مسائل مختلف لازم است. این روش قادر به مدلسازی مسئله به بهترین شکل نمی‌باشد. علت این امر تعیین یک مرز اختیاری برای مسئله می‌باشد که در نتیجه یک مسئله نامتناهی باید به صورت یک مسئله متناهی مدل شود و این باعث ایجاد خطا در نتایج و محاسبات می‌شود. با وجود این معایب، روش المان محدود در مهندسی سنگ بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا در شرایط متفاوت از قبیل بارگذاری‌های مختلف، حفارهای مرحله به مرحله، نصب نگهدارنده‌ها، مسائل خطی و غیر خطی به خوبی کاربرد داشته و قابل انعطاف است (اکبری جور، ۱۳۷۸).

۵-۴-۲- روش المان مرزی

این روش نیز مانند روش المان محدود از عمومیت و شهرت خاصی برخوردار است. البته فهم تئوری آن مانند المان محدود ساده نیست و نیاز به درک پیچیدگی‌های ریاضی با سطح بالا دارد. در این روش فقط مرز محیط مورد نظر مثلاً توده سنگ به اجزای کوچکتری تقسیم‌بندی می‌شود. بنابراین در مسائل دو بعدی این اجزاء بصورت خطی در مرز محیط می‌باشند. در حالت سه‌بعدی المانهای سطحی در مرز مسئله تعریف می‌شود. فراهم کردن داده‌های مورد نیاز در این روش نسبتاً ساده است و در مواردی که تغییر خواص مصالح وجود دارد، بایستی سطح جدا کننده مواد را تعریف نمود. این روش معمولاً برای مصالح با رفتار خطی و محیط‌های با یک نوع ماده کاربرد دارد. در این روش واکنش المان‌ها نسبت به شرایط بارگذاری خارجی محاسبه می‌شود و تحلیل رفتار المانهای مرزی بر اساس معادلات دیفرانسیل جزئی شبیه سازی و تحلیل می‌شود و اگر مقادیر تنش‌ها و تغییر شکل‌ها را در داخل محیط مورد نظر خواسته باشیم، با انتگرال‌گیری از معادلات دیفرانسیل جزئی می‌توان آنها را محاسبه نمود. از مزایای این روش این است که نیازی به کامپیوترهای قوی با حافظه بالا ندارد (اکبری جور، ۱۳۷۸).

فصل ششم

نصب ابزار دقیق و رفتارسنجی تونل های
قطار شهری اصفهان، قطعه جنوبی
(مسیر میدان آزادی - ترمینال صفه)

۶-۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، آنالیز پایداری فضاهای زیرزمینی، پی سدها، شیروانی‌های سنگی و دیگر پروژه‌ها با استفاده از روش‌های عددی از قبیل روش المان محدود، روش المان مرزی و روش المان مجزا توسعه قابل توجهی یافته است. ولی کارایی این روش‌ها به تنهایی با وجود دقت قابل ملاحظه‌ای که در محاسبه جابجایی‌ها و توزیع تنش دارند به دلیل غیر قابل اعتماد بودن داده‌های ورودی، که همان پارامترهای ژئومکانیکی و ساختار زمین شناسی توده سنگ می‌باشد، در پیش‌بینی رفتار مکانیکی سنگها و ارزیابی پایداری مورد تردید قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر اعتبار پیش‌بینی‌ها و ارزیابی‌های انجام شده به کمک روش‌های عددی بستگی به دقت داده‌های ورودی پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ و این‌که این پارامترها تا چه حد بیانگر رفتار واقعی توده سنگ می‌باشند، دارد. اندازه‌گیری کمی و دقیق و پارامترهای ژئومکانیکی و ساختار زمین شناسی توده سنگ، حالت اولیه تنشها در منطقه، وضعیت آب زیرزمینی و ... بسیار دشوار می‌باشد، (امامی تبریزی، ۱۳۷۶).

برای غلبه بر این مشکلات، رفتار سنجی در حین و بعد از اجرای پروژه انجام می‌شود و این‌نه تنها به‌خاطر کنترل پایداری سازه بلکه برای تخمین مجدد داده‌های ورودی مربوط به پارامترهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی است که در آنالیز طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یعنی پارامترهای

اولیه مورد استفاده در طراحی سازه‌ها با استفاده از نتایج حاصل از رفتار سنجی مجدداً ارزیابی می‌شوند و اگر لازم باشد روش ساخت یا حفاری تونل اصلاح می‌شود. این روش طراحی و ساخت همزمان روش مشاهده‌ای نامیده می‌شود (بلیغ، ۱۳۷۹).

در این فصل ابتدا به اهداف و فواید رفتار سنجی و ویژگی‌های یک طرح ابزاربندی مناسب پرداخته شده سپس اندازه‌گیری به کمک همگرایی سنج و نشست سنج به طور مختصر شرح داده می‌شود و در ادامه به تفسیر داده‌های همگرایی سنج پرداخته شده و نیز شرح مختصری از وضعیت نشست در سطح زمین در ایستگاه‌های مختلف نشست‌سنج آورده شده که از داده‌های همگرایی‌سنج در فصل نهم برای آنالیز برگشتی استفاده شده است و در فصل هفتم برای کنترل نتایج خروجی نرم‌افزار استفاده می‌شود.

۶-۲- اهداف و فواید رفتار سنجی

هدف اصلی رفتار سنجی، تعیین شرایط پایداری در یک سازه زیرزمینی به کمک تهیه اطلاعات کمی بر اساس رفتار سنجی توده سنگ و سیستم نگهدارنده تونل است. مهمترین اهداف رفتار سنجی در تونل‌ها عبارتند از (بلیغ، ۱۳۷۹):

- ۱- تأمین ایمنی در طی عملیات ساخت تونل با دادن اخطار به موقع در مورد حرکت بیش از حد زمین، فشار آب زیرزمینی یا بارهای وارد بر عناصر نگهداری
- ۲- کنترل صحت فرضیات، مدل‌های فرضی و خواص توده سنگ و خاک استفاده شده در محاسبات طراحی.

۳- بررسی عملکرد سیستم نگهداری

۴- بررسی تاثیر عملیات اجرایی در محیط اطراف

۵- پیش‌بینی رفتار زمین

۶- طراحی و تحلیل پایداری تونل

۶-۳- ویژگی‌های یک طرح ابزاربندی مناسب

به طور کلی یک طرح ابزاربندی و رفتارسنجی باید دارای شرایط زیر باشد:

- ۱- نتایج بدست آمده باید معرف رفتار کامل و واقعی سازه مورد نظر و محیط درون گیر آن باشد.
 - ۲- نقاط اندازه‌گیری بایستی توزیع مناسبی در محیط داشته باشند.
 - ۳- تعداد اندازه‌گیری‌ها باید به حد کافی زیاد باشد تا تجزیه و تحلیل نتایج بر مبنای اطلاعات کامل صورت گیرد.
 - ۴- هزینه‌های مربوطه در حد معقول و منطقی باشد (بلیغ، ۱۳۷۹).
- برای اینکه یک سیستم ابزاربندی بتواند تمامی وظایف خود را به طور اقتصادی و قابل اطمینان انجام دهد باید شرایط زیر را در حد قابل قبولی دارا باشد:
- ۱- نصب آسان، حتی در شرایط نامناسب یا در شرایطی که کارهای دیگر نیز در حال انجام است.
 - ۲- بر خوردار بودن از مقاومت و استحکام کافی به گونه‌ای که دستگاه بتواند در دوره زمانی که در طی پروژه به آن نیاز است کیفیت کار خود را حفظ کند.
 - ۳- برخوردار بودن از دقت و حساسیت کافی برای اهداف و مقاصد مورد نظر و همچنین امکان اندازه‌گیری مکرر.
 - ۴- قابل اغماض بودن اثرات متقابل که بین سیستم ابزاربندی و فعالیت‌های دیگر بوجود می‌آید (بلیغ، ۱۳۷۹).

۴-۶- انواع روش‌های اندازه‌گیری در تونل

مهمترین اندازه‌گیری‌هایی که در تونل‌ها انجام می‌شود عبارتند از:

۱- اندازه‌گیری همگرایی (اندازه‌گیری تغییر مکان نسبی) با همگرایی‌سنج

۲- اندازه‌گیری تغییر مکان نقاط درون دیواره با کشیدگی سنج

۳- اندازه‌گیری نشست

۴- اندازه‌گیری بار به وسیله بار سنج

۵- اندازه‌گیری تنش

اکنون با توجه به نوع اندازه‌گیری‌های انجام شده در تونل‌های متروی دو قلو اصفهان،

اندازه‌گیری به کمک همگرایی سنج، نشست سنج به طور مختصر شرح داده می‌شود.

۴-۶-۱- اندازه‌گیری همگرایی با همگرایی سنج (Convergence meter)، (سازمان قطار

شهری اصفهان و حومه، ۱۳۸۴)

اندازه‌گیری همگرایی دیواره و سقف تونل به روش نصب پین و استفاده از متر دقیق

همگرایی‌سنجی انجام می‌شود. برای اندازه‌گیری تغییرات بین دو نقطه از دیواره‌های تونل، دو پین

که هر یک به قطر ۲۰ میلیمتر و طول ۴۰ تا ۶۰ سانتیمتر می‌باشد و عملیات آبکاری جهت

جلوگیری از زنگ‌زدن روی آن انجام شده است، در نقاط مورد نظر نصب می‌شود. ابزار اندازه‌گیری

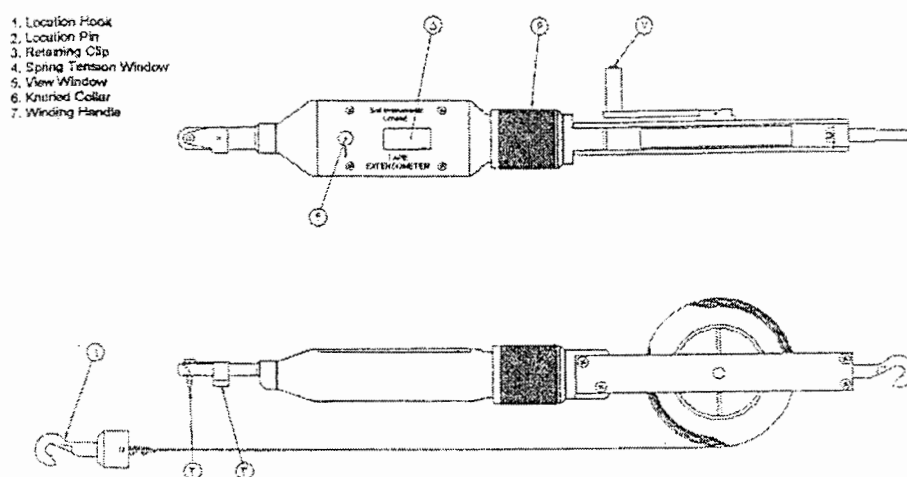
در بین دو نقطه قرار می‌گیرد. نوار اندازه‌گیری به یکی از پین‌ها متصل و دستگاه به پین دوم وصل

شده، تحت نیروی کشش ثابت قرار می‌گیرد. دستگاه دوم متر همگرایی سنج می‌باشد که از

جدیدترین و بهترین نوع‌های متر همگرایی سنج بوده و که از شرکت Soil Instrument تهیه شده و

در کارگاه مورد استفاده قرار گرفته است. این دستگاه دارای دقت اندازه‌گیری تا ± 0.1 میلیمتر، حساسیت تا ± 0.05 میلیمتر و قابلیت تکرار تا ± 0.1 می‌باشد. شکل (۶-۱) اجزای دستگاه و نحوه نصب دستگاه همگرایی سنج جدید و پین‌ها و روش استفاده از آن را نمایش می‌دهد. در هر نوبت قرائت، دستگاه همگرایی سنج کالیبره می‌گردد.

طبق طرح اولیه، محل ایستگاه‌های همگرایی سنجی به فواصل حدود ۵۰ متری از هم قرار دارند. لازم بذکر است که این فاصله با توجه به شرایط زمین شناسی قابل تغییر می‌باشد.



۱- قلاب ۲- پین ۳- گیره نگهدارنده متر ۴- چشمی تنظیم کشش نوار متر ۵- چشمی قرائت ۶- پیچ تنظیم کشش فنر ۷- دسته پیچاندن متر

شکل ۶-۱- اجزای دستگاه و نحوه نصب دستگاه همگرایی سنج و روش استفاده از آن،
(سازمان قطار شهری اصفهان و حومه، ۱۳۸۴)

آرایش ایستگاه همگرایی سنجی در حال حاضر ۳ نقطه ای می‌باشد. پس از کف برداری در صورت نیاز دو نقطه اضافه می‌شود و ایستگاه ۵ نقطه ای شده و اندازه‌گیری‌ها ادامه می‌یابد تا رفتار توده خاک و سنگ پس از کف برداری کنترل بیشتری گردد.

۶-۴-۲- نشست سنج سطحی زمین (Settlement measurements), (سازمان قطار شهری

اصفهان و حومه، ۱۳۸۴)

جهت کنترل نشست احتمالی سطحی زمین در بالای تاج تونل، نقاط نشانه ثابت و تثبیت شده‌ای با نصب ابزار نشست سنج از سطح زمین مشخص می‌گردد. با قرائت نشانه‌ها و مقایسه آن با نقاط ثابت نقشه برداری در روی زمین، مقدار نشست تعیین می‌گردد.

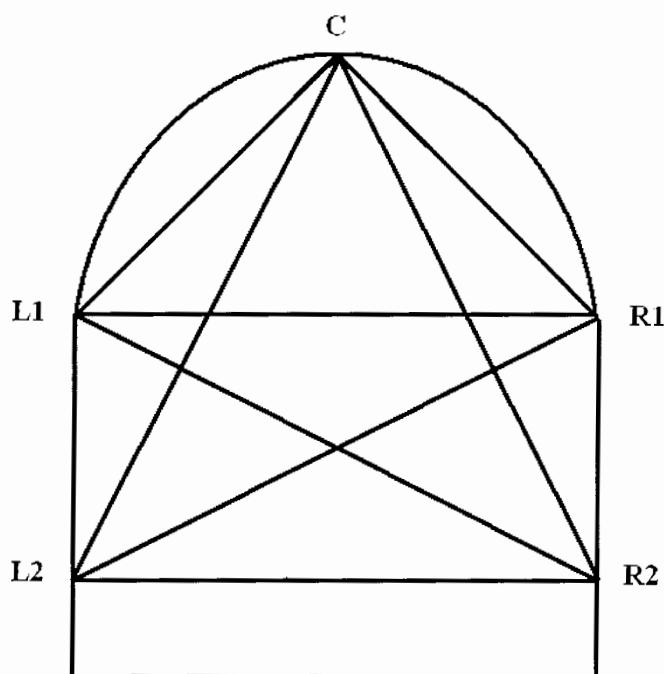
نشست سنج‌ها در فواصل ۱۰۰ متری از هم و همچنین در کنار کشیدگی سنجهایی که در سطح زمین نصب می‌شوند، قرار می‌گیرند با توجه به شرایط زمین شناسی و عوارض سطحی در صورت نیاز تعداد دیگری نشست سنج نصب می‌شود. شکل (۶-۲)، تصویر تهیه شده از نصب کردن و قرائت داده های ابزار دقیق می‌باشد.



شکل ۶-۲- اپراتور حین قرائت همگرایی سنج

۵-۶- رفتارنگاری تونل‌های متروی دوقلوی اصفهان

تفسیر نمودارهای رفتارسنجی که با استناد به قرائت‌های انجام شده ابزار دقیق رسم شده‌اند، در این قسمت آمده است. از آنجا که اجرای تونل‌های دو قلوی متروی اصفهان با تأخیر فاز زمانی نسبت به همدیگر انجام می‌شوند، با استفاده از ابزار نصب شده در تونل غربی و تفسیر و پردازش مربوط به آنها در صورت نیاز می‌توان علاوه بر تونل غربی، طرح و اجرای تونل شرقی را نیز بهینه کرد. با توجه به آغاز عملیات کف برداری، ایستگاه‌های همگرایی که به پنج نقطه‌ای تبدیل شده‌اند دارای شش جهت اندازه‌گیری $C-R1$, $C-L1$, $L1-R1$, $L2-R2$, $C-R2$, $C-L2$ خواهند شد (شکل ۳-۶) به منظور عدم تداخل با منحنی‌های همگرایی بر حسب زمان سری سه نقطه‌ای که در جهت‌های جدید در نمودار دیگری در پیوست به طور جداگانه نشان داده خواهد شد.



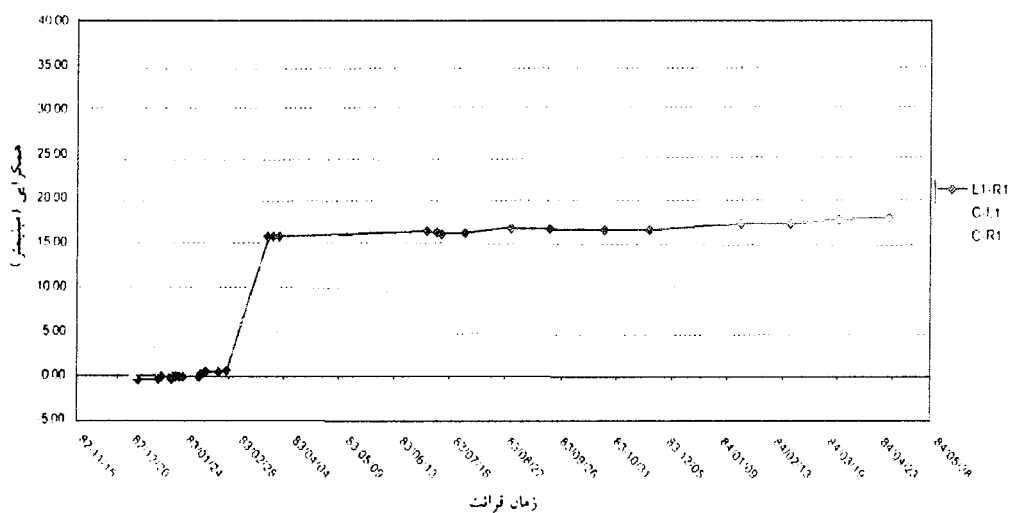
شکل ۳-۶- طرح شماتیک ایستگاه همگرایی سنج ۵ نقطه‌ای

در شکل‌های (۴-۶) تا (۷-۶) و منحنی‌های همگرایی تابع زمان به عنوان نمونه نشان داده شده و بقیه نتایج نمودارهای ایستگاه‌های همگرایی سنجی در پیوست ارائه شده است. ضمناً شرح مختصری از فعالیت‌های انجام شده و تفسیر نتایج در هر ایستگاه ذیلاً آورده شده است.

۶-۶- ایستگاه‌های همگرایی سنجی در تونل غربی

۶-۶-۱- ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱

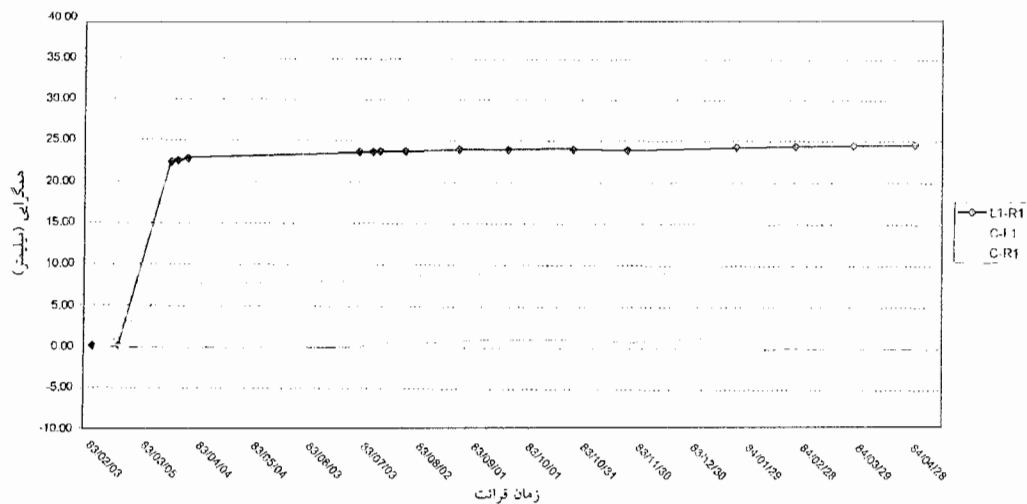
بین‌های همگرایی سنج این ایستگاه در تاریخ ۱۳۸۲/۱۲/۲۱ و در فاصله ۱/۴۵ متری از جبهه کار تونل غربی و در کیلومتر ۹+۱۲۳/۰۶ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۱۳۸۲/۱۲/۲۲ انجام گردید. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار شکل ۴-۶ نشان داده شده است. نمودار همگرایی تا تاریخ ۸۳/۲/۲۲ مؤید رفتار نسبتاً طبیعی توده سنگ می‌باشد اما بعد از آن یک جهش نسبتاً زیاد در سه جهت همگرایی دیده می‌شود که ناشی از نزدیک شدن سینه کار تونل شرقی به این ایستگاه می‌باشد. بعد از گذشتن سینه کار تونل شرقی از ایستگاه مزبور، دوباره توده سنگ اطراف تونل غربی در تاریخ ۸۳/۰۳/۲۴ به تعادل خود رسیده است.



شکل ۴-۶- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱ همگرایی سنج

۶-۶-۲- ایستگاه همگرایی سنجی CW-A1

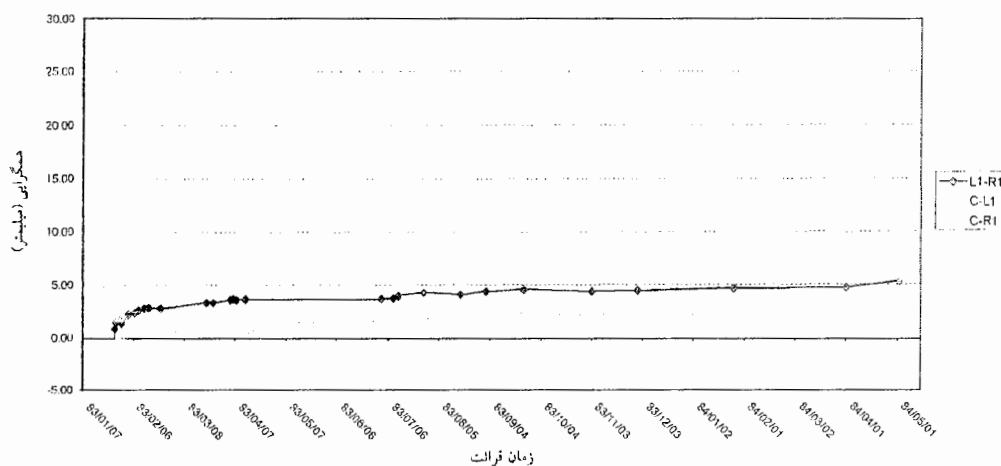
پین‌های مربوط به این ایستگاه در تاریخ ۱۳۸۳/۲/۶ در فاصله ۵۰/۴۵ متری از جبهه‌کار تونل غربی در کیلومتر ۹+۱۲۳/۰۶ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۱۳۸۳/۲/۷ انجام شده است. این ایستگاه جهت اطمینان از نتایج رفتار سنجی حاصل از ایستگاه همگرایی سنجی CW-1 نصب گردید. نمودار شکل ۵-۶ مؤید رفتار نسبتاً طبیعی توده سنگ تا تاریخ ۸۳/۲/۲۲ می‌باشد اما بعد از آن یک جهش نسبتاً زیاد در سه جهت همگرایی دیده می‌شود که ناشی از نزدیک شدن سینه کار تونل شرقی به این ایستگاه می‌باشد و بعد از گذشتن سینه کار تونل شرقی از ایستگاه مزبور دوباره توده سنگ اطراف تونل غربی در تاریخ ۸۳/۰۳/۲۴ به تعادل خود رسیده است. آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۰۴/۳۰ از این ایستگاه، همچنان حاکی از تعادل در توده سنگ اطراف تونل می‌باشد.



شکل ۵-۶- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-A1 همگرایی سنج

۶-۶-۳- ایستگاه همگرایی سنجی CW-۲

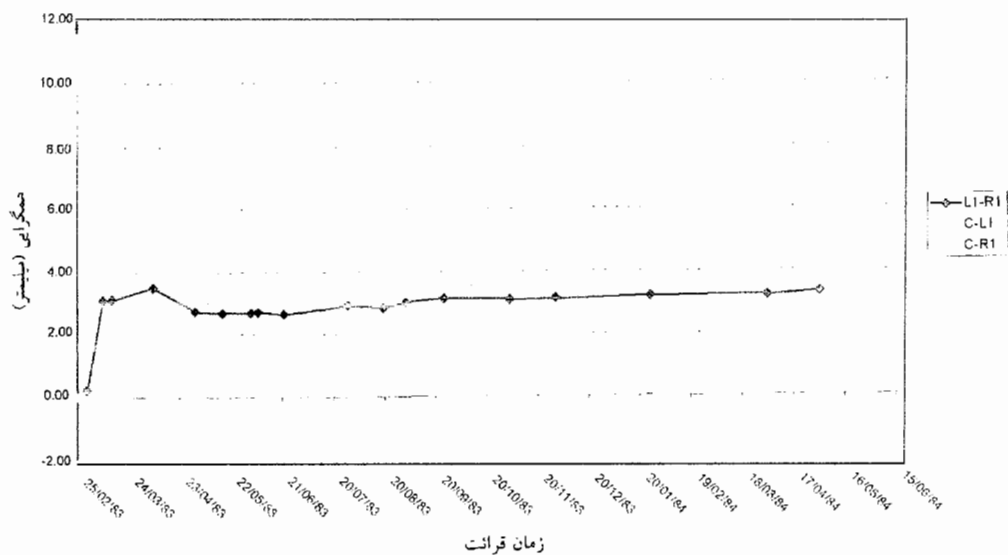
پین‌های مربوط به این ایستگاه در تاریخ ۱۳۸۳/۱/۲۵ در فاصله ۱/۴۰ متری از جبهه‌کار تونل غربی در کیلومتر ۹+۱۵۴/۹۶ نصب و قرائت آن در تاریخ ۱۳۸۳/۱/۲۶ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار شکل ۶-۶ ملاحظه می‌شود. نمودارهای همگرایی تا تاریخ ۸۳/۲/۲۲ مؤید رفتار نسبتاً طبیعی توده سنگ می‌باشد. اما همگرایی کمی در دیواره‌های تونل غربی در تاریخ ۸۳/۰۳/۲۱ مشاهده می‌گردد. همچنین همگرایی در تاریخ ۸۳/۰۳/۲۵ در توده سنگی دیواره‌های تونل دیده می‌شود که هر دو ناشی از نزدیک شدن سینه کار تونل شرقی به این ایستگاه می‌باشد. پس از عبور تونل شرقی از ایستگاه مزبور دوباره در تاریخ ۸۳/۰۴/۰۸ به تعادل خود رسیده است.



شکل ۶-۶- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۲ همگرایی سنج

۶-۶-۴- ایستگاه همگرایی سنجی CW-۳

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۲/۲۴ در فاصله ۲/۲۵ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۲۰۶/۶۳ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۲/۲۶ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در شکل ۶-۷ نشان داده شده است و نمودار همگرایی تا تاریخ ۸۳/۲/۲۹ مؤید رفتار نسبتاً طبیعی توده سنگ می‌باشد اما در تاریخ ۸۳/۳/۱۰ همگرایی در توده سنگی دیواره‌ها مشاهده می‌شود که دوباره به تعادل خود در تاریخ ۸۳/۳/۱۳ رسیده است. در تاریخ ۸۳/۰۴/۰۷ این ایستگاه جهت کنترل قرائت شد که تغییرات بسیار کمی (کمتر از ۰/۹ میلی‌متر) دیده می‌شود. با توجه به عبور سینه کار تونل شرقی از ایستگاه مزبور، همگرایی در سقف و سمت چپ تونل دیده می‌شود.



شکل ۶-۷- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۳ همگرایی سنج

۶-۶-۵- ایستگاه همگرایی سنجی CW-۴

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۳/۲۴ در فاصله ۱/۵۷ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۲۵۷/۴۳ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۰۳/۲۵ انجام شده است. نمودار همگرایی برحسب زمان در نمودار (الف-۱) در پیوست نشان داده شده است. شکل (الف-۱) پیوست مؤید به تعادل رسیدن توده سنگی اطراف تونل در تاریخ ۸۳/۰۳/۲۸ می‌باشد با توجه به عبور سینه کار تونل شرقی از ایستگاه مزبور در تونل غربی، همگرایی در توده سنگی اطراف تونل به خصوص در سمت چپ مشاهده می‌گردد. آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۰۳/۲۸ قبل از کف‌برداری از این ایستگاه حاکی از تعادل در توده سنگی پیرامون تونل می‌باشد. ناحیه اطراف این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۵/۱۸ کف‌برداری شده و در تاریخ ۸۴/۰۵/۱۹ نیز ایستگاه مزبور به صورت ایستگاه همگرایی سنجی پنج نقطه‌ای تبدیل شد و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۴/۰۵/۲۰ انجام گرفت.

۶-۶-۶- ایستگاه همگرایی سنجی CW-۵

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۴/۱۷ در فاصله ۲/۸۶ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۳۰۸/۴۳ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۰۴/۱۸ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۲) پیوست نشان داده شده است. نمودار همگرایی مؤید تغییرات کمی در توده سنگی اطراف تونل می‌باشد که تا تاریخ ۸۳/۰۵/۲۰ این تغییرات کمتر از ۰/۵ میلی‌متر بوده است در تاریخ ۸۳/۰۵/۲۹ این ایستگاه با متر جدید قرائت شد که علیرغم گذشتن سینه کار تونل شرقی از این ایستگاه، تغییرات توده سنگی

از اطراف تونل تا حدودی ثابت بوده و منحنی به حرکت ثابت خود ادامه داده است. با بررسی شاکریت اطراف ایستگاه مزبور و پین‌های آن هیچ علائمی که دلالت بر حرکت ناگهانی توده ای از سنگ داشته باشد مشاهده نشد. این ایستگاه پس از تغییراتی که در حدود ۰/۵ میلیمتر در تاریخ ۸۳/۰۸/۳۰ در سه جهت اندازه‌گیری داشته است در تاریخ ۸۳/۰۹/۱۴ به تعادل رسیده است. این ایستگاه جهت کنترل ماهیانه قرائت شده و آخرین قرائت قبل از کفبرداری از این ناحیه در تاریخ ۸۴/۰۳/۲۸ نشان دهنده تعادل در توده سنگی اطراف تونل می‌باشد. این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۵/۰۵ کفبرداری شد و در تاریخ ۸۴/۰۵/۰۶ نیز ایستگاه مزبور به صورت ایستگاه همگرایی سنجی پنج نقطه‌ای تبدیل شد و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۴/۰۵/۰۸ انجام گرفت.

نمودار همگرایی نسبت به زمان برای جهت‌های جدید اندازه‌گیری ایستگاه پنج نقطه‌ای در نمودار (الف-۳) در پیوست نشان داده شده است. همانطور که از نمودارهای همگرایی (الف-۲) و (الف-۳) در پیوست مشهود است، در اثر کفبرداری از این ناحیه از تونل، تغییراتی در حد کمتر از یک میلیمتر در توده سنگی دیواره های تونل دیده می‌شود که در تاریخ ۸۴/۵/۱۳ به تعادل خود رسیده است. آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۰۵/۱۸ مؤید پایداری در توده سنگی در این ناحیه از تونل می‌باشد.

۶-۶-۷- ایستگاه همگرایی سنجی CW-۶

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۵/۲۴ در فاصله ۲/۵۷ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۳۸۸/۴۸ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۰۵/۲۵ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۴) در پیوست نشان داده شده است، لازم به ذکر است این ایستگاه بعد از ریزش‌های زیادی که از سقف و سینه کار انجام شد نصب گردید. نمودار همگرایی مؤید تغییرات در توده سنگی حاصل از حفاری تونل و فشار زیاد توده سنگی سقف تونل می‌باشد به طوری که باعث همگرایی در سه جهت C-L, C-R, L-R شده که تا تاریخ ۸۳/۰۶/۱۰ این تغییرات ادامه داشته و بعد از آن توده سنگ اطراف و سقف تونل به تعادل خود رسیده است. علیرغم عبور سینه کار تونل شرقی از این ایستگاه قرائت‌های مجدد تا تاریخ ۸۳/۰۷/۱۷ منحنی همگرایی دارای یک روند کاملاً ثابتی بوده است اما پس از آن با نرخ کمی در سه جهت رشد داشته این ایستگاه جهت کنترل، ماهیانه قرائت شده است و آخرین قرائت قبل از کفبرداری از این ناحیه در تاریخ ۸۴/۰۳/۲۹ انجام شده که مؤید پایداری در توده اطراف تونل می‌باشد. این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۴/۱۲ کفبرداری شد و ایستگاه مزبور به صورت ایستگاه همگرایی سنجی پنج نقطه‌ای تبدیل شد که قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۴/۰۴/۱۳ انجام گرفت. نمودار همگرایی نسبت به زمان برای جهت‌های جدید اندازه‌گیری در نمودار (الف-۵) در پیوست نشان داده شده است. همانطور که از نمودارهای همگرایی (الف-۵) مشهود است پس از کفبرداری از این ناحیه شاهد تغییراتی در توده سنگی پیرامون تونل با نرخ نسبتاً زیاد، به خصوص در دیوارهای تونل دیده می‌شود. این تغییرات کمتر از سه میلیمتر می‌باشد که پس از انجام عملیات حفاظت مطابق طرح ارائه شده و تکمیل سیستم نگهداری موقت، با قرائتهای مستمر بعدی از این

ایستگاه شاهد ثابت شدن تغییرات در توده سنگی دیواره‌های تونل در این ناحیه می‌باشیم نمودار همگرایی (الف-۵) نیز مؤید تغییرات بسیار کم در توده سنگی دیواره‌های تونل می‌باشد که در نهایت در تاریخ ۸۴/۰۴/۲۶ به تعادل خود رسیده است و آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۵/۱۲ مؤید پایداری در توده سنگی در این ناحیه از تونل می‌باشد.

۶-۶-۸- ایستگاه همگرایی سنجی CW-۷

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۶/۱۲ در فاصله ۲/۵۷ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۴۳۹/۶۳ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۰۶/۱۴ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۶) در پیوست نشان داده شده است. نمودار همگرایی مؤید تغییرات در توده سنگی حاصل از حفاری تونل می‌باشد که در تاریخ ۸۳/۰۶/۱۷ تغییرات بعد از گذشتن دو قطر فاصله از سینه کار نسبت به ایستگاه مزبور ثابت شده است. همچنین در اثر عبور سینه کار تونل شرقی از این ایستگاه تغییرات کمی در توده سنگی اطراف تونل دیده می‌شود. قرائتها در تاریخهای ۸۳/۰۹/۱۵ و ۸۳/۰۹/۲۹ از این ایستگاه حاکی از تغییرات کم در توده سنگ اطراف تونل می‌باشد. این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۴/۱۲ مؤید پایداری در توده سنگی اطراف تونل در این ناحیه می‌باشد. این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۴/۱۳ کفبرداری شد و به صورت ایستگاه همگرایی سنجی پنج نقطه ای تبدیل شد که قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۴/۰۴/۱۴ انجام گرفت نمودار همگرایی نسبت به زمان برای جهت‌های جدید اندازه‌گیری در نمودار (الف-۷) در پیوست نشان داده شده است. همانطور که از نمودار (الف-۷) در پیوست مشهود است پس از کفبرداری از این ناحیه از تونل، تغییراتی در حدود یک میلیمتر در توده سنگی

دیواره‌های تونل دیده می‌شود که این رفتار سنگ در اثر کفبرداری و زیاد شدن نسبت ارتفاع تونل به عرض آن کاملاً طبیعی می‌باشد پس از انجام عملیات حفاظت مطابق طرح ارائه شده و تکمیل سیستم نگهداری موقت، با قرائتهای مستمر بعدی از این ایستگاه شاهد ثابت شدن تغییرات در توده سنگی دیواره‌های تونل، در این ناحیه می‌باشیم. نمودار همگرایی (الف-۷) نیز مؤید تغییرات بسیار جزئی و قابل اغماض در توده سنگی دیواره‌های تونل می‌باشد که خود نشانه تعادل پس از کف-برداری از تونل می‌باشد. لازم به ذکر است بین سقف به هنگام عملیات کفبرداری توسط ماشین آلات کج شده و از بین رفته بود که با هماهنگی و تایید دستگاه نظارت ترمیم و احیاء شد و مقرر گردید قرائت جدید جهت‌های C-R1 و C-L1 به عنوان قرائت مبنا محسوب و در ادامه روند قبلی، نمودار آنها منظور گردد. آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۰۵/۲۲ مؤید پایداری در این ناحیه از تونل می‌باشد.

۶-۶-۹- ایستگاه همگرایی سنجی CW-۸

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۷/۰۷ در فاصله ۲/۱۵ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۴۸۶/۳۸ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۰۷/۰۸ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۸) در پیوست نشان داده شده است. نمودار همگرایی مؤید تغییرات در توده سنگ حاصل از حفاری تونل و فشار زیاد از ناحیه سقف تونل می‌باشد که از تاریخ ۸۳/۰۷/۱۵ این تغییرات بعد از گذشتن سه قطر فاصله از سینه کار نسبت به ایستگاه مزبور تا حدودی ثابت شده است. علیرغم گذشتن تونل شرقی از این ایستگاه در توده سنگ پیرامون تونل تا تاریخ ۸۳/۰۸/۰۴ تعادل برقرار بوده است اما بعد از آن دستخوش تغییرات، بخصوص در ناحیه سقف تونل شده است. آخرین قرائت‌ها در تاریخ‌های

۸۴/۰۲/۲۰ و ۸۴/۰۳/۲۱ از این ایستگاه، حاکی از تغییرات بسیار جزئی در توده سنگ دیواره‌های تونل می‌باشد و منحنی همگرایی نسبت به زمان در سه جهت با یک نرخ بسیار کم روند صعودی به خود گرفته است که در بازه‌های زمانی یک ماهه این رفتار کاملاً طبیعی می‌باشد. آخرین قرائت قبل از کف برداری از این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۳/۲۱ مؤید پایداری در توده سنگی اطراف تونل در این ناحیه می‌باشد. این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۴/۰۲ کف برداری شد و به صورت ایستگاه همگرایی سنجی پنج نقطه ای تبدیل شد که قرائت مبنای در تاریخ ۸۴/۰۴/۰۴ انجام گرفت. نمودار همگرایی نسبت به زمان برای جهت‌های جدید اندازه‌گیری در نمودار (الف-۹) پیوست نشان داده شده است. همانطور که از نمودار همگرایی (الف-۹) مشهود است پس از کف‌برداری از این ناحیه از تونل تغییراتی در توده سنگی پیرامون تونل به خصوص در دیواره‌های تونل دیده می‌شود که این تغییرات نسبت به تغییرات قبل از کف‌برداری کمتر از یک میلیمتر می‌باشد. این رفتار سنگ در اثر کف برداری و زیاد شدن نسبت ارتفاع تونل به عرض آن کاملاً طبیعی می‌باشد. آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۵/۱۷ مؤید تغییرات ناچیز در توده سنگی دیواره‌های تونل می‌باشد که در بازه زمانی یک ماهه این رفتار توده سنگی طبیعی می‌باشد.

۶-۶-۱۰- ایستگاه همگرایی سنجی ۹-CW

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۸/۰۳ در فاصله ۲/۴۰ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۵۴۰/۶۳ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۰۸/۰۴ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۱۰) در پیوست نشان داده شده است. نمودار همگرایی مؤید تغییرات در توده سنگی حاصل از حفاری تونل می‌باشد که در تاریخ ۸۳/۰۸/۰۷ به تعادل نسبی خود رسیده است اما با نزدیک شدن و عبور سینه کار تونل شرقی

از این ایستگاه تغییراتی در توده سنگی پیرامون تونل به خصوص در دیواره‌های تونل دیده می‌شود که می‌بایست با قرائت‌های مجدد از این ایستگاه این تغییرات تا رسیدن به تعادل کنترل شود. لازم به ذکر است ایستگاه مزبور نزدیک ناحیه ای می‌باشد که خروج شدید آب از سقف و به خصوص از سمت راست تونل دیده می‌شود و تا حدود ۱۰ متر جلوتر از ایستگاه همچنان ادامه دارد. اما محل ایستگاه و پینها در شرایط خشک می‌باشد احتمالاً تغییرات در توده سنگی دیواره‌های تونل که نسبت به قسمت‌های دیگر بیشتر می‌باشد ناشی از فشار آب وارده از سمت راست تونل می‌باشد. این ایستگاه جهت کنترل ماهیانه قرائت می‌شود و تا تاریخ ۸۴/۰۱/۲۲ منحنی همگرایی روند ثابتی داشته است اما پس از آن با نرخ کمی روند صعودی در هر سه جهت به خود گرفته است که در بازه‌های زمانی یک ماهه این رفتار سنگ کاملاً طبیعی می‌باشد همانطور که از نمودار (الف-۱۰) مشهود است قرائت در تاریخ ۸۴/۰۳/۲۱ از این ایستگاه حاکی از ادامه یافتن تغییرات بخصوص در توده سنگی سقف با نرخ کمتر از قبل می‌باشد همچنین میزان آب خروجی از سقف و سمت راست در این ناحیه بسیار کم شده است. این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۳/۲۴ کف‌برداری شده و به صورت ایستگاه همگرایی سنجی پنج نقطه‌ای تبدیل شد.

۶-۶-۱۱- ایستگاه همگرایی سنجی ۱۰-CW

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۹/۰۷ در فاصله ۲/۵۰ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۶۳/۶۰+۹ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۰۹/۰۸ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۱۱) در پیوست نشان داده شده است، نمودار همگرایی مؤید تغییرات در توده سنگ حاصل از حفاری تونل می‌باشد که در تاریخ ۸۳/۰۹/۱۲ به تعادل نسبی خود رسیده است. با نزدیک شدن سینه کار تونل شرقی به ایستگاه مزبور توده سنگ پیرامون تونل در این ناحیه دستخوش تغییرات به خصوص در دیواره‌های تونل شده و در تاریخ ۸۳/۱۰/۰۳ به تعادل نسبی خود رسیده است. بعد از یک روند ثابت تا تاریخ ۸۳/۱۲/۰۴ قرائت انجام شده در تاریخ ۸۳/۱۲/۱۵ مؤید تغییرات جزئی در توده سنگ دیواره سمت چپ در این ناحیه می‌باشد که احتمالاً ناشی از همجواری تونل شرقی با دیواره سمت چپ این تونل است اما آخرین قرائتها در تاریخهای ۸۴/۰۱/۱۸ و ۸۴/۰۲/۱۷ قبل از کفبرداری حاکی از به تعادل رسیدن توده سنگی اطراف تونل در این ناحیه می‌باشد. این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۳/۱۳ کفبرداری شد و به صورت ایستگاه همگرایی سنجی پنج نقطه‌ای تبدیل شد و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۴/۰۳/۱۶ انجام گرفت. نمودار همگرایی نسبت به زمان برای جهت‌های جدید اندازه‌گیری در نمودار (الف-۱۲) در پیوست نشان داده شده است.

۶-۶-۱۲- ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱۱

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۹/۲۷ در فاصله ۱/۱۷ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۶۴۲/۱۳ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۰۹/۲۸ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۱۳) در پیوست نشان داده شده است نمودارهای همگرایی، مؤید تغییرات در توده سنگی حاصل از حفاری تونل می‌باشد که در تاریخ ۸۳/۱۰/۰۲ به تعادل نسبی خود رسیده است. علیرغم عبور سینه کار تونل شرقی از ایستگاه مزبور توده سنگ پیرامون تونل در این ناحیه دستخوش تغییرات بسیار اندکی شده است. لایه‌های سنگ در این ناحیه بیشتر از نوع ماسه سنگ متراکم با مقاومت بالا بوده که از هوازدگی بسیار کمی برخوردار می‌باشند. بعد از یک روند ثابت تا تاریخ ۸۳/۱۱/۱۸ قرائتهای انجام شده در تاریخهای ۸۳/۱۲/۰۴ و ۸۳/۱۲/۱۲ مؤید تغییرات جزئی کمتر از دو میلیمتر در توده سنگ پیرامون تونل در این ناحیه دستخوش تغییرات بسیار اندکی شده است.

لایه‌های سنگ در این ناحیه بیشتر از نوع ماسه سنگ متراکم با مقاومت بالا بوده که از هوازدگی بسیار کمی برخوردار می‌باشند بعد از یک روند ثابت تا تاریخ ۸۳/۱۱/۱۸ قرائتهای انجام شده در تاریخهای ۸۳/۱۲/۰۴ و ۸۳/۱۲/۱۲ مؤید تغییرات جزئی کمتر از دو میلیمتر در توده سنگ پیرامون تونل در این ناحیه می‌باشد. آخرین قرائت قبل از کفبرداری از این ناحیه در تاریخ ۸۴/۰۳/۰۳ مؤید پایداری در توده سنگی اطراف تونل می‌باشد. این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۳/۰۶ کفبرداری شد و در تاریخ ۸۴/۰۳/۰۷ ایستگاه مزبور به صورت ایستگاه همگرایی سنجی پنج نقطه‌ای تبدیل شد و قرائت مبنای آن در همین تاریخ انجام گرفت. نمودار همگرایی نسبت به زمان برای جهت‌های جدید اندازه‌گیری در نمودار (الف-۱۴) در پیوست نشان داده شده است.

همانطور که از نمودارهای همگرایی (الف-۱۳) و (الف-۱۴) مشهود است علی‌رغم کف‌برداری از این ناحیه از تونل، تغییراتی در توده سنگی دیواره‌های تونل دیده نمی‌شود.

۶-۶-۱۳- ایستگاه همگرایی سنجی ۱۲-CW

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۱۰/۲۵ در فاصله ۱/۳۳ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۶۹۹/۷۰ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۱۰/۲۶ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۱۵) پیوست نشان داده شده است. همانطور که از نمودار همگرایی مشخص است چون پین‌های همگرایی به فاصله بسیار کمی از جبهه کار نصب شده‌اند (در حدود ۱/۳۳ متر) و شاکریت و قاب‌گذاری مطابق دستورالعمل داده شده در طرح اجرا شده است. تغییرات در توده سنگ در فاصله حدود دو قطر از سینه کار متوقف شده و نرخ همگرایی به حدود صفر رسیده است. هر چند این ایستگاه در ناحیه‌ای از تونل نصب گردید که سنگ سقف تونل دارای هوازدگی قابل توجه بوده و ریزشهای کم و موضعی داشته است. با نزدیک شدن سینه کار تونل شرقی به ایستگاه مزبور توده سنگی پیرامون تونل غربی در این ناحیه دستخوش تغییرات کمی شده که در تاریخ ۸۳/۱۱/۱۲ به تعادل نسبی خود رسیده است. در تاریخ ۸۳/۱۱/۱۸ نمودار نشان می‌دهد، در حالیکه سینه کار تونل شرقی کمتر از دو قطر از این ایستگاه گذشته است. تغییراتی در توده سنگ ناحیه چپ تونل وجود دارد. اما در تاریخ ۸۳/۱۲/۰۳ به تعادل رسیده است آخرین قرائت قبل از کف‌برداری از این ناحیه در تاریخ ۸۴/۰۲/۱۸ مؤید تعادل در توده سنگی پیرامون تونل می‌باشد و نمودار همگرایی نسبت به محور زمان و فاصله از سینه کار حالت مجانب به خود گرفته‌اند. این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۲/۲۸ کف‌برداری شده و در تاریخ ۸۴/۰۲/۲۹ ایستگاه مزبور به صورت ایستگاه همگرایی سنجی پنج نقطه‌ای تبدیل شد و قرائت

مبنای آن در تاریخ ۸۴/۰۲/۳۱ انجام گرفت نمودار همگرایی نسبت به زمان برای جهت‌های جدید اندازه‌گیری در نمودار (الف-۱۶) در پیوست الف نشان داده شده است. همانطور که از نمودار همگرایی (الف-۱۵) در پیوست الف مشهود است به هنگام کف‌برداری از این ناحیه از تونل تغییراتی در توده سنگی پیرامون تونل به خصوص در دیواره‌های تونل دیده می‌شود. این تغییرات کمتر از ۴ میلیمتر می‌باشد که پس از عملیات حفاظت مطابق طرح ارائه شده و تکمیل سیستم نگهدارنده موقت، با قرائتهای مستمر بعدی از این ایستگاه شاهد ثابت شدن تغییرات در توده سنگی دیواره های تونل می‌باشیم. نمودار همگرایی (الف-۱۶) نیز مؤید تغییرات بسیار کم در توده سنگی دیواره‌های تونل می‌باشد که در نهایت در تاریخ ۸۴/۰۳/۰۱ به تعادل خود رسیده است. همانطور که از نمودارهای همگرایی مشهود است توده سنگ پیرامون تونل در این ناحیه در تعادل می‌باشد. لازم به ذکر است که به دلیل لاینیگ شدن کف تونل و قسمتی از پایین دیواره‌های آن در این ناحیه، پینه‌های نصب شده در پایین دیواره‌های تونل در پائین دیواره های تونل در پوشش بتنی مدفون گردیده است و در حال حاضر این ایستگاه به صورت سه نقطه ای و ماهیانه قرائت می‌شود و آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۰۵/۱۳ مؤید تغییرات ناچیز در توده سنگی دیواره‌های تونل می‌باشد که در یک بازه زمانی یک ماهه این رفتار توده سنگی طبیعی می‌باشد.

۶-۶-۱۴- ایستگاه همگرایی سنجی ۱۳-CW

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۱۱/۱۹ در فاصله ۲/۰۲ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۷۵۳ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۱۱/۲۰ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۱۷) در پیوست نشان داده شده است.

با نزدیک شدن سینه کار تونل شرقی به ایستگاه مزبور، توده سنگ پیرامون تونل غربی در این ناحیه دستخوش تغییرات کمی شده و منحنی‌های همگرایی با یک نرخ حدود ۰/۳ میلیمتر این ناحیه دستخوش تغییرات کمی شده و منحنی‌های همگرایی با یک نرخ حدود ۰/۳ میلیمتر روند صعودی داشته اند که در تاریخ ۸۳/۱۲/۰۳ این روند به حالت ثابت درآمده است. قرائت در تاریخ ۸۳/۱۲/۱۵ مؤید ادامه روند ثابت منحنی‌های همگرایی می‌باشد، هر چند تغییرات بسیار جزئی در دیواره سمت چپ در این ناحیه از تونل دیده می‌شود که احتمالاً متأثر از همجواری این ایستگاه با تونل شرقی می‌باشد. آخرین قرائت‌ها قبل از کفبرداری در تاریخ‌های ۸۴/۰۲/۱۸ و ۸۴/۰۱/۱۸ مؤید تعادل در توده سنگی اطراف تونل در این ناحیه می‌باشند. همانطور که از نمودار همگرایی نسبت به زمان مشهود است، منحنی همگرایی در جهت‌های L-R و C-L بعد از باز شدن دهانه تونل غربی در تاریخ ۸۳/۱۲/۲۴ سیر نزولی به خود گرفته است که با توجه به نزدیکی این ایستگاه به دهانه خروجی تونل غربی، این رفتار می‌تواند ناشی از آزاد شدن تنش بعد از باز شدن دهانه خروجی تونل غربی می‌باشد. این رفتار در توده سنگ اطراف دو ایستگاه CW-۱۴ و CW-۱۵ که نزدیکتر به دهانه خروجی می‌باشند، بیشتر دیده می‌شود.

۶-۶-۱۵- ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱۴

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۱۲/۰۹ در فاصله ۱/۳۳ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۸۰۰ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۱۲/۱۰ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۱۸) در پیوست نشان داده شده است. نمودار همگرایی مؤید رفتار طبیعی سنگ حاصل از حفاری تونل غربی می‌باشد در یک بازه زمانی ۲۴ ساعته توده سنگ پیرامون تونل در این ناحیه دستخوش تغییراتی کمتر از یک میلیمتر شده است، بطوریکه دیواره سمت چپ تونل غربی در این ناحیه احتمالاً بدلیل همجواری رمپ دسترسی ایستگاه دانشگاه حالت واگرایی به خود گرفته و پس از آن در تاریخ ۸۳/۱۲/۱۲ به تعادل خود رسیده است. با نزدیک شدن سینه کار تونل شرقی به این ایستگاه شاهد تغییرات جزئی در توده سنگ این ناحیه می‌باشیم. قرائت انجام شده در تاریخ ۸۳/۱۲/۱۸ مؤید تغییرات کم در توده سنگ سمت راست سقف تونل در این ناحیه می‌باشد. با توجه به رسیدن سینه کار تونل شرقی به این ناحیه و نزدیک بودن این ایستگاه به دهانه خروجی تونل غربی، روند این تغییرات با قرائتهای بعدی کنترل شد تا تاریخ ۸۳/۱۲/۲۴ که حفاری تونل غربی به اتمام رسید نمودار این تغییرات با قرائتهای بعدی کنترل شد تا تاریخ ۸۳/۱۲/۲۴ که حفاری تونل غربی به اتمام رسید نمودار همگرایی یک روند ثابت داشته است. اما با باز شدن دهانه خروجی تونل غربی و با توجه به نزدیکی ایستگاه مزبور به دهانه خروجی، نمودار همگرایی بعد از تاریخ یاد شده مؤید آزاد شدن تنش در این ناحیه از تونل می‌باشد. سیر نزولی جهت L-R به خوبی نشان دهنده این موضوع می‌باشد قرائت در تاریخ ۸۴/۰۱/۲۴ مؤید به تعادل رسیدن توده سنگ پیرامون تونل در این ناحیه

می‌باشد. آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۰۵/۱۳ مؤید پایداری در توده سنگی اطراف تونل در این ناحیه می‌باشد.

۶-۶-۱۶- ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱۵

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۱۲/۱۹ در فاصله ۰/۸۵ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۸۱۲ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۱۲/۲۰ انجام شده است. نمودار همگرایی برحسب زمان در نمودار (الف-۱۹) در پیوست نشان داده است. این ایستگاه از جهت چگونگی رفتار سنگ قبل از باز شدن دهانه خروجی تونل غربی و کنترل بیشتر، نصب گردید و سعی شد پینهای همگرایی کمتر از یک متر نسبت به سینه کار نصب شوند. نمودار همگرایی، مؤید رفتار طبیعی سنگ حاصل از حفاری تونل غربی می‌باشد. همانطور که از نمودار همگرایی پیداست چون پینهای همگرایی به فاصله بسیار کمی از جبهه کار نصب شده‌اند (در حدود ۰/۸۵ متر) و تغییرات در توده سنگی در فاصله حدود یک قطر از سینه کار متوقف شده است و تغییرات در حد بسیار کم بوده و فقط ناشی از حفاری در این ناحیه می‌باشد. اما با باز شدن دهانه خروجی تونل غربی در تاریخ ۸۳/۱۲/۲۴ در اثر آزاد شدن تنش در توده سنگ پیرامون تونل، نمودار همگرایی سیر نزولی به خود گرفته و تغییرات به حدود صفر رسیده است. قرائت در تاریخ ۸۴/۰۱/۱۶ مؤید تعادل در توده سنگ تونل در این ناحیه می‌باشد. میزان کل تغییرات در این ایستگاه کمتر از یک میلی‌متر می‌باشد.

۶-۶-۱۷- ایستگاه همگرایی سنج ۱۶-CW

این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۴/۲۵ در فاصله ۰/۵۵ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه دوم در کیلومتر ۹+۹۹۳ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۴/۰۴/۲۶ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان و نمودار همگرایی بر حسب فاصله جبهه کار از ایستگاه و نیز و نمودار فاصله ایستگاه از جبهه کار بر حسب زمان به ترتیب در نمودارهای (الف-۲۰)، (الف-۲۱) و (الف-۲۲) در پیوست نشان داده شده است. این ایستگاه در فاصله کمی از سینه کار و در نزدیکی دهانه ورودی تونل غربی قطعه دوم نصب شده است. در تاریخ ۸۴/۰۵/۱۲ کفبرداری شده است و در تاریخ ۸۴/۰۵/۱۳ نیز از ایستگاه مزبور به صورت ایستگاه همگرایی سنجی پنج نقطه‌ای تبدیل شده و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۴/۰۵/۱۶ انجام گرفت. نمودار همگرایی نسبت به زمان برای جهت‌های جدید اندازه‌گیری ایستگاه پنج نقطه‌ای در نمودار (الف-۲۳) در پیوست نشان داده شده است. همانطور که از نمودار همگرایی (الف-۲۳) در پیوست مشهود است پس از کفبرداری از این ناحیه تغییراتی در حدود کمتر از یک میلیمتر در توده سنگ دیوارهای تونل دیده می‌شود که در نهایت این تغییرات در تاریخ ۸۴/۰۵/۱۹ به حدود صفر رسیده است. توده سنگ پیرامون تونل در این ناحیه پایدار ارزیابی می‌شود.

۶-۷- ایستگاه‌های همگرایی سنجی در تونل شرقی

۶-۷-۱- ایستگاه همگرایی سنج ۱-CE

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۲/۳۱ در فاصله ۲/۳۳ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۸۳/۲۴ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۳/۱ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف - ۲۴) در پیوست نشان داده شده است. نمودار همگرایی، مؤید همگرایی در تاریخ ۸۳/۰۳/۹ در توده سنگی دیواره سمت راست تونل می‌باشد، که حاصل از کف‌برداری تونل شرقی است. اما پس از بتن‌ریزی کف تونل و تکمیل سیستم نگهداری به تعادل خود در تاریخ ۸۳/۰۳/۱۱ رسیده است. همانگونه که در نمودار همگرایی بر حسب زمان مشاهده می‌شود. فاصله بین پین سقف و دیواره راست همگرا بوده و فاصله بین پین سقف با دیواره چپ و پین دیواره راست با پین دیواره چپ به صورت واگرا تغییر کرده است این ایستگاه به صورت هر دو ماه یکبار قرائت می‌شود و آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۰۵/۰۳ از این ایستگاه حاکی از تعادل در توده سنگی اطراف تونل می‌باشد.

۶-۷-۲- ایستگاه همگرایی سنجی ۲-CE

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۳/۱۶ در فاصله ۰/۶۸ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۱۰۱/۲۴ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۳/۱۷ انجام شده است نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف - ۲۵) در پیوست نشان داده شده است. نمودار همگرایی مؤید همگرایی کمی است که حاصل از حفاری تونل می‌باشد اما بعد از گذشت سه قطر فاصله ایستگاه از سینه کار، توده سنگی به تعادل خود در تاریخ ۸۳/۰۳/۲۶ رسیده

است. آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۰۵/۰۳ از این ایستگاه حاکی از تعادل در توده سنگی اطراف تونل می‌باشد.

۶-۷-۳- ایستگاه همگرایی سنجی ۳-CE

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۳/۳۰ در فاصله ۴/۲۹ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۱۲۶/۴۴ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۳/۳۱ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۲۶) در پیوست نشان داده شده است. نمودار همگرایی مؤید همگرایی کمی، ناشی از حفاری تونل می‌باشد که بعد از گذشت سه قطر فاصله ایستگاه از سینه کار، توده سنگی اطراف تونل به تعادل خود در تاریخ ۸۳/۰۴/۰۸ رسیده است و آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۰۵/۱۵ از این ایستگاه حاکی از تعادل در توده سنگی اطراف تونل می‌باشد.

۶-۷-۴- ایستگاه همگرایی سنجی ۴-CE

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۴/۱۸ در فاصله ۱/۶۱ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۱۷۸/۴۴ نصب و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۴/۲۰ انجام شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۲۷) در پیوست نشان داده شده است. نمودار همگرایی نشان دهنده همگرایی کمی است که ناشی از حفاری تونل می‌باشد و در تاریخ ۸۳/۰۵/۰۱ توده سنگ اطراف تونل به تعادل خود رسیده است و آخرین قرائت انجام شده از این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۵/۱۵ مؤید تعادل در توده سنگی پیرامون تونل در این ناحیه

می‌باشد.

۶-۷-۵- ایستگاه همگرایی سنج CE-۵

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۵/۲۱ در فاصله ۶/۱۴ متری از سینه‌کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۲۶۳/۱۰ نصب شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۲۸) در پیوست نشان داده شده است. در فاصله دو روز از نصب ایستگاه واگرایی در حدود ۴ میلیمتر در جهت C-L دیده می‌شود. میزان حداکثر همگرایی در این ایستگاه تا تاریخ ۸۳/۷/۱۵ تقریباً ۲/۵ میلیمتر در جهت C-R و L-R بوده است. همگرایی در این ایستگاه تا زمانی که فاصله از سینه کار حدود ۳۵ متر بوده است با سرعت نسبتاً زیادی افزایش یافته ولی پس از آن توده سنگی کاملاً به تعادل رسیده است.

۶-۷-۶- ایستگاه همگرایی سنج CE-۶

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۶/۰۷ در فاصله ۲/۱۵ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۳۱۵/۵۰ نصب شد نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۲۹) در پیوست نشان داده شده است. این ایستگاه نیز مطابق معمول بقیه ایستگاه‌ها نشان دهنده همگرایی در دو جهت L-R و C-R و واگرایی در جهت C-L می‌باشد که احتمالاً به دلیل تاثیر تونل غربی بر دیواره سمت راست تونل شرقی است تا تاریخ ۸۳/۷/۱۵ میزان حداکثر همگرایی ۰/۸ میلیمتر می‌باشد و توده سنگ اطراف تونل به تعادل نسبی خود رسیده است. در تاریخ ۸۳/۱۲/۱۲ نرخ همگرایی تقریباً به صفر رسیده و توده سنگ اطراف تونل در این ناحیه در تعادل می‌باشد. آخرین قرائت انجام شده در تاریخ ۸۴/۴/۱۸ نیز مؤید تغییرات کم توده سنگی در

دیواره های تونل می‌باشد که در یک بازه زمانی یک ماه این رفتار توده سنگی کاملاً طبیعی می‌باشد.

۶-۷-۷- ایستگاه همگرایی سنج ۷-CE

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۷/۰۲ در فاصله ۱/۷۵ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۳۸۲ نصب شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان در شکل (الف-۳۰) در پیوست نشان داده شده است. همانگونه که از نمودار مشهود است توده سنگ اطراف تونل در این ایستگاه در سه جهت همگراست که در این همگرایی در تاریخ ۸۳/۷/۱۵ تقریباً به تعادل رسیده و به نظر می‌رسد حرکت توده سنگ متوقف شده است. همانطور که از شکل (الف-۳۰) می‌توان مشاهده نمود سرعت همگرایی تا فاصله سه برابر قطر تونل از سینه کار زیاد و بعد از آن متعادل می‌شود.

۶-۷-۸- ایستگاه همگرایی سنج ۸-CE

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۷/۱۹ در فاصله ۲/۳۰ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۴۳۳/۵۰ نصب شد. نمودار همگرایی بر حسب زمان در شکل (الف-۳۱) در پیوست نشان داده شده است. همانگونه که از نمودار مشخص است، توده سنگ در فاصله یک برابر قطر از سینه کار، جابه‌جایی حداکثر ۲/۲ میلیمتر را داشته و پس از آن به تعادل نسبی رسیده است. آخرین قرائت انجام شده از این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۵/۱۶ حاکی از تغییرات کم در توده سنگی دیواره‌های تونل می‌باشد که احتمالاً ناشی از کفبرداری از تونل غربی در این ناحیه می‌باشد.

۶-۷-۹- ایستگاه همگرایی سنج ۹-CE

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۸/۱۷ در فاصله ۱/۱۵ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۵۲۱/۷۰ نصب شد. نمودار همگرایی بر حسب زمان در شکل (الف-۳۲) در پیوست نشان داده شده است. همانگونه که از نمودارها مشخص است با گذشت بیش از سه قطر فاصله از ایستگاه ۹-CE تغییرات حاصل از حفاری ثابت شده است.

۶-۷-۱۰- ایستگاه همگرایی سنج ۱۰-CE

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۹/۱۳ در فاصله ۰/۸ متری از کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۵۷۱/۸۰ نصب شد. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۳۳) در پیوست نشان داده شده است. سنگ سینه کار و سقف بخصوص از ناحیه چپ به شدت هوازده و ریزشی بود (سازمان قطار شهری اصفهان و حومه، ۱۳۸۴). علیرغم ریزشی بودن این ناحیه از تونل، نمودار همگرایی مؤید تغییرات کمتر از یک میلیمتر از ناحیه سقف می‌باشد.

۶-۷-۱۱- ایستگاه همگرایی سنج ۱۱-CE

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۱۰/۱۲ در فاصله ۲/۳ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۶۲۵/۸۰ نصب شد. نمودار همگرایی بر حسب زمان در نمودار (الف-۳۴) در پیوست نشان داده شده است. همانگونه که از نمودار مشخص است با گذشت نزدیک به ۲ قطر فاصله از سینه کار روند تغییرات حاصل از حفاری ثابت شده است. آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۰۵/۲۲ حاکی از تعادل در توده سنگی پیرامون تونل در این ناحیه می‌باشد.

۶-۷-۱۲- ایستگاه همگرایی سنج CE-۱۲

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۱۱/۱۳ در فاصله ۱/۷ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۶۹۸ نصب شد. نمودار همگرایی بر حسب زمان در شکل (الف-۳۵) در پیوست نشان داده شده است. این ایستگاه در حدود کیلومتر ایستگاه CW-۱۲ نصب گردید که در این ناحیه از تونل شرقی نیز همانند تونل غربی سنگ سقف تونل از هوازدگی قابل توجهی برخوردار بود همانگونه که از نمودار مشخص است با اجرا شدن عملیات شاتکریت و نصب قاب مطابق طرح ارائه شده با گذشت کمتر از دو قطر فاصله از سینه کار روند حاصل از حفاری ثابت شده است. نمودار همگرایی بر حسب زمان مؤید تغییرات در توده سنگ دیواره های تونل در فاصله دو روز به میزان ۰/۷ میلیمتر می‌باشد همانطور که از نمودار مشهود است تا تاریخ ۸۳/۱۱/۲۲ روند تغییرات ثابت شده است. و آخرین قرائت در تاریخ ۸۴/۰۵/۲۲ حاکی از تغییرات بسیار کم در توده سنگی اطراف تونل می‌باشد که احتمالاً ناشی از کف برداری از تونل غربی در این ناحیه می‌باشد.

۶-۷-۱۳- ایستگاه همگرایی سنج CE-۱۳

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۱۲/۰۳ در فاصله ۱/۵ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۵۲۱/۷۰ نصب شد. نمودار همگرایی بر حسب زمان در شکل (الف-۳۶) در پیوست نشان داده شده است. همانطور که از نمودارها مشخص است تغییرات حاصل از حفاری در توده سنگی با یک نرخ پایین همگرایی آغاز شده و روند آن پس از گذشت بیش از دو قطر از سینه کار ثابت شده است. بین سقف حرکت چندان زیادی نداشته است.

اما نمودار همگرایی بر حسب زمان مؤید تغییرات در توده سنگ دیواره‌های تونل در فاصله دو روز به میزان ۰/۴ میلیمتر می باشد. این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۵/۲۰ کف برداری شده و در همین تاریخ نیز به صورت ایستگاه همگرایی سنجی پنج نقطه ای تبدیل شد و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۴/۰۵/۲۲ انجام گرفت. نمودار همگرایی نسبت به زمان برای جهت‌های جدید اندازه مشهود است. علیرغم کف برداری از این ناحیه از تونل شرقی هنوز تغییراتی در توده سنگی دیواره‌های تونل دیده نمی‌شود و می‌بایست با قرائتهای مستمر بعدی رفتار سنگ در این ناحیه از تونل کنترل شود.

۶-۷-۱۴- ایستگاه همگرایی سنج CE-۱۴

این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۱/۰۳ در فاصله ۱/۹۵ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۸۱۵+۹ نصب شد. نمودار همگرایی بر حسب زمان در شکل (الف-۳۷) در پیوست نشان داده شده است. این ایستگاه در حدود ۷ متر نسبت به دهانه خروجی تونل شرقی نصب گردید تا رفتار سنگ قبل و بعد از باز شدن دهانه خروجی کنترل بیشتری شود همانگونه که از نمودار مشخص است با اجرا شدن عملیات شاتکریت و نصب قاب مطابق طرح ارائه شده با گذشت کمتر از یک قطر فاصله از سینه کار روند تغییرات حاصل از حفاری ثابت شده است و این تغییرات بسیار جزئی می‌باشد. اما با باز شدن دهانه خروجی تونل شرقی در تاریخ ۸۴/۰۱/۱۰ سیر تغییرات در نمودار شکل دیگری به خود گرفته و همانند تونل غربی، در این ناحیه از تونل شرقی در اثر باز شدن دهانه خروجی شاهد آزاد شدن تنش در توده سنگی و سیر نزولی نمودارهای همگرایی در جهت‌های C-L و L-R می‌باشیم هر چند توده سنگی سمت راست تونل سیر صعودی به خود گرفته است. قرائت در تاریخ ۸۴/۰۲/۲۱ مؤید تغییرات بسیار کم در توده سنگ پیرامون تونل در این ناحیه می‌باشد که می‌تواند ناشی از کف برداری از تونل غربی که از

ابتدای ایستگاه دانشگاه به سمت میدان آزادی آغاز شده است، باشد. این ایستگاه در تاریخ ۸۴/۰۴/۱۶ کفبرداری شد و در همین تاریخ نیز به صورت ایستگاه همگرایی سنجی پنج نقطه‌ای تبدیل و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۴/۰۴/۱۷ انجام شد نمودار همگرایی نسبت به زمان برای جهت‌های جدید اندازه‌گیری در شکل (الف-۳۸) در پیوست نشان داده شده است.

همانطور که از نمودار (الف-۳۷) در پیوست مشهود است. پس از کفبرداری از این ناحیه تغییراتی در حدود ۰/۷ میلیمتر در توده سنگی دیواره‌های تونل دیده می‌شود. این رفتار سنگ که در اثر کفبرداری و زیاد شدن نسبت ارتفاع تونل به عرض آن می‌باشد کاملاً طبیعی است.

۶-۸-۱- ایستگاه‌های نشست سنج سطحی در تونل غربی

۶-۸-۱-۱- ایستگاه نشست سنج سطحی (SM-W1)

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۲/۱۹ در فاصله ۱۲/۶۷- متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی در اصفهان در ۲۱۱+۹ تونل غربی از سطح رمین نصب شده است و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۲/۲۰ انجام شده است. که مؤید ۲ میلیمتر نشست در سطح زمین بالای تونل می‌باشد.

۶-۸-۲- ایستگاه نشست سنج سطحی (SM-W2)

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۴/۰۸ در فاصله ۲۱ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در ۳۱۰+۹ از سطح زمین نصب شده و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۴/۰۹ انجام شده است که مؤید عدم نشست در سطح زمین بالای تونل می‌باشد.

۶-۸-۳- ایستگاه نشست سنج سطحی (SM-W۳)

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۸/۱۲ در فاصله ۱۲/۸ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۴۵۵ تونل غربی از سطح زمین نصب شده است و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۰۶/۱۴ انجام شده است که مؤید نزدیک به سه میلیمتر نشست در سطح زمین بالای تونل می‌باشد.

۶-۸-۴- ایستگاه نشست سنج سطحی (SM-W۴)

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۶/۲۵ در فاصله ۱۳۸/۷۷ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۶۰۰ تونل غربی از سطح زمین نصب شده است و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۰۸/۲۸ انجام شده است که مؤید دو میلیمتر نشست در سطح زمین بالای تونل می‌باشد.

۶-۸-۵- ایستگاه نشست سنج سطحی (SM-W۵)

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۱۱/۰۷ در فاصله ۲۲/۹۰ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۷۵۰ تونل غربی از سطح زمین نصب شده است و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۱۱/۱۵ انجام شده است که مؤید عدم نشست در سطح زمین بالای تونل در این ناحیه می‌باشد.

۶-۸-۶- ایستگاه نشست سنج سطحی (SM-W۶)

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۱۲/۰۵ در فاصله ۸/۸۵ متری از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۸۰۰ تونل غربی از سطح زمین نصب شده است و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۱۲/۰۸ انجام شده است که مؤید نشست حدود یک میلیمتر در سطح زمین بالای تونل در این ناحیه می‌باشد.

۶-۸-۷- ایستگاه نشست سنج سطحی (SM-W۷)

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۱۲/۱۷ در فاصله ۲/۴۷ متری مانده از سینه کار سمت جنوب در تونل غربی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۸۱۴ تونل غربی از سطح زمین نصب شده است و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۱۲/۱۹ انجام شده است که مؤید نشست حدود یک میلیمتر در سطح زمین بالای تونل در این ناحیه می‌باشد.

۶-۹-۹- ایستگاه‌های نشست سنج سطحی در تونل شرقی**۶-۹-۱- ایستگاه نشست سنج سطحی (SM-E۱)**

این ایستگاه در تاریخ ۸۳/۰۷/۰۹ در فاصله ۱۳/۸- متری از سینه کار سمت جنوب در تونل شرقی قطعه جنوبی متروی اصفهان در کیلومتر ۹+۴۲۰ تونل شرقی از سطح زمین نصب شده است و قرائت مبنای آن در تاریخ ۸۳/۷/۱۱ انجام شده است که مؤید نشست ۳ میلیمتری در سطح زمین بالای تونل می‌باشد.

فصل هفتم

تحلیل پایداری تونل‌های دوقلوی

قطار شهری اصفهان با استفاده

از روش‌های تجربی و عددی دوبعدی

۷-۱- مقدمه

قطار شهری اصفهان بطول ۳۸۷۵ متر از میدان آزادی شروع شده و تا حدود ترمینال صفا ادامه خواهد داشت. بر پایه پلان و پروفیل موجود و تطبیق آن با پروفیل ساختار شناسی و یافته‌های محلی، در طول این مسیر، بحرانی‌ترین مقاطع جهت محاسبات پایداری و طراحی سازه در نظر گرفته شده است. این فصل مشتمل بر دو بخش تجربی و نظری می‌باشد. در این فصل در ابتدا به کمک روش پیشنهادی بنیاوسکی (۱۹۸۹) در خصوص ضخامت شاکریت همراه با پیچ سنگ و یا قابهای فلزی بر اساس امتیازدهی RMR، همچنین روش امتیازدهی Q ارائه شده توسط بارتون، پوشش نگهدارنده اولیه انتخاب شده است. سپس با استفاده از مدلسازی‌های عددی به کمک نرم‌افزار Plaxis 2D Version 7.2 تحلیل پایداری انجام گرفته و سیستم نگهدارنده مناسب پیشنهاد شده است. برای مدلسازی در این فصل جزئیات مراحل اجرایی تونل (روش NATM) به همراه مشخصات کاملی از بارگذاری‌های مختلف، وضعیت توده خاک و سنگ و پلان و پروفیل مسیر و مقاطع تونل‌ها با استفاده از نرم افزارهای عددی در حالات مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است و بر اساس نتایج نیروهای بدست آمده، طراحی سیستم‌های نگهدارنده انجام پذیرفته است. عملکرد سیستم نگهدارنده اولیه با توجه به

روند اجرایی، با ابزارهای دقیق رفتارسنجی شده بر اساس نتایج حاصله در فصل بعدی کنترل خواهد شد.

۷-۲- روش جدید تونل‌زنی اتریشی NATM^۱

با توجه به شرایط ژئوتکنیکی و ساختارشناسی مسیر متروی شهری اصفهان، استفاده از روش NATM یکی از مناسب‌ترین روشها جهت حفر تونل می‌باشد. استفاده از شاتکریت بعنوان نگهدارنده موقت فضاهای زیرزمینی از جمله تونل‌ها، از روند رو به رشدی برخوردار بوده، بطوریکه همواره مقالات بسیاری از پروژه‌های اجرا شده در سطح دنیا به این روش در مراکز علمی و تحقیقاتی ارائه می‌شود. رابسونج^۲ نقش بسیار موثری در معرفی شاتکریت بعنوان یک سیستم نگهدارنده در سال ۱۹۳۰ ایفا نمود. وی در این سالها در سطح وسیعی در سراسر جهان به معرفی شاتکریت پرداخت و بعنوان یکی از اصلی‌ترین بنیان روش نوین تونلسازی اتریشی در جهان شناخته شده است.

در سالهای اخیر، صنعت حفاری تونل یکی از اصلی‌ترین مصرف کنندگان شاتکریت در جهان بشمار می‌آید و با توجه به روند رو به رشد این صنعت، ابزارها و روش‌های بتن پاشی نیز به سرعت با رشد و گسترش قابل توجهی روبرو بوده است. اجرای همزمان و ایجاد چند جبهه‌کار از خصوصیات بارز استفاده از این روش است (Hoek, 1995).

هدف اصلی روش جدید تونل‌زنی اتریشی (NATM) برای فضاهای زیرزمینی و بخصوص تونل، استفاده از قابلیت و ظرفیت باربری توده سنگ و خاک به عنوان عنصر اصلی سازه ای برابر می‌باشد. برای این منظور باید کمترین دستخوردگی در زمان حفاری در توده سنگ و خاک ایجاد شود و در

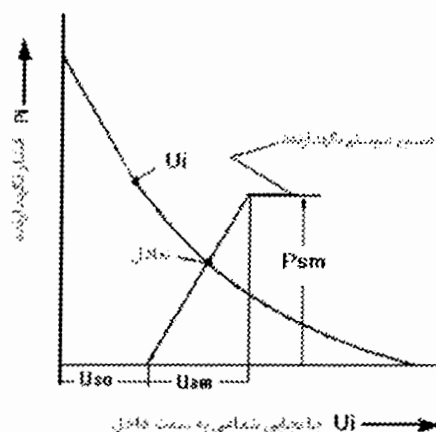
1 - New Austrain Tunneling Method

2 - Robcewicz

نتیجه نیاز کمتری به اعضای سازه‌ای برای باربری بوجود آید. در این روش بخشی از باربری بر عهده توده سنگ نهاده می‌شود که در نتیجه منجر به طرح اقتصادی‌تری خواهد شد.

۷-۳- معیارها و الگوهای مورد استفاده

طراحی شاتکریت به عنوان سیستم نگهدارنده فضاهای زیرزمینی، فرآیندی بسیار پیچیده است. فعل و انفعال پیچیده بین توده سنگ‌های سست شده اطراف تونل و لایه‌ای از شاتکریت با ضخامت متغیر (که خواص مقاومتی آن در هر مرحله از گیرش و سخت شدن شاتکریت، تغییر نماید)، اکثر اقدامات در جهت تحلیل‌های تئوریکی را غیر ممکن می‌سازد، هر چند که با رشد و توسعه روشهای عددی امکان انجام تحلیل‌های واقعی‌تر پدید آمده است (Hoek, 2000-a). شکل (۷-۱) منحنی شماتیک واکنش سیستم نگهدارنده و توده سنگ اطراف را نمایش می‌دهد.



شکل ۷-۱- واکنش سیستم نگهدارنده برای تخمین پایداری در نتیجه جابجایی دیواره تونل (Hoek, 1995)

با توجه به آنکه همیشه حداقل یک مرحله از سیکل حفاری در فاصله بین سینه‌کار و نزدیکترین نگهدارنده نصب شده، اجرا می‌شود، لذا قبل از آنکه نگهدارنده تأثیر خود را بگذارد تغییر شکل رخ

می‌دهد. این جابجایی اولیه کلی با U_{50} معرفی می‌شود. همانطور که در شکل مشخص است، به محض نصب، سیستم نگهدارنده شروع به تغییر شکل الاستیک خواهد کرد. در این حالت حداکثر جابجایی الاستیک که می‌تواند در سیستم نگهدارنده پدید آید U_{5m} بوده و حداکثر فشار نگهداری P_{5m} می‌باشد که همان نقطه تسلیم سیستم نگهدارنده است (Hoek, 1995).

به همراه پیشروی‌های جبهه‌کار و فاصله گرفتن از نقطه مورد بررسی، سیستم نگهدارنده در واکنش به جمع شدگی تونل به طور الاستیک تغییر شکل خواهد داد. این تغییر شکل تحت تأثیر مشخصه‌های سیستم نگهدارنده، توده سنگ در برگیرنده تونل و سطح تنش می‌باشد. بدلیل آنکه در تعیین منحنی ارائه شده عوامل زیادی دخیل هستند، لذا می‌توان با انجام مطالعات پارامتری، ترکیبات مختلف بارگذاری را بر روی سیستم نگهدارنده اولیه و در نهایت نیروی وارده بر پوشش نهایی تعیین کرد. این روش در تحلیل و طراحی تونل‌های دوقلوی اصفهان مورد استفاده قرار گرفته است.

۷-۴- سیستم‌های نگهدارنده اولیه

سیستم نگهدارنده متداول اولیه که در تونل‌ها به کار گرفته می‌شود، شامل اجزای زیر می‌باشد:

Shotcrete	۱- بتن پاشی
Welded Wire Mesh	۲- شبکه تور فولادی
Lattice Girder	۳- قاب مشبک فولادی
Rib Frame	۴- قاب فولادی

اجزای فوق بصورت منفرد و یا ترکیبی در طول مسیر تونل‌ها استفاده می‌شود.

۷-۴-۱- بتن پاشی

بتن پاشی مهمترین و متداولترین جزء سیستم نگهدارنده اولیه محسوب می‌شود. بتن پاشی از هوازدگی توده خاک و سنگ و ریزش موضعی جلوگیری می‌کند. همچنین به همراه شبکه تور فولادی به دلیل عملکرد پیوسته و یکنواخت از جابجایی زیاد سطح توده خاک و سنگ جلوگیری کرده و باعث استفاده خوب از قابلیت و ظرفیت باربری توده خاک و سنگ می‌گردد. همچنین به عنوان عضو سازه‌ای یکنواخت و گسترده، باربری سازه‌ای نیز خواهد داشت (امامی تبریزی، ۱۳۷۶).

۷-۴-۲- شبکه تور فولادی

به دلیل مقاومت کم خمشی و کششی بتن در سیستم بتن پاشی، شبکه تور فولادی بعنوان باربر نیروهای کششی و لنگر خمشی در بتن پاشی و همچنین حایل گسترده در جهت توزیع بارهای اعمال شده عمل می‌کند (امامی تبریزی، ۱۳۷۶).

۷-۴-۳- قاب مشبک فولادی

قاب مشبک فولادی در دو حالت سه شاخه یا چهار شاخه متشکل از میلگردهای مسلح کننده بتن می‌باشند. به دلیل اینکه این قاب‌ها به طور سریع و در ابعاد مختلف در کارگاه قابل ساخت بوده و از همه مهمتر بعنوان عامل مسلح کننده قوی در بتن پاشی مدفون می‌شوند، در دو دهه اخیر در سطح جهان و در ایران استفاده زیادی داشته است (امامی تبریزی، ۱۳۷۶).

۷-۴-۴- قاب فولادی

قابهای فولادی از پروفیل‌های فولادی ساخته می‌شوند و به عنوان بخشی از سیستم نگهدارنده در مناطقی به کار می‌روند که زمین بسیار سست و ریزشی بوده و سایر سیستم‌های نگهدارنده نتوانند پایداری کافی تونل را تامین نمایند. این قابها در کارگاه و در ابعاد مختلف قابل ساخت بوده و بعنوان عامل مسلح کننده بتن بکار می‌روند (امامی تبریزی، ۱۳۷۶).

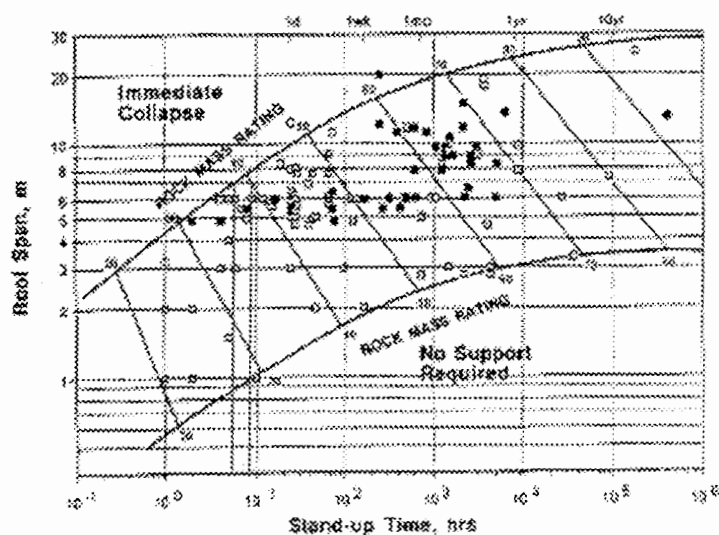
۷-۵- طراحی سیستم نگهدارنده اولیه به روش‌های تجربی

روشهای تجربی مبتنی بر اطلاعات موجود و مشاهدات حین اجرا، از پروژه‌های مختلف در سطح جهانی و استفاده از روشهای آماری برای شناخت وضعیت توده سنگ و خاک و کمی کردن مشخصات آن می‌باشد. روش‌های تجربی طراحی سیستم نگهدارنده اولیه، بهترین روش‌های شناخته شده و متداول می‌باشند، از روش‌های مختلف تجربی می‌توان به روش ترزاقی ۱۹۴۶، بنیاوسکی، ۱۹۸۹، بارتن ۱۹۷۴، ۱۹۹۳، هوک و براون ۱۹۸۰، و هوک ۲۰۰۰ اشاره کرد.

به طوری که در بخش‌های قبلی اشاره شد، طراحی سیستم نگهدارنده اولیه بیشتر بر مبنای روش‌های تجربی می‌باشد. در ابتدا باید زمان خود ایستایی تونل بدون سیستم نگهدارنده اولیه با توجه به مقادیر RMR بررسی شده و سپس به کمک روابط و نمودارهای موجود در روش‌های تجربی نسبت به طراحی سیستم نگهدارنده اولیه اقدام نمود.

۷-۵-۱- زمان خود ایستایی

بر مبنای مقادیر RMR بدست آمده از مطالعات ژئوتکنیک (RMR=20-40)، طبق نمودار ارائه شده توسط آقای بیناوسکی (۱۹۸۹)، زمان خود ایستایی تونل^۱ کم بوده (در حدود ۷ تا ۹ ساعت) و لازم است پس از هر مرحله حفاری با دستگاه حفار مکانیکی (Road Header) در طول‌های حداکثر تا ۲ متر، شاتکریت لایه اول اجرا گردد (شکل ۷-۲).



شکل ۷-۲- نمودار زمان خود ایستایی تونل (Bieniawski, 1989)

1 - Stand-up Time

۷-۵-۲- تعیین فشار یا تنش روی سیستم نگهدارنده

۷-۵-۲-۱- روش ترزاقی

این روش توسط آقای ترزاقی در سال ۱۹۴۶ ارائه شده است. بر طبق این روش توده سنگ در مسیر تونل مترو بین میدان آزادی و ایستگاه شیخ کلینی در ردیف خیلی بلوکی و لایه‌ای و ردیف کلاً خرد شده قرار می‌گیرد. بار سنگ بر روی سیستم نگهدارنده به صورت زیر بدست می‌آید (Terzaghi, 1946).

فشار وارد بر سقف $Proof = H_p \times \gamma$

$$H_p = A \times (B + H_t)$$

A ضریب

B = 7.1 m عرض دهانه تونل

H_t = 7.0 m ارتفاع تونل

$\gamma = 0.027 \text{ MN/m}^3$ وزن واحد حجم معادل توده سنگ و خاک

A = 0.35 تا 1.1 طبق جدول برای حالت خیلی بلوکی و لایه‌ای (هراتی، ۱۳۷۴).

$H_p = 0.35 \times (7.0 + 7.1) = 4.935 \text{ m}$ بنابراین برای حالت خیلی بلوکی و لایه‌ای در بهترین حالت

$$Proof = 4.935 \times 0.027 = 0.13 \text{ MPa} \approx 1.3 \text{ Kg/Cm}^2 = 13 \text{ ton/m}^2$$

$$P_{wall} = KProof = 0.10 \text{ MPa} \approx 1.0 \text{ Kg/Cm}^2 = 10 \text{ ton/m}^2 \text{ (k=0.8)}$$

A = 0.7 برای حالت خیلی بلوکی و لایه‌ای در حالت متوسط

$$H_p = 0.7 \times (14.1) = 9.87 \text{ m}$$

$$\text{Proof} = 9.87 \times 0.027 = 0.26 \text{ MPa} \approx 2.6 \text{ Kg/Cm}^2 = 26 \text{ ton/m}^2$$

$$P_{\text{wall}} = 0.20 \text{ MPa} \approx 2.0 \text{ Kg/Cm}^2 = 20 \text{ ton/m}^2$$

برای حالت خیلی بلوکی و لایه‌ای و با بدترین حالت ردیف کاملاً خرد شده

$$A = 1/1$$

$$H_p = 1/1 \times (14/1) = 14 \text{ m}$$

چنین روباره‌ای در طول مسیر بین میدان آزادی و ایستگاه شیخ کلینی وجود ندارد و لذا از این مقدار استفاده نمی‌شود.

۷-۵-۲-۲- روش اصلاح شده ترزاقی توسط دیر و همکاران

این روش اصلاح شده بار سنگ را برای سیستم نگهدارنده اولیه و نهایی بطور مجزا ارائه

می‌دهد. برای سیستم نگهدارنده اولیه بار سنگ به شرح زیر محاسبه می‌شود (terzaghi, 1946).

برای حالت خیلی بلوکی و لایه‌ای

$$A = 0 - 0.6$$

برای حالت کاملاً خرد شده در شرایطی که نشت مستمر آب وجود داشته باشد

$$A = 1.1$$

با توجه به شرایط هیدروژئولوژی تونل در هیچ قسمتی نشت مستمر آب وجود ندارد، بنابراین از ردیف ۶ برای بررسی فشار وارد بر تونل استفاده نمی‌شود.

لذا برای حالت خیلی بلوکی و لایه‌ای در بهترین حالت، $A = 0$

$$\text{Proof} = 0$$

$$P_{\text{wall}} = 0$$

برای حالت متوسط، $A = 0.3$

$$\text{Proof} = 0.3 \times (0.027 \text{ MN/m}^3 \times 14.1 \text{ m}) = 0.12 \text{ MPa} \approx 1.2 \text{ Kg/Cm}^2 = 12 \text{ ton/m}^2$$

$$P_{\text{wall}} = k \times \text{Proof} = 0.08 \text{ MPa} \approx 0.8 \text{ Kg/Cm}^2 = 8 \text{ ton/m}^2 (k=0.67)$$

در بدترین حالت، $A = 0.6$

$$\text{Proof} = 0.6 \times (0.027 \text{ MN/m}^3 \times 14.1 \text{ m}) = 0.23 \text{ MPa} \approx 2.3 \text{ Kg/Cm}^2 = 23 \text{ ton/m}^2$$

$$P_{\text{wall}} = k \times \text{Proof} = 0/16 \text{ MPa} \approx 1/6 \text{ Kg/Cm}^2 = 16 \text{ ton/m}^2$$

۷-۵-۲-۳- روش Q

روش طبقه‌بندی Q که توسط بارتن و همکاران در سال ۱۹۷۴ ارائه شده است مبتنی بر اطلاعات توده سنگ از پروژه‌های تونل در کشورهای اسکانديناوی بوده است. با استفاده از اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوتکنیک مقدار Q در توده سنگ Jssh (توده سنگ غالب در مسیر تونل) و همچنین توده سنگ Sf تعیین شده است.

جدول ۷-۱- امتیاز دهی Q برای توده سنگ Jssh (شرکت الموت، ۱۳۸۲)

طبقه‌بندی Q (بارتون، ۱۹۷۴)			
عدد شاخص	توصیف شاخص	توده سنگ Jssh	
۲۹	۲۹٪	RQD	۱
۹	سه دسته درزه	تعداد دسته‌درزه‌ها J_n	۲
۱/۵	صاف تا کمی زیر	وضعیت سطوح درزه‌ها J_r	۳
۶/۰-۴/۰	پرشدگی از رس و بخشی بدون پرشدگی	شرایط فرسایش درزه‌ها J_a	۴
۱	کمتر از ۵ Lit/min	وضعیت آب J_w	۵
۲/۵	نزدیک سطح	وضعیت تنش SRF	۶

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \Rightarrow Q = \frac{29}{9} \times \frac{1.5}{5} \times \frac{1.0}{2.5} = 0.39$$

روابط متعددی برای تبدیل RMR به Q توسط محققین ارائه شده است. از میان این روشها برای توده سنگ متوسط و ضعیف، روش زیر مناسب تر از سایر روابط می‌باشند (Zhang, 2005).

$$RMR=9\ln Q \quad 44$$

مقادیر RMR برای توده سنگ‌های میزبان در مسیر تونل برای توده سنگ غالب Jssh حدود ۳۴ می‌باشد. با استفاده از روابط فوق مقادیر Q در این محدوده به قرار زیر می‌باشند:

$$Jssh: \quad RMR = 34 \quad \longrightarrow \quad Q=0.33$$

همانطور که مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده از روش غیر مستقیم تعیین Q برای توده سنگ

Jssh تطبیق خوبی با Q حاصل از محاسبه مستقیم دارد. بنابراین برای تعیین فشار بر روی سیستم نگهدارنده با در نظر گرفتن حداقل و حداکثر مقادیر Q حاصل از نتایج محاسبات استفاده می‌شود.

$$Q = 0.39$$

بر اساس نتایج تحقیقات گریمستاد و بارتن (1993) ارتباط بین Q و فشار نگهدارنده سقف نهایی را می‌توان از رابطه زیر تخمین زد (Hoek, 2000-b).

$$P_{\text{roof}} = \frac{2\sqrt{Jn}}{3Jr} Q^{-1/3}$$

$$Jr = \text{ضریب زبری سنگ} = 1.5$$

برای حالت Q = 0.39 و Jn=9

$$P_{\text{roof}} = \frac{2\sqrt{9}}{3 \times 1.5} (0.39)^{-1/3} \approx 1.8 \text{ Kg/Cm}^2 = 18 \text{ ton/m}^2$$

$$P_{\text{wall}} = 0.7 P_{\text{roof}} \approx 1.26 \text{ Kg/Cm}^2 = 12.6 \text{ ton/m}^2$$

۷-۵-۳- تعیین سیستم نگهدارنده اولیه

۷-۵-۳-۱- روش ترزاقی

در روش ترزاقی با توجه به قدمت این روش، سیستم نگهدارنده متشکل از قاب‌های فلزی می‌باشد. در این روش برای هر دو حالت (ردیف‌های ۵ و ۶) استفاده از قاب‌های فلزی (I شکل) بطور پیوسته و با بستن حلقه در کف توصیه شده است (Kirkaldic, 1988).

۷-۵-۳-۲- روش RMR - بنیادوسکی ۱۹۷۶ و ۱۹۸۴

در روش RMR، بنیادوسکی طی جدولی برای تونل به شکل نعل اسبی به پهنای ۱۰ متر سیستم نگهدارنده اولیه را پیشنهاد داده است. به دلیل اینکه پهنای تونل‌های متروی اصفهان ۷/۱ متر می‌باشد، در طرح سیستم نگهدارنده پیشنهادی این جدول تعدیل اعمال می‌شود (Kirkaldic, 1988).

برای حالت سنگ ضعیف (RMR=20 -40) توصیه ایشان، حفاری نیمه بالایی تونل، اجرای سیستم نگهدارنده پس از مرحله حفاری در نیمه بالایی و سپس حفاری در نیمه پائینی و تکمیل سیستم نگهدارنده در این بخش می‌باشد. سیستم نگهدارنده پیشنهادی شامل یکی از موارد زیر است:

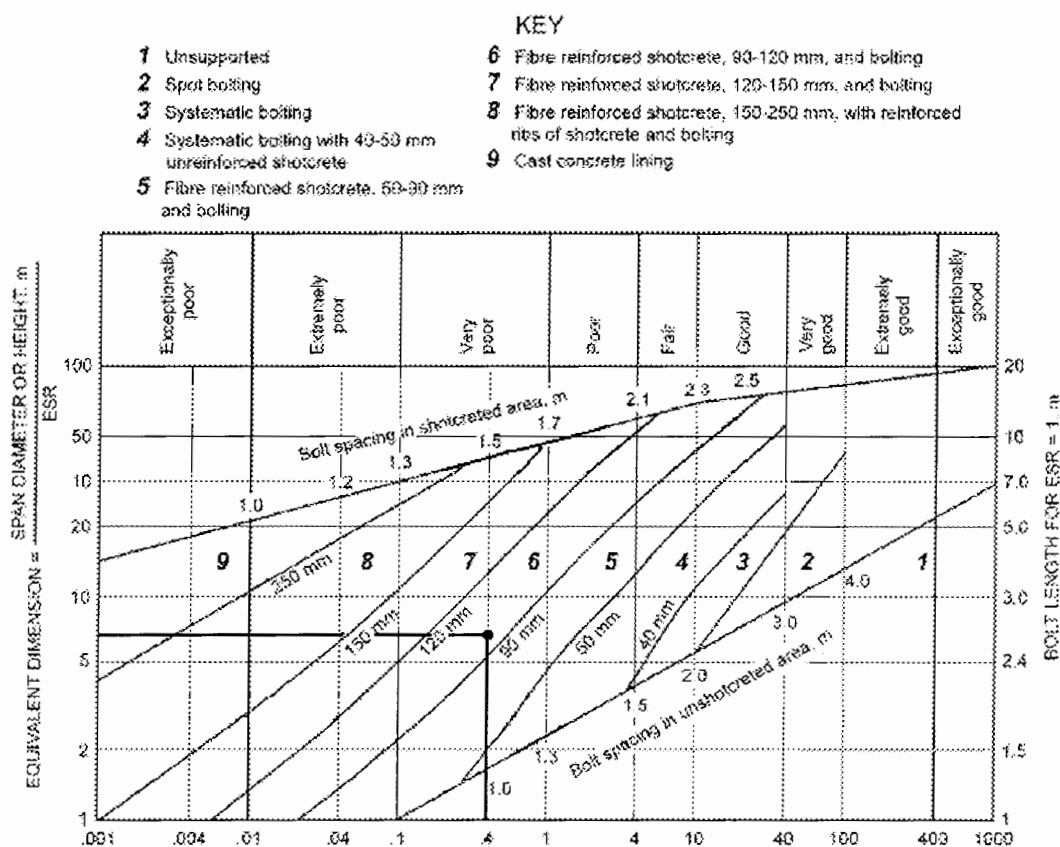
۱- پیچ سنگ مهاری از فولاد AIII و به قطر $\phi = 20 \text{ mm}$ با فواصل ۱/۵ متر در سقف و در طولهای ۴-۵ متر اجرا می‌شود.

۲- بتن پاشی به همراه شبکه تور فولادی به ضخامت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی متر در سقف و ۱۰۰ میلی متر در دیواره ها اجرا می‌شود.

۳- قاب‌های فلزی (Lattice Girder) سبک تا متوسط با فواصل ۱/۵ متر در محل‌هایی که لازم است اجرا می‌گردد.

۷-۵-۳-۳-روش Q

در روش Q، از نمودار مربوطه استفاده می‌شود. بر اساس این نمودار برای مقادیر Q، سیستم نگهدارنده به قرار زیر خواهد بود، شکل (۷-۳). در این حالت نوع پوشش با توجه به مدت زمان نسبتاً زیاد بهره‌برداری از آن تعیین شده است (Grimstad and Barton, 1993).



شکل ۷-۳- نمودار طراحی سیستم نگهدارنده اولیه با روش Q - گریمستاد ۱۹۹۳ (Grimstad, 1993)

برای حالت $Q=0.40$ ، نوع سیستم (۶) می‌باشد. در این حالت از سیستم‌های زیر استفاده می‌شود:

۱- پیچ سنگ مهاری از فولاد نوع AIII، به قطر $\varphi = 20 \text{ mm}$ با فواصل ۲-۴ متر

۲- بتن پاشی به همراه شبکه تور سیمی به ضخامت ۹۰-۱۲۰ میلیمتر اجرا می‌شود.

در بخش ۷-۷-۳ برای طراحی سیستم نگهدارنده و تحلیل عددی در نرم افزار Plaxis 2D Version 7.2

از سیستم نگهدارنده شماره ۲ و ۳ اشاره شده در روش RMR - بنیادوسکی در بند قبل به عنوان سیستم

نگهدارنده ورودی برای تحلیل در نرم‌افزار استفاده شده است.

۷-۶- مبانی مدلسازی عددی و تحلیل پایداری

۷-۶-۱- مقدمه

در این بخش، مبانی انجام تحلیل‌های عددی و مشخصات هندسی مدل ارائه شده است. با

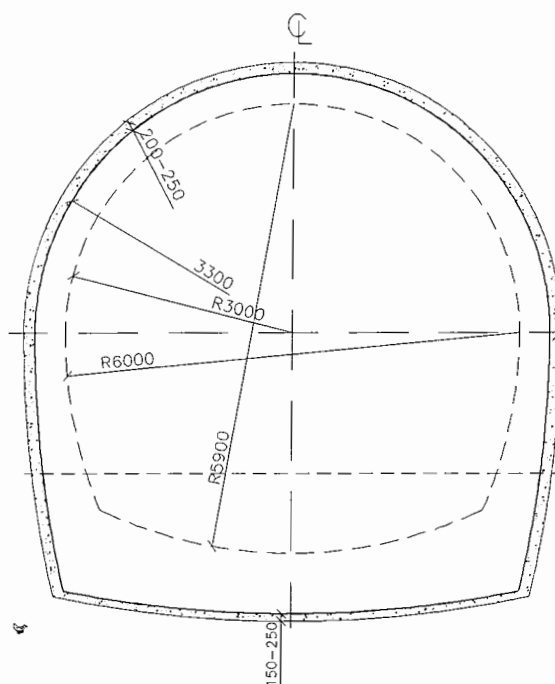
استفاده از روش‌های عددی معرفی شده در این فصل و با مدلسازی رفتار توده سنگ و خاک، نیروهای

وارد بر سیستم نگهدارنده اولیه تعیین و طراحی بر اساس آن صورت پذیرفته است.

۷-۶-۲- هندسه تونل

شکل ۷-۴ مقطع کامل شده تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان را نشان می‌دهد. تونل به صورت

دو قوسی بوده که اجزای هر یک از آنها در شکل نمایش داده شده است.



شکل ۷-۴- مقطع نمونه تونل (شرکت الموت، ۱۳۸۲)

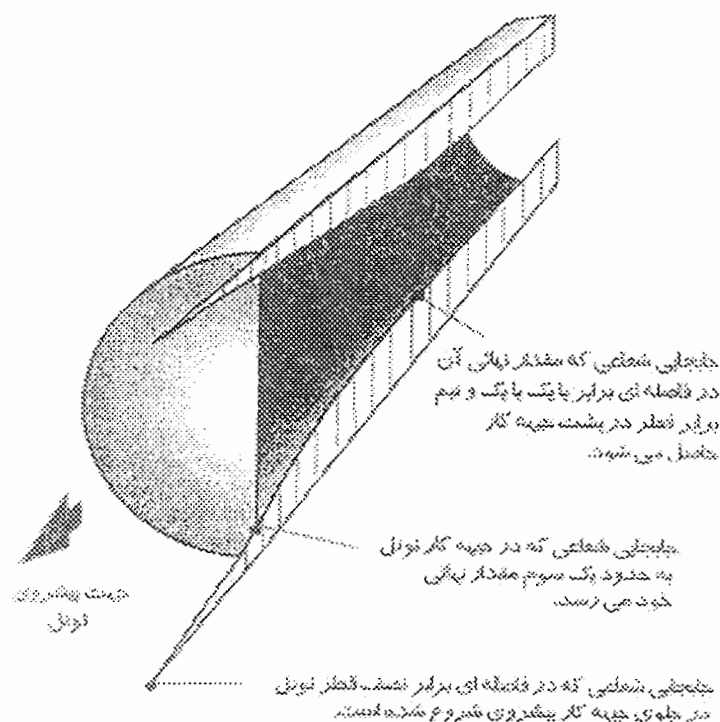
بر اساس پروفیل ساختار زمین شناسی و با توجه به طبقه‌بندی انجام شده از توده سنگ و خاک، پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان از قبیل پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول شکل‌پذیری تعیین گردیده است. در این بخش با توجه به مشخصات مکانیکی توده سنگ‌های میزبان، میزان روباره تونل، فاصله تونل‌ها، تحلیل و طراحی برای بحرانی‌ترین مقطع و با فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها ۲۰/۵ متر صورت پذیرفته است. با توجه به آنکه خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ‌های شیلی نظیر Shd و Shl شبیه به توده سنگ Jssh بوده و اندکی از آن قوی‌تر است، از تحلیل‌های بدست آمده از توده سنگ Jssh در جهت اطمینان استفاده شده است.

روش انتخاب شده برای تحلیل تونل با توجه به اندرکنش توده سنگی و پوشش موقت روش تحلیلی همگرایی می‌باشد. روش یاد شده بر اساس فرضیات محیط پیوسته انجام پذیرفته است. با توجه

به فاصله اندک دسته درزه‌ها و لایه‌بندی، امکان ایجاد گوه‌های بزرگ و رفتار کاملاً بلوکی وجود نداشته، بهمین دلیل تحلیل و طراحی بر اساس فرضیات محیط پیوسته انجام گرفته است. در ادامه فصل تحلیل‌های بررسی ناپایداریهای ساختاری با توجه به فاصله‌داری درزه‌ها و امکان وقوع آنها در واقعیت انجام شده که در انتهای فصل ارائه شده است.

۷-۶-۳- معیارهای تحلیل و طراحی سیستم نگهدارنده اولیه

اولین گام در تحلیل عددی سیستم‌های نگهدارنده، تعیین منحنی اندرکنش زمین می‌باشد. بررسی محققین مختلف نشان می‌دهد که تغییر شکل‌های توده سنگ از فاصله‌ای برابر با نصف قطر تونل در جلوی جبهه حفاری آغاز می‌شود. این تغییر شکل‌ها به تدریج اضافه می‌شود تا به حدود یک‌سوم جابجایی نهایی در جبهه حفاری برسد. با عبور از جبهه حفاری تغییر شکلها افزایش یافته تا در حدود $1/5$ برابر قطر تونل، مقدار تغییر شکل به حداکثر مقدار خود می‌رسد (شکل ۷-۵)، (Hoek, 1995).



شکل ۷-۵- الگوی جایجایی در سقف و کف تونل در حال پیشروی (قارونی نیک، ۱۳۸۰)

بنابراین باید به این نکته توجه کرد که همواره بخشی از تغییر مکان کلی قبل از نصب سیستم نگهدارنده اتفاق خواهد افتاد (حدود ۳۳ درصد) که قابل جلوگیری نمی‌باشد. علاوه بر این تغییر شکل ایجاد شده، تغییر شکل دیگری نیز با توجه به فاصله بوجود آمده بین جبهه کار و مقطع نصب سیستم نگهدارنده اتفاق می‌افتد که هر چه فاصله جبهه حفاری و مقطع نصب پوشش کمتر باشد، جایجایی ایجاد شده کوچکتر خواهد بود. با توجه به زمان خود ایستایی نسبتاً کم در توده سنگهای میزبان این قطعه، به صورت محافظه کارانه فرض شده است که نصب سیستم نگهدارنده اولیه بلافاصله پس از حفر صورت پذیرد که با توجه به استفاده از شاتکریت بعنوان سیستم نگهدارنده این امر امکان پذیر خواهد بود. بنابراین در نظر گرفتن ترخیص تنش کمتر برای سیستم نگهدارنده اولیه، نیروی بیشتری بر آن وارد خواهد شد که در جهت اطمینان می‌باشد.

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

۷-۶-۳-۱- روش تعیین منحنی‌های اندرکنش توده سنگ میزبان

همانطور که اشاره گردید از روش‌های عددی برای تعیین این منحنی‌ها استفاده شده است. در این تحلیل‌ها رفتار توده سنگ با معیار تسلیم موهر-کولمب در نظر گرفته شده است. منحنی همگرایی^۱ (GRC) با تعیین نقاط مختلف آن و رسم منحنی به کمک نرم‌افزار Plaxis 2D version 7.2 بدست آمده است، که برای هر یک از توده سنگ‌های میزبان مسیر تونل ترسیم شده است. در این منحنی‌ها، جابجایی یک نقطه مشخص از تونل نظیر تاج و دیواره محاسبه شده است.

۷-۶-۴- خصوصیات مدل به کار رفته در تحلیل‌ها

در بخش‌های قبلی، هندسه مدل، پارامترهای ژئوتکنیکی و روش حل ارائه گردید. در این بخش، موضوعات اصلی مدلسازی و تحلیل پایداری سیستم نگهدارنده اولیه مورد بررسی قرار گرفته

1 - Ground Reaction Curve

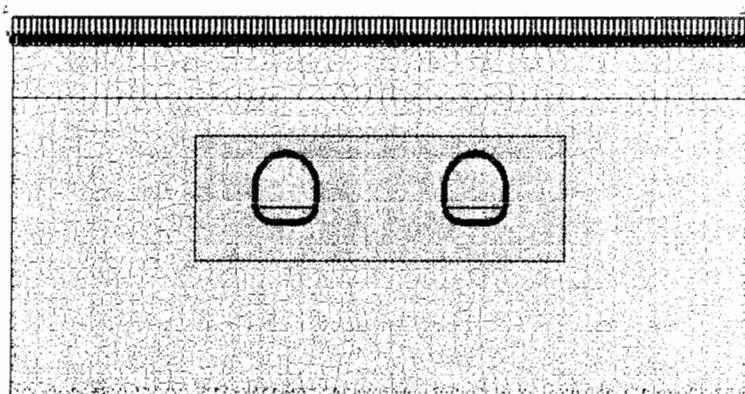
است. مباحثی که در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرند شامل خصوصیات هندسی مدل، ویژگی‌های المان، مشخصات به کار رفته برای مصالح و نیز جزئیات روش حل مسأله خواهند بود. سیستم آحاد در مرحله تحلیل‌ها و ارائه نتایج، سیستم متریک (Sec, KN, m) بوده و کلیه پارامترها و نتایج در این سیستم ارائه شده‌اند.

۷-۶-۴-۱- خصوصیات هندسی مدل

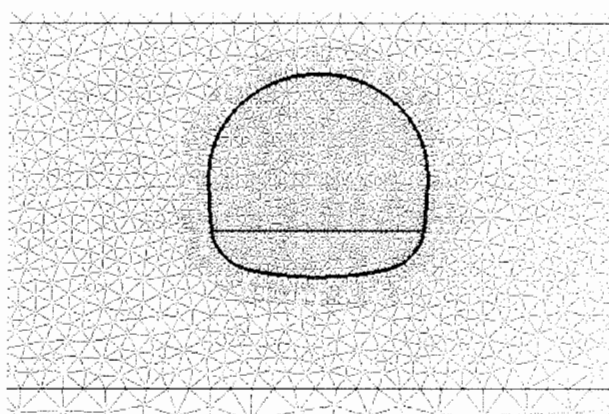
با توجه به هندسه مسیر و طول نسبتاً زیاد تونل نسبت به ابعاد آن، فرض رفتار کرنش مسطح، تقریب بسیار مناسبی از جواب واقعی خواهد بود. شکل‌های (۷-۶) و (۷-۷) نمونه‌ای از جزئیات مدلسازی و نحوه تقسیم المان‌ها و شبکه اجزای محدود نظیر را نمایش می‌دهد. همانگونه که در این شکلها مشخص است، در ناحیه اطراف تونل از مش‌بندی ریزتری نسبت به سایر نقاط استفاده شده است. برای حذف اثر شرایط مرزی از هر طرف حدود ۴۰ متر (حدود ۵ برابر قطر تونل) از توده سنگ و خاک مدل شده و با مرز مناسب جایگزین شده است. با توجه به نتایج تحلیل‌های انجام شده، اندازه محیط مدل شده کافی می‌باشد.

۷-۶-۴-۲- مدل رفتاری توده سنگ و خاک

برای مدلسازی رفتار الاستوپلاستیک مصالح خاک و سنگ از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. این مدل رفتاری با قابلیت مدلسازی اثر فشار همه جانبه توده خاک و سنگ روی سطح تسلیم و تغییر شکل‌های پلاستیک ایجاد شده، مدل مناسبی جهت ارزیابی محسوب می‌شود.



شکل ۶-۷- نمونه ای از مش‌بندی مورد استفاده در تحلیل‌ها



شکل ۷-۷- بزرگنمایی مقطع در اطراف تونل

شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای محدوده مدل، شامل استفاده از تکیه گاههای غلتکی بر روی محور عمودی و تکیه‌گاه ثابت در اطراف مدل می‌باشد.

۶-۷-۳- بارگذاری ترافیکی

با توجه به تردد خودروها، بارگذاری ترددی ۲ تن بر متر مربع که معادل با یک لایه خاک ۷۴ سانتی-متری است، در نظر گرفته شده است.

۷-۷- تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهدارنده اولیه

۷-۷-۱- مقدمه

تحلیل‌های کامپیوتری پایداری تونل با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 2D Version 7.2 انجام پذیرفته است در مدل مورد استفاده، هندسه، خصوصیات ژئومکانیکی مصالح، لایه‌بندی و مراحل حفاری در بخش‌های پیش توضیح داده شده است. هدف از این بخش بررسی عملکرد سیستم نگهدارنده تعیین شده به روش تجربی برای تونل در بخش‌های مختلف می‌باشد. برای اینکه هیچگونه تداخل اجرایی بین عملیات حفاری و بتن‌ریزی پوشش نهایی وجود نداشته باشد. لازم است تا سیستم نگهدارنده موقت برای مدت نسبتاً قابل توجهی بارهای وارده را تحمل نماید. در طراحی تونل فرض بر آن است که پس از انجام ترخیص تنش اولیه (مدلسازی اثر حفر در حالت سه بعدی) کلیه نیروهای وارده توسط سیستم نگهدارنده اولیه نگهداری خواهد شد. سیستم نگهدارنده اولیه با توجه به اینکه سازه موقت می‌باشد در مقابل بار زلزله طراحی نشده است و فرض بر آن است که نیروهای ناشی از زلزله توسط پوشش نهایی تحمل خواهد شد.

۷-۷-۲- تحلیل سیستم نگهدارنده اولیه تونل در توده سنگ Jssh

همانطور که در بخش پیش توضیح داده شد، به منظور ساده کردن مدلسازی مسیر میدان آزادی تا صغه، با بررسی شرایط زمین شناسی دو نوع توده سنگ Sf و Jssh بعنوان توده سنگ مبنای طراحی در نظر گرفته شده‌اند، توده سنگ Sf به عنوان ضعیف‌ترین ساختار موجود در این مسیر مطرح

بوده ولی تنها در ۲۰ متر از کل مسیر ایستگاه آزادی تا صغه قرار دارد که این طول در مقایسه با طول حفاری ۳۸۷۵ متری بسیار ناچیز می باشد و علاوه بر اینکه پارامترهای مقاومتی آن اندکی از پارامترهای مقاومتی Jssh کمتر می باشد و توده سنگ Jssh نیز توده سنگ غالب مسیر می باشد و سایر انواع توده سنگ های موجود، به یکی از این نوع سنگ تبدیل گشته اند.

در فصل زمین شناسی از دو روش RMR و GSI برای تعیین پارامترهای مقاومتی توده سنگهای میزبان استفاده شده است. با توجه به نتایج محاسبه شده از روش GSI برای تونل به عمق ۱۰ متر، زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ Jssh برابر با ۴۳ درجه خواهد شد. نتایج بدست آمده از GSI برای توده سنگ Jssh با توجه به آنکه توده سنگ قوی تری می باشد به واقعیت نزدیک به نظر می رسد. بهمین دلیل مستقیماً از نتایج GSI-2002 برای توده سنگ Jssh استفاده شده است. با ملاحظه نتایج بدست آمده از دو روش و بر پایه قضاوت مهندسی، مشخصات ژئومکانیکی در نظر گرفته برای این نوع سنگ به شرح زیر است:

Jssh

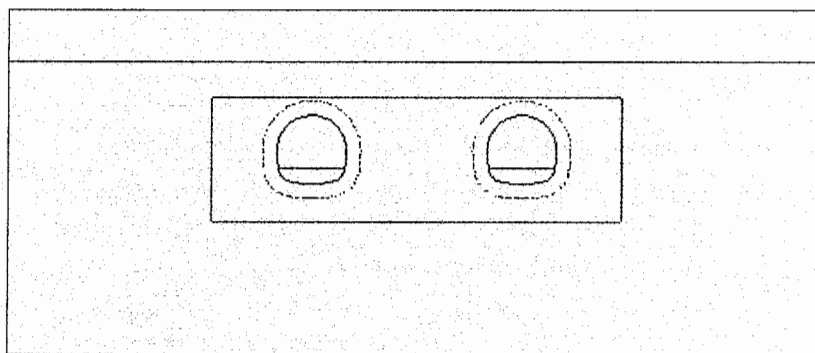
توده سنگ:

$$\varphi = 41^\circ$$

$$C = 177 \text{KN} / \text{m}^2$$

$$E = 2.7 \text{Gpa}$$

$$\nu = 0.32$$

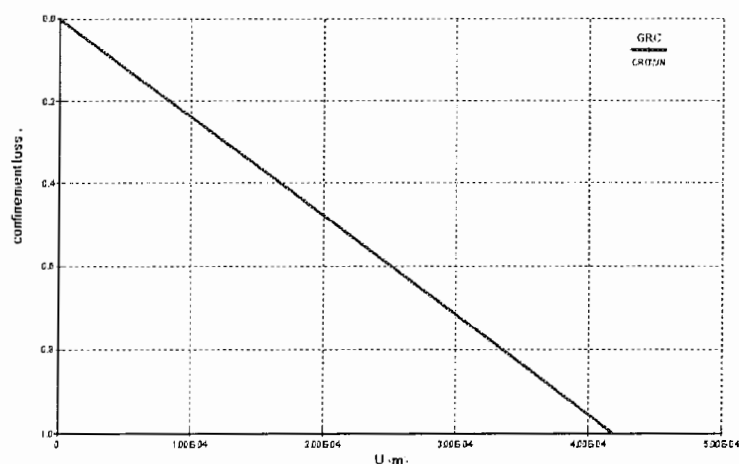


شکل ۷-۸- مدل کامپیوتری تونل و شبکه المان‌های محدود

مقطع با مدلسازی توأم توده‌سنگ و سازه نگهدارنده به کمک نرم‌افزار PLAXIS2D Version 7.2 با روش عددی المان محدود تحلیل شده است. شبکه المان محدود با استفاده از المانهای مثلثی ۶ گرهی و بصورت اتوماتیک^۱ ساخته شده است. در شکل (۷-۸) نمونه‌ای از مدل کامپیوتری تونل و شبکه المان محدود نمایش یافته است. به منظور مدلسازی اثرات سه بعدی پیشرفت جبهه حفاری لازم است تا درصد آزادسازی تنش جهت شبیه سازی انتقال تنش و آزادسازی تنش ناشی از نزدیک شدن جبهه حفاری به مقطع تعیین گردد. برای این منظور منحنی اندرکنش زمین (GRC) در حفاری بخش‌های فوقانی و تحتانی مقطع رسم شده است که در شکل (۷-۹) و (۷-۱۰) نمایش یافته است. این منحنی‌ها با حذف المانهای داخل مرز حفاری و اعمال تدریجی نیروهای نامتعادل گرهی روی مرز حفاری حاصل شده‌اند. لازم به توضیح است که برای مدلسازی دقیق چند حالت مختلف بررسی شده است. در حالت اول، یکی از تونل‌ها به عنوان تونل پیشرو از جبهه حفاری جلو افتاده و فاصله قابل توجهی از تونل دوم گرفته است که در این حالت تنها یکی از تونل‌ها در بررسی و مدلسازی GRC ذکر شده است.

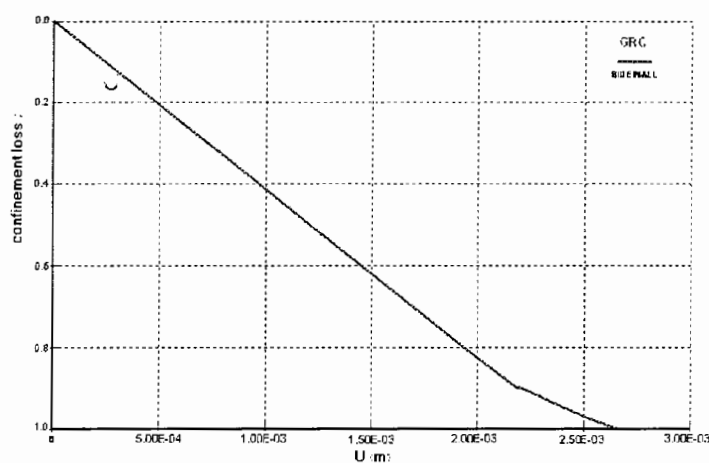
1 - Automatic mesh generation

الف - تاج تونل



شکل ۷-۹- نمایش دهنده GRC در توده سنگ Jssh در تاج تونل

ب - دیواره تونل



شکل ۷-۱۰- نمایش دهنده GRC در توده سنگ Jssh در دیواره تونل

محور افقی بیانگر جابجایی بر حسب متر محور قائم بیانگر آزاد سازی تنش^۱ می‌باشد. منحنی

شکل (۷-۹) نشان می‌دهد که حداکثر تغییر شکل قائم تاج در حفاری تونل در توده سنگ Jssh برابر

۰/۴۲ میلی‌متر می‌باشد. نکته قابل توجه در این منحنی خطی بودن رابطه بین آزادسازی تنش و تغییر

مکان تاج تونل در این توده سنگ است. با توجه به منحنی‌ها خواهیم داشت:

1- Stress Relaxation = confinement reduction = confinement loss

$$D_{md} = 0/42\text{mm}$$

$$\frac{1}{3} D_{md} = 0/14\text{mm}$$

D_m = maximum displacement جابجایی ماکزیمم در تاج تونل

با توجه به بخش ۷-۶-۳، یک سوم جابجایی‌ها در جبهه‌کار رخ میدهد با استفاده از منحنی

GRC، درصد آزادسازی تنش در توده سنگ Jssh معادل ۳۵ درصد تعیین می‌گردد. توجه به این نکته ضروریست در حین اجرا همواره شاتکریت مقطع حفاری شده عقب‌تر از سینه‌کار می‌باشد، بنابراین آزادسازی تنش اندکی بیش از این مقدار خواهد بود. به این ترتیب برای در نظر گرفتن اثرات سه بعدی پیشرفت جبهه حفاری، ۳۵ درصد از نیروهای نامتعادل گرهی ناشی از حذف المانهای داخل مرز حفاری قبل از فعال‌سازی المانهای سیستم نگهدارنده به تعادل رسیده است. پس از فعال‌سازی المانهای پوشش نگهدارنده موقت، مابقی نیروها به تعادل رسیده و به این ترتیب تأثیر حرکت جبهه حفاری و اعمال نیرو به المانهای پوشش مدلسازی شده است. با برقراری تعادل میدان تغییر شکل در توده سنگ اطراف و نیروهای وارد بر المان سیستم نگهداری تعیین می‌شود.

با توجه به توضیحات فوق الذکر می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که زمانی که یکی از تونل‌ها

بعنوان تونل پیشرو در توده سنگ مسیر حرکت می‌کند در توده سنگ شیلی ۳۵ درصد از نیروهای

گره‌ی قبل از نصب المانهای پوشش موقت آزاد خواهند شد. بنابراین مراحل مدلسازی حفاری و نصب

پوشش در بخش فوقانی مقطع در ۳ مرحله بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

فاز ۱ - حذف المانهای داخل مرز حفاری بخش فوقانی و آزادسازی درصدی از نیروهای نامتعادل گرهی

متناسب با نوع توده سنگ

فاز ۲ - فعال‌سازی المانهای پوشش در بخش فوقانی و آزادسازی مابقی نیروهای نامتعادل گرهی تا

برقراری تعادل کامل

فاز ۳ - حذف المانهای داخل مرز حفاری بخش تحتانی و فعال‌سازی المانهای پوشش

در این بخش از همین روند در تحلیل تونل دوم نیز استفاده شده است، با این تفاوت که در

حفر تونل دوم تأثیر حفر اولیه تونل اول نیز در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از تحلیل فاز ۱،

وضعیت تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در توده سنگ را پس از حفاری بخش فوقانی و قبل از نصب سیستم

نگهدارنده مشخص می‌سازد. در اشکال (۷-۱۱) الی (۷-۱۷) تغییر مکان‌های افقی و قائم توده

سنگ، تنش برشی نسبی^۱ در پایان فاز یک تحلیل ارائه شده است.

تنش برشی نسبی یک مقدار تخمینی از مقدار فاصله بین نقطه تحت تنش تا مرز شکست را

مشخص می‌کند. تنش برشی نسبی به صورت زیر معرفی می‌شود.

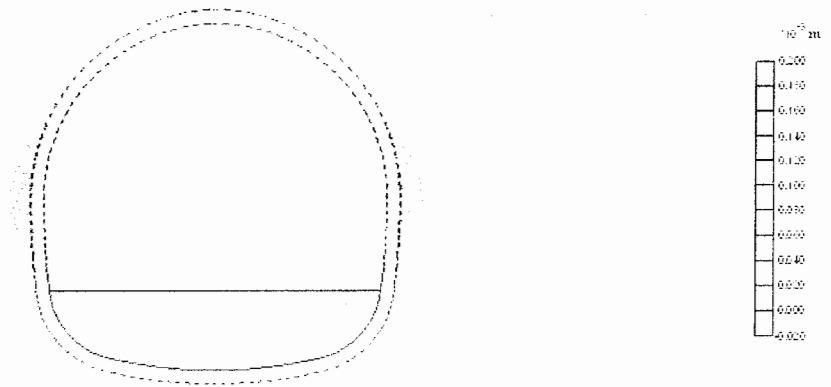
$$\tau_{rel} = \frac{\tau}{\tau_{max}}$$

که در آن τ بیشترین مقدار تنش برشی می‌باشد (بطور مثال شعاع دایره مور) و پارامتر τ_{max} بیشترین

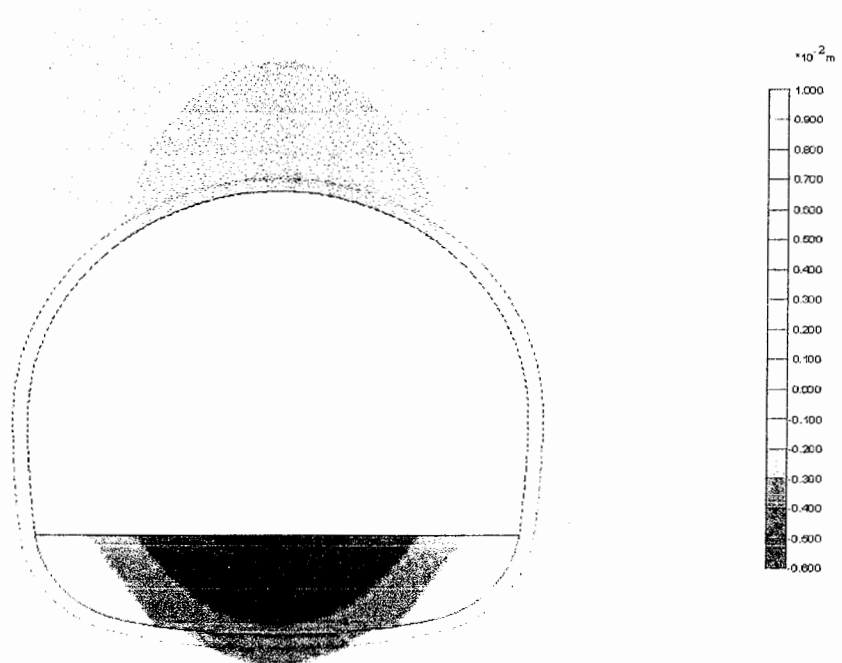
مقدار تنش برشی برای موقعی می‌باشد که دایره مور در شرایطی که تنش متوسط اصلی ثابت نگه داشته

شده است، به مرز شکست کولمب رسیده باشد (Brinkgreve, 1998).

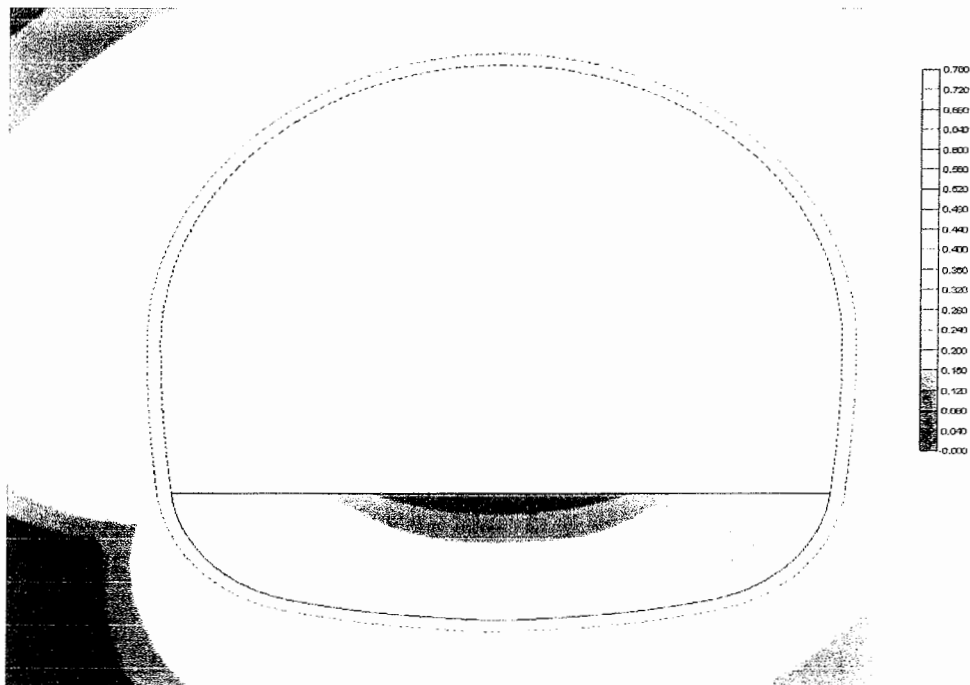
1 - Relative shear stress



شکل ۷-۱۱- تغییر مکان‌های افقی توده سنگ Jssh در حفاری بخش فوقانی قبل از نصب پوشش در پایان فاز ۱



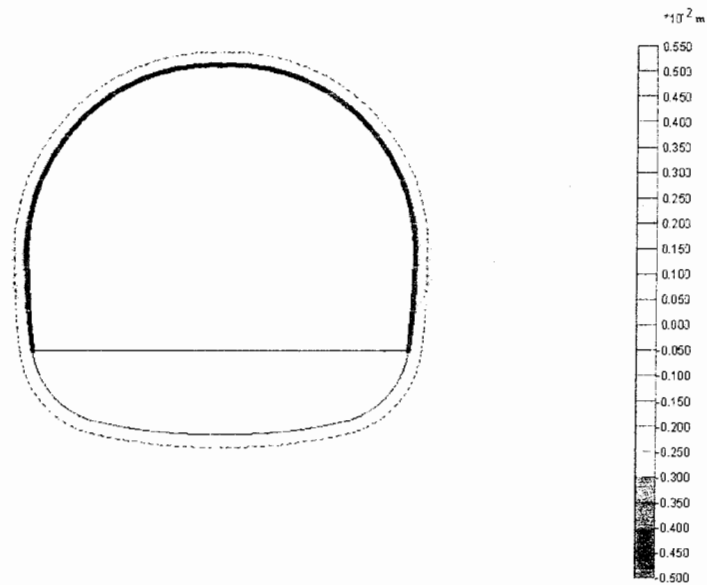
شکل ۷-۱۲- تغییر مکان‌های قائم توده سنگ Jssh در حفاری بخش فوقانی قبل از نصب پوشش در پایان فاز ۱



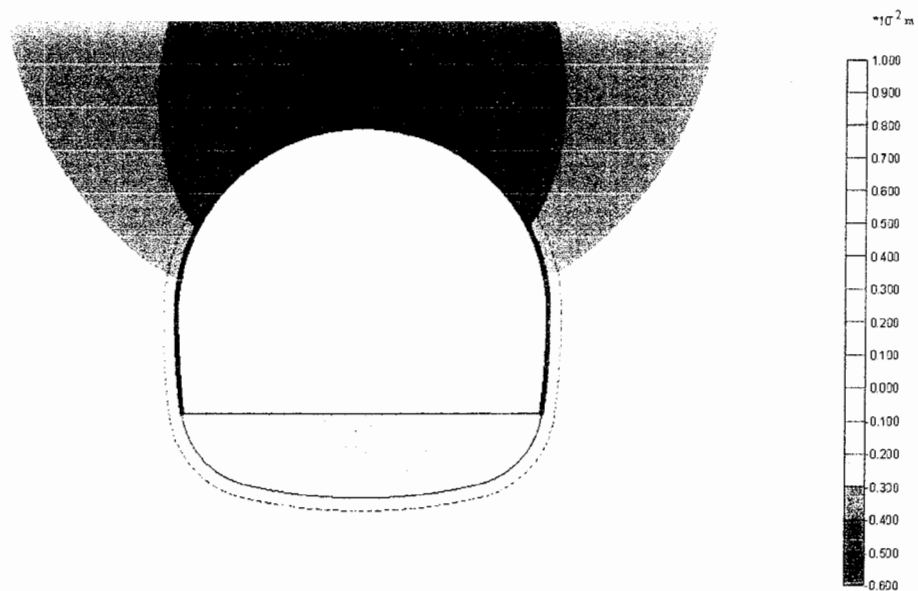
شکل ۷-۱۳- تنش برشی نسبی توده سنگ Jssh در حفاری بخش فوقانی قبل از نصب پوشش در پایان فاز ۱

بیشترین تغییر مکان افقی و قائم ایجاد شده در توده سنگ میزبان، به ترتیب در دیواره جانبی و تاج به میزان $0/21$ و $0/30$ میلیمتر می‌باشد. با توجه به کانتورهای رسم شده حرکت توده سنگ به سمت داخل حفره کاملاً مشهود است. با توجه به (شکل ۷-۶) مشاهده می‌شود که حداکثر نسبت تنش برشی نسبی در محدوده پای دیواره اتفاق افتاده و احتمال پلاستیک شدن این نواحی در مرحله بعد حفاری خواهد بود. همانطور که در بخشهای پیش ذکر گردید، توجه به این نکته ضروری است که ایجاد نقاط پلاستیک لزوماً به معنای گسیختگی مقطع نخواهد بود. در سیستم‌های نرم نظیر استفاده از شاتکریت و مش، از ظرفیت باربری توده سنگ میزبان استفاده شده تا پوشش‌های نگهدارنده اقتصادی‌تر طراحی شوند. در صورتیکه این نواحی پلاستیک نسبت به قطر تونل توسعه یابند، احتمال خرابی مقطع وجود خواهد داشت. سیستم نگهدارنده در توده سنگ میزبان Jssh، شاتکریت بوده که به همراه قاب مشبک فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

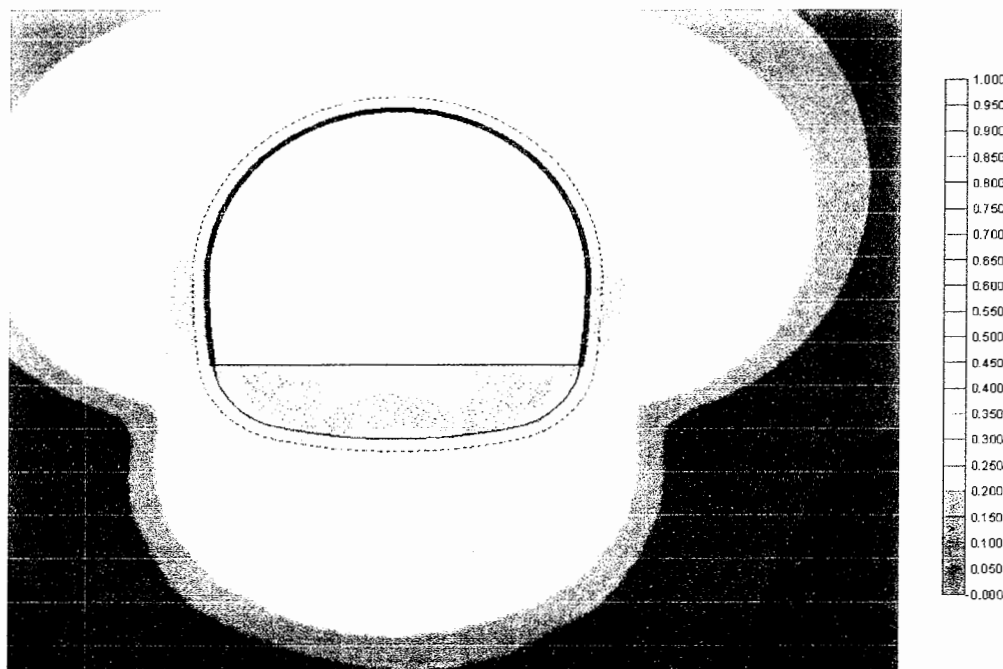
در مرحله دوم از تحلیل (فاز ۲) با فعال سازی المان‌های پوشش در مدل و آزادسازی کامل نیروهای نامتعادل کننده گرهی در مرز حفاری، میدان تنش - تغییر شکل در توده سنگ و نیروهای وارده بر سیستم نگهدارنده در پایان روند ساخت و تکمیل پوشش اولیه در بخش فوقانی بدست می‌آید. نتایج حاصل از تحلیل مدل در پایان فاز ۲ شامل تغییر مکان‌های افقی و قائم توده سنگ، تنش برشی نسبی و نواحی خمیری اطراف محل بازشدگی در شکل‌های (۷-۱۴) الی (۷-۱۷) برای هر دو توده سنگ ارائه شده است.



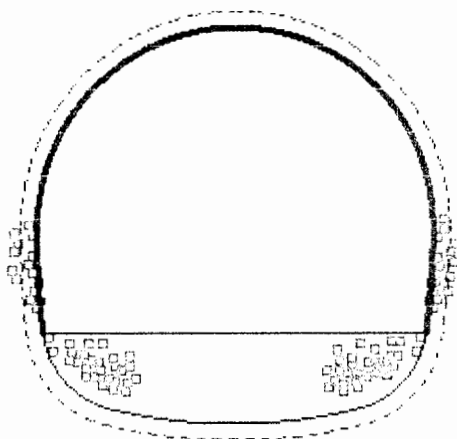
شکل ۷-۱۴- تغییر مکان‌های افقی توده سنگ Jssh پس از نصب پوشش و پیشروی جبهه حفاری در بخش فوقانی در پایان فاز ۲



شکل ۷-۱۵- تغییر مکان‌های قائم توده سنگ Jssh در پایان فاز ۲



شکل ۷-۱۶- تنش برشی نسبی در توده سنگ Jssh در پایان فاز ۲

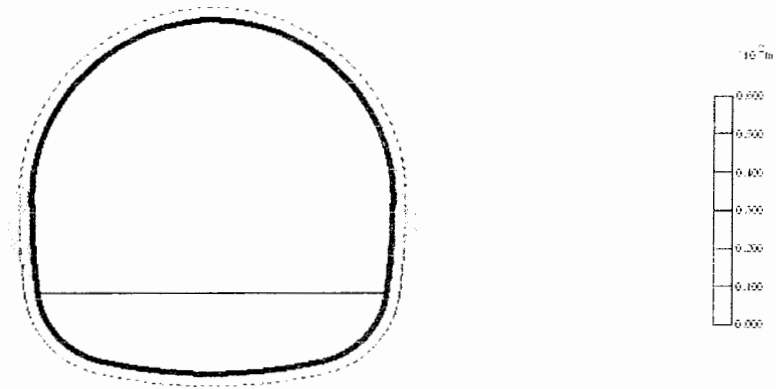


شکل ۷-۱۷- ناحیه خمیری در توده سنگ Jssh در پایان فاز ۲

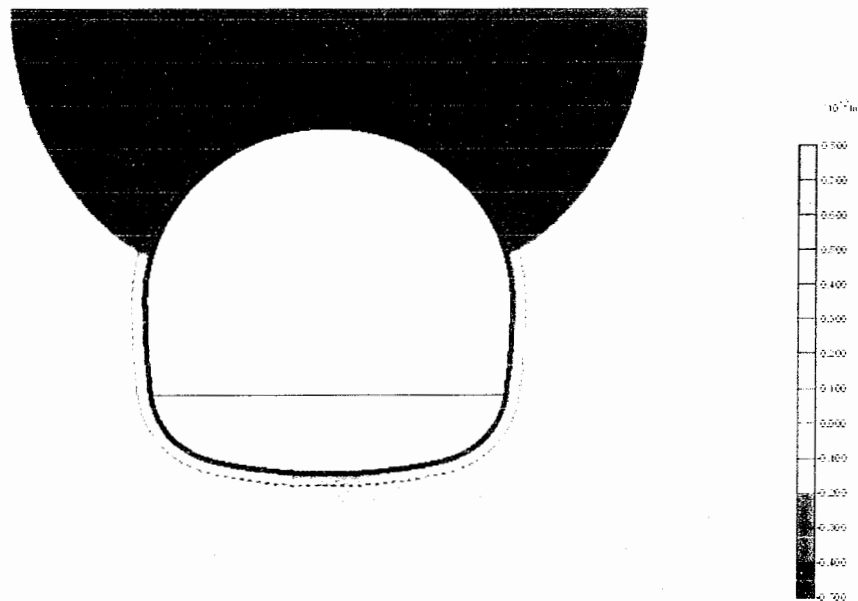
با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های (۷-۱۴) الی (۷-۱۷) برای توده سنگ Jssh در فاز دوم

(نصب پوشش در بخش فوقانی)، بیشینه تغییر مکان افقی و قائم به ترتیب برابر با ۵ و ۱۰ میلیمتر در

دیواره و کف تونل می‌باشد. همانطور که در شکل (۷-۱۷) مشخص است، نواحی با تنش نسبی بالا در فاز اول پلاستیک ایجاد شده‌اند. شکل‌های (۷-۱۸) و (۷-۱۹) تغییر مکان‌های افقی و عمودی در پایان فاز ۳ برای توده سنگ میزبان Jssh را نمایش می‌دهند.



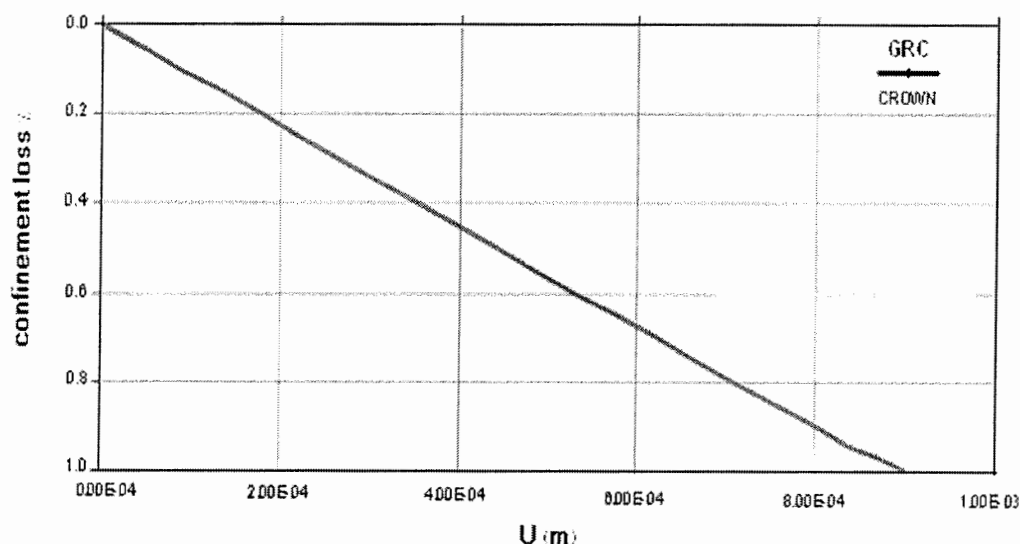
شکل ۷-۱۸- تغییر مکان‌های افقی توده سنگ Jssh در پایان فاز ۳



شکل ۷-۱۹- تغییر مکان‌های قائم توده سنگ Jssh در پایان فاز ۳

با توجه به مطالعات و طراحی‌های انجام گرفته، تونل رفت و برگشت متروی اصفهان بصورت مجزا از یکدیگر در نظر گرفته شده است. بنابراین در انجام تحلیل‌های پایداری می‌بایست حالتی را که پس از عبور تونل پیشرو از مقطع مورد نظر و نصب پوشش‌های اول، تونل دوم به آن مقطع می‌رسد مورد توجه قرار داد. در این شرایط نیز لازم است تا به منظور مدل‌سازی اثرات سه‌بعدی پیشرفت جبهه حفاری، درصد آزادسازی تنش جهت شبیه‌سازی انتقال تنش و آزادسازی تنش ناشی از نزدیک شدن جبهه حفاری تعیین گردد. برای این منظور منحنی اندرکنش زمین GRC در حفاری مقطع تونل ترسیم گردیده است. بدیهی است با توجه به عبور تونل اول از مقطع تنش‌های اولیه، تنش‌های اولیه باز توزیع شده‌اند، در این حالت، ظرفیت باربری توده سنگ تغییر می‌کند. منحنی‌های اندرکنش بیانگر این مطلب می‌باشند.

الف) تاج تونل



شکل ۷-۲۰- منحنی اندرکنش زمین تاج تونل در اثر حفاری تونل دوم در توده سنگ Jssh

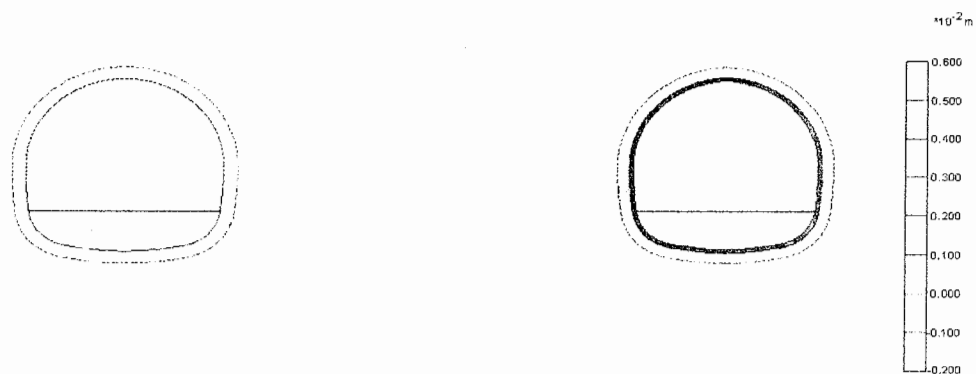
فاز ۴- حذف المانهای داخل مرز حفاری تونل دوم

فاز ۵- فعال سازی المانهای پوشش

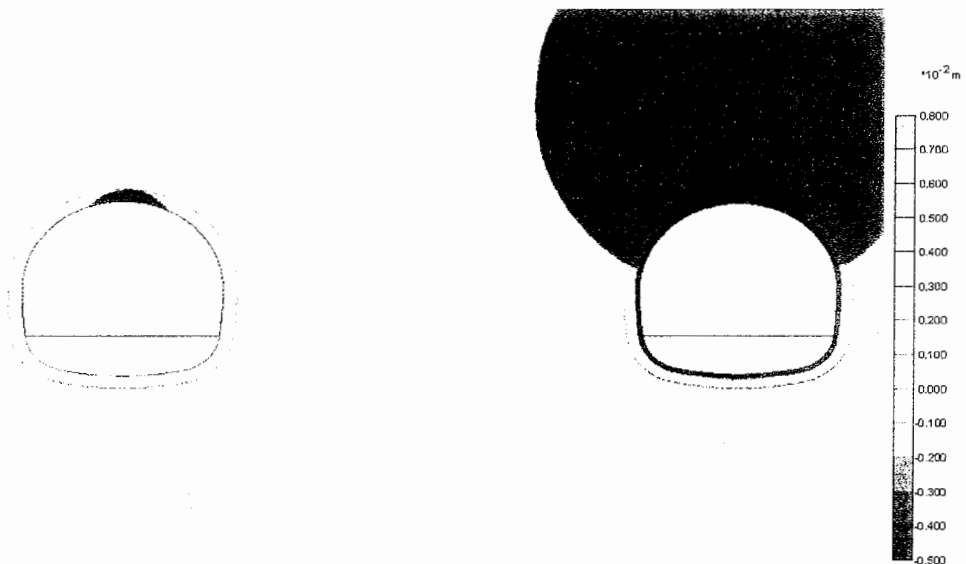
فاز ۶- حفر و پوشش کف تونل دوم

در اشکال (۷-۲۲) الی (۷-۳۰) تغییر مکان‌های افقی و قائم توده سنگ و تنش برشی نسبی در

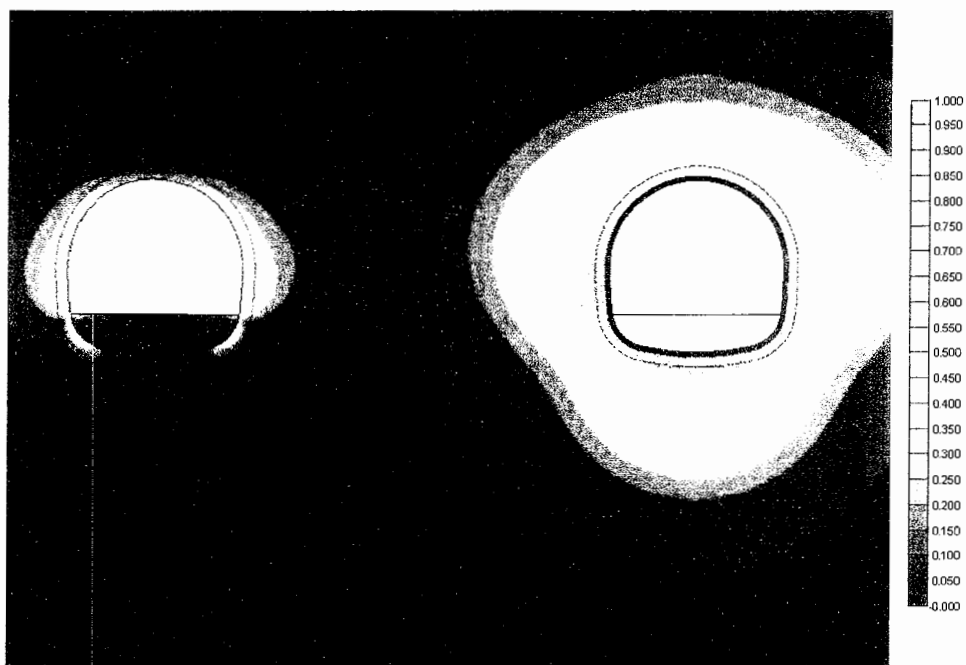
اطراف محل بازشدگی در پایان فازهای چهارم و پنجم و ششم تحلیل ارائه شده است.



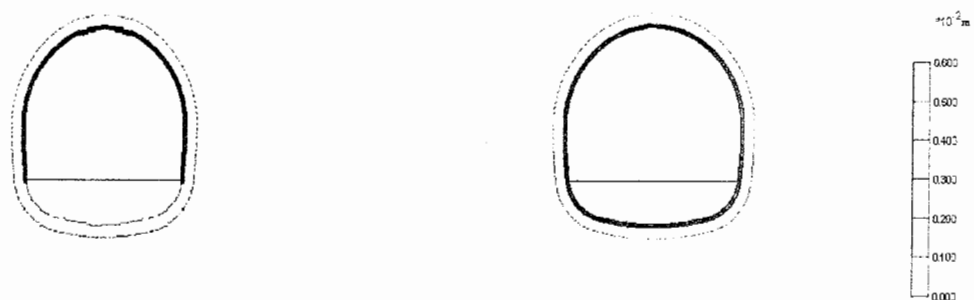
شکل ۷-۲۲- تغییر مکان‌های افقی توده سنگ Jssh در پایان فاز ۴



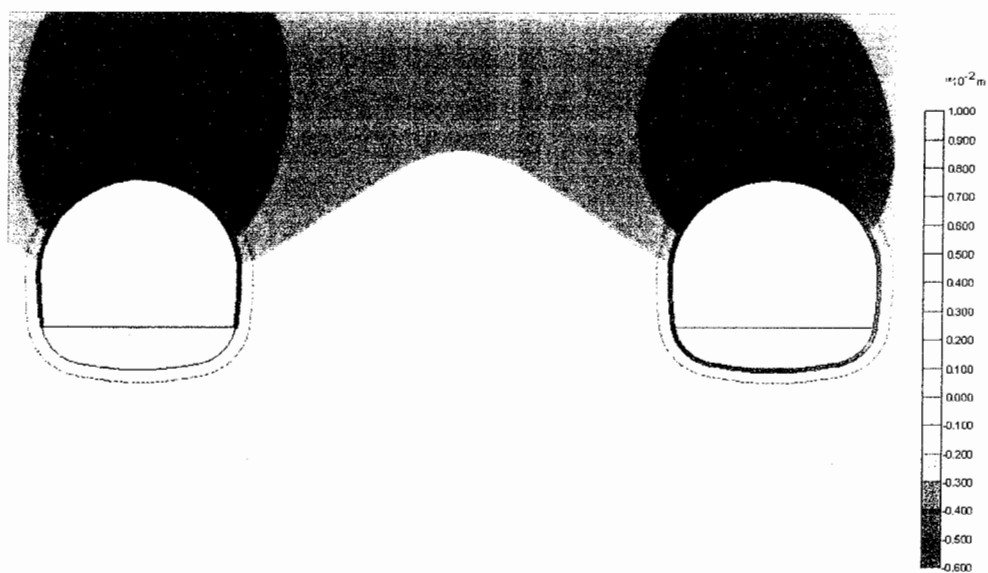
شکل ۷-۲۳- تغییر مکان‌های قائم توده سنگ Jssh در پایان فاز ۴



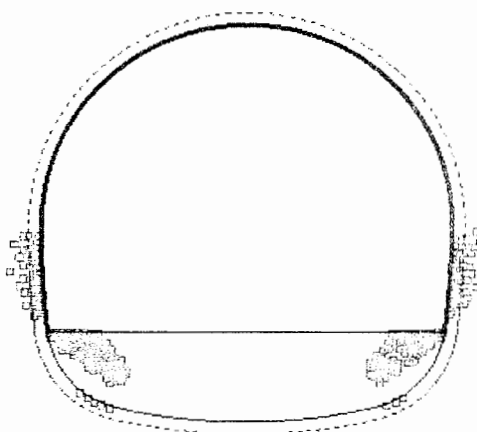
شکل ۷-۲۴- تنش برشی نسبی توده سنگ Jssh در پایان فاز ۴



شکل ۷-۲۵- تغییر مکان افقی توده سنگ Jssh در پایان فاز ۵



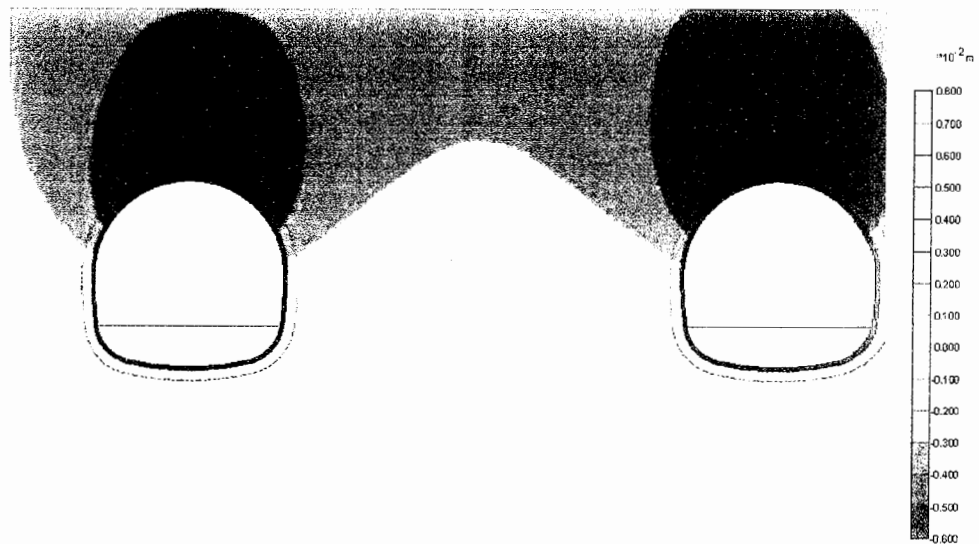
شکل ۷-۲۶- تغییر مکان عمودی توده سنگ Jssh در پایان فاز ۵



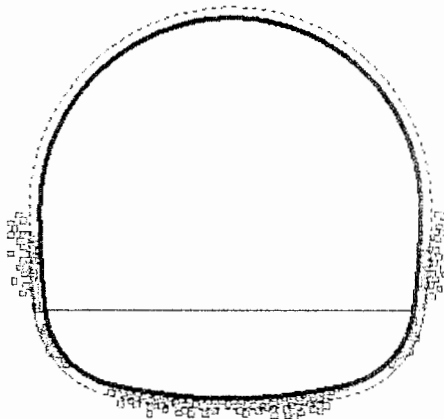
شکل ۷-۲۷- ناحیه خمیری اطراف تونل دوم در توده سنگ Jssh در پایان فاز ۵



شکل ۷-۲۸- تغییر مکان‌های افقی توده سنگ Jssh در پایان فاز ۶



شکل ۷-۲۹- تغییر مکان‌های قائم توده سنگ Jssh در پایان فاز ۶



شکل ۷-۳۰- ناحیه خمیری در توده سنگ Jssh در پایان فاز ۶

۷-۷-۳- طراحی سیستم نگهدارنده اولیه تونل در توده سنگ Jssh

۷-۷-۳-۱- شرایط محیط

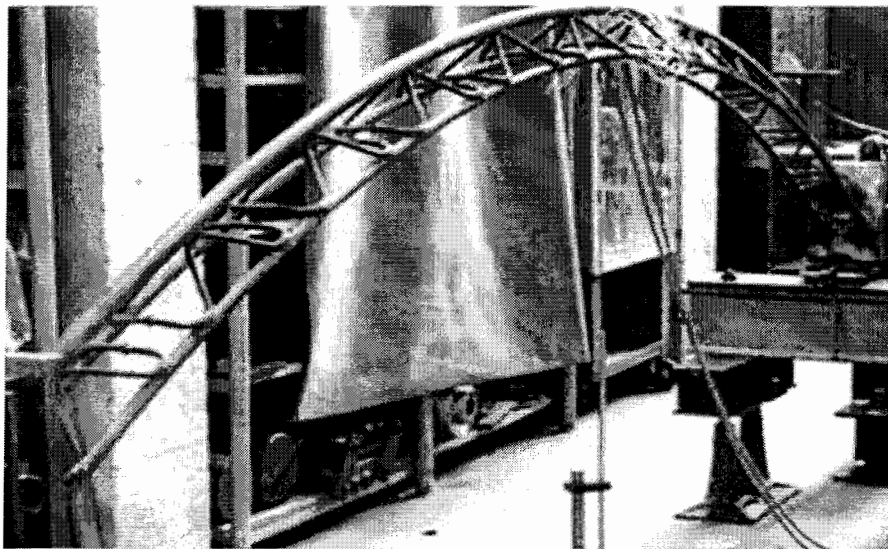
برای تعیین مقادیر بحرانی نیروهای طراحی پوشش اولیه تونل در قطعه جنوبی، حالات مختلف حفر تونل‌ها در نظر گرفته شده است. از جمله تغییر عمق روباره در طول مسیر، تغییر فاصله دو تونل، تقدم و تاخر حفر تونلها و تغییر نوع توده سنگ میزبان بررسی شده است که بحرانی‌ترین حالت، عمق روباره ۱۰ متر، فاصله مرکز به مرکز ۲۰/۵ متر تونلها و نوع توده سنگ Jssh می‌باشد که در طراحی‌ها در نظر گرفته شده است. ترتیب و تقدم و تاخر حالات حفر نیز در مدل کامپیوتری دیده شده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهند به دلیل فاصله زیاد و بیش از دو برابر قطر دو تونل از هم، کاهش فاصله تونل‌ها تغییری در جواب‌ها ایجاد نمی‌کند.

طراحی شاتکریت در دو حالت انجام پذیرفته است. نخست در کوتاه مدت زمانیکه شاتکریت هنوز مقاومت کافی کسب نکرده است بنابراین تنها قابهای مشبک فلزی در برابر نیروهای وارده عمل می‌کنند. در بلند مدت و با افزایش مقاومت شاتکریت با کوچکترین تغییری در بارگذاری، بار وارده بر مجموعه قاب مشبک فلزی و شاتکریت اعمال می‌گردد.

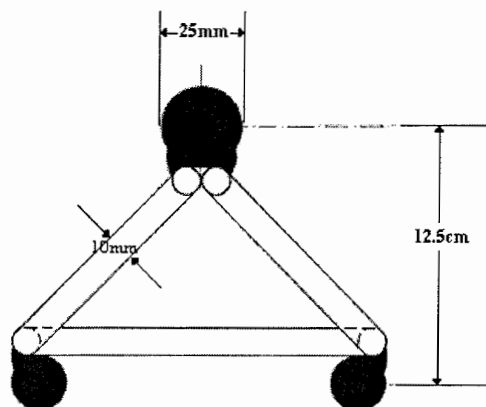
۷-۷-۳-۲- طراحی قاب مشبک فلزی بلافاصله پس از حفاری و نصب قاب کوتاه مدت

با توجه به اینکه در لحظات اولیه حفاری و پس از نصب قابهای مشبک فلزی، هنوز شاتکریت مقاومت چندانی بدست نیاورده باربری اصلی بر عهده قاب مشبک فلزی خواهد بود. در این حالت قابهای مشبک فلزی متشکل از ۳ آرماتور نمره ۲۵ و با ارتفاع ۱۲/۵ سانتیمتر به فواصل ۲ متر جهت تحمل بارهای وارده در نظر گرفته شده و از شاتکریت پاشیده شده بر روی سطح

حفاری در جهت اطمینان صرف‌نظر شده است. در شکل (۳۱-۷) نمونه‌ای از قاب مشبک فلزی و در شکل (۳۲-۷) نمونه‌ای از مقطع قاب مشبک فلزی مورد استفاده در طراحی، آورده شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده برای سازه نگهبان در جدول (۲-۷) و برای سنگ‌های اطراف تونل در جدول (۳-۷) نشان داده شده است.



شکل ۳۱-۷- نمونه‌ای از قاب مشبک فلزی ساخت شرکت Atraquip



شکل ۳۲-۷- نمونه‌ای از مقطع قاب مشبک فلزی

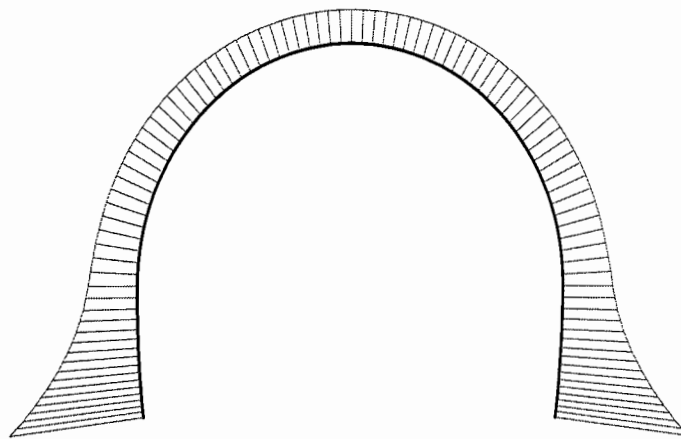
جدول ۲-۷- پارامترهای در نظر گرفته شده برای طراحی سازه نگهبان

مشخصات سیستم‌نگهدارنده	نوع مدل	EA (سختی خمشی)	EI (سختی محوری)
		[kN]	[kNm ²]
قاب مشبک	الاستیک	۱۵۰۰۰۰	۵۲۱

جدول ۳-۷- پارامترهای در نظر گرفته شده برای سنگ‌های اطراف تونل (شرکت الموت، ۱۳۸۲)

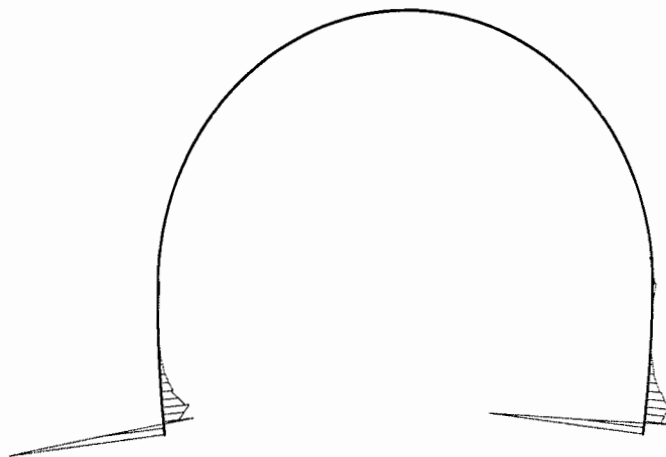
مشخصات لایه‌ها	g-dry	g-wet	ν	E	c	ϕ
	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[-]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[°]
روباره	۱۷	۱۸	.۴	۵۰۰۰۰۰	۶۰	۲۵
JSSH	۲۶	۲۷	۰/۳۲	۲۷۰۰۰۰۰	۱۷۷	۴۱

نتایج حاصل از تحلیل این حالت در شکل‌های ۳۳-۷ تا ۳۵-۷ آورده شده است.



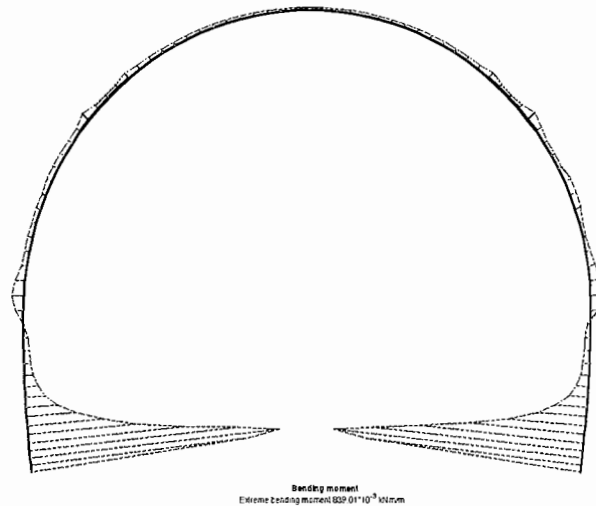
Axial forces
Extreme axial force: 47.61 kN/m

شکل ۳۳-۷- بیشینه نیروی محوری در مقطع تونل وارد بر قاب در توده سنگ Jssh بلافاصله پس از حفاری



Shear forces
Extreme shear force: 13.28 kN/m

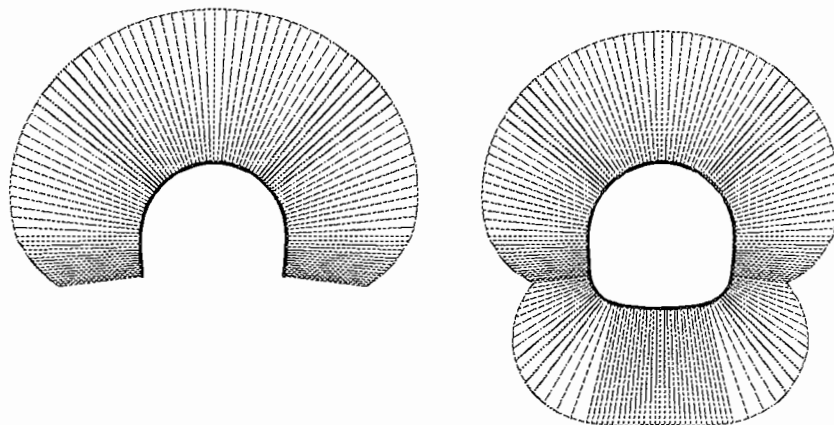
شکل ۳۴-۷- بیشینه نیروی برشی وارد بر قاب در مقطع تونل در توده سنگ Jssh بلافاصله پس از حفاری



شکل ۷-۳۵- بیشینه لنگر خمشی وارد بر قاب در مقطع تونل در توده سنگ Jssh بلافاصله پس از حفاری

۷-۷-۳- طراحی شاتکریت در بلند مدت پس از کسب مقاومت شاتکریت

در این قسمت طراحی پوشش اولیه در بلند مدت زمانی که هم شاتکریت و هم قاب مشبک فلزی عمل می‌کنند، ارائه شده است. همانطور که قبلاً نیز توضیح داده شد، با کوچکترین تغییری در بارگذاری، سیستم یکپارچه شاتکریت و قاب مشبک فلزی بار وارده را تحمل خواهد کرد. به منظور طراحی سیستم نگهدارنده اولیه لازم است تا پوشش اولیه برای بحرانی‌ترین نیروهای حاصل از تحلیل فازهای حفاری طراحی گردد. تحلیل‌ها نشان می‌دهند هنگامیکه تونل دوم پس از تونل پیشرو حفاری می‌گردد، نیروها در تونل پیشرو تغییر چندانی نداشته و مقادیر بحرانی مربوط به فازهای حفاری تونل دوم می‌باشد. بنابراین نیروهای بحرانی فازهای پنجم و ششم مبنای طراحی خواهند بود. در محاسبات طراحی پوشش، کلیه نیروها در جهت اطمینان از تحمل بارهای وارده در ضریب بار ۱/۴ ضرب شده‌اند. نیروها و لنگرهای ایجاد شده در سیستم نگهدارنده اولیه در دو فاز ۵ و ۶ به ترتیب در شکل‌های ۷-۳۶ تا ۷-۴۱ ارائه شده است.



Axial forces
Extreme axial force -220.24 kN/m

شکل ۷-۳۶- نیروی محوری وارد بر سیستم نگهدارنده اولیه در پایان فاز پنجم تحلیل توده سنگ Jssh



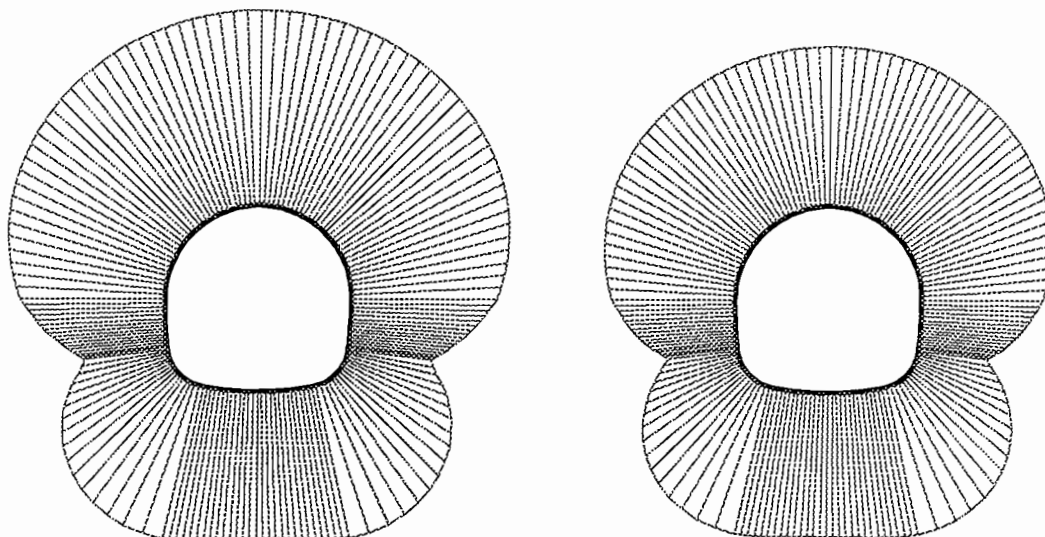
Bending moment
Extreme bending moment 111.42 kNm

شکل ۷-۳۷- لنگر خمشی وارد بر سیستم نگهدارنده اولیه در پایان فاز پنجم تحلیل توده سنگ Jssh



Shear forces
Extreme shear force 44.24 kN/m

شکل ۷-۳۸- نیروی برشی وارد بر سیستم نگهدارنده اولیه در پایان فاز پنجم تحلیل توده سنگ Jssh



Axial forces
Extreme axial force=226.14 kN/m

شکل ۷-۳۹- نیروی محوری سیستم نگهدارنده اولیه در پایان فاز ششم تحلیل توده سنگ Jssh



Bending moments
Extreme bending moment=14.22 kNm/m

شکل ۷-۴۰- لنگر خمشی سیستم نگهدارنده اولیه در پایان فاز ششم تحلیل توده سنگ Jssh



Shear forces
Extreme shear force=14.22 kN/m

شکل ۷-۴۱- نیروی برشی سیستم نگهدارنده اولیه در پایان فاز ششم تحلیل توده سنگ Jssh

با استفاده از نتایج ارائه شده، حداکثر نیروهای حاصل از تحلیلهای پایداری بدست آمده به کمک نرم‌افزار به شرح زیر است.

جدول ۷-۴- بیشینه تلاشهای ایجاد شده در سیستم نگهدارنده اولیه متشکل از شاتکریت و قاب مشبک فلزی

	نیروی محوری	لنگر خمشی	نیروی برشی
مقادیر نیروی برشی و لنگر خمشی با توجه به بیشترین نیروی محوری	$P_{max}=226 \text{ KN}$	$M=0.2 \text{ KN-m}$	$V=0 \text{ KN}$
مقادیر نیروی محوری و نیروی برشی با توجه به بیشترین لنگر خمشی	$P=96 \text{ KN}$	$M_{max}=6.2 \text{ KN-m}$	$V=14.2 \text{ KN}$
مقادیر نیروی محوری و لنگر خمشی با توجه به بیشترین نیروی برشی	$P=120 \text{ KN}$	$M=0.0 \text{ KN-m}$	$V_{max}=44.2 \text{ KN}$

شاتکریت به ضخامت ۲۰ سانتیمتر و با مقاومت ۲۸ روزه ۲۱۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع

به همراه قاب مشبک فلزی به فاصله ۲ متر به عنوان سیستم نگهدارنده اولیه در توده سنگ Jssh در

نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی و خصوصیات مکانیکی قاب مشبک در جدول (۷-۵ الف) و

همچنین خصوصیات مکانیکی شاتکریت در جدول (۷-۵ ب) آمده است.

جدول ۷-۵-الف- خصوصیات مکانیکی قاب مشبک فلزی (سازمان قطار شهری اصفهان و حومه، ۱۳۸۴)

f_y	۳۰۰۰	Kg/cm^2	مقاومت تسلیم فولاد
F_{bar}	۲۵	mm	شماره میلگرد
H	۱۲/۵	cm	ارتفاع قاب مشبک فلزی
N	۳		تعداد میلگردها
d	۲	m	فواصل نصب سیستم نگهداری

جدول ۷-۵-ب- خصوصیات مکانیکی شاتکریت (سازمان قطار شهری اصفهان و حومه، ۱۳۸۴)

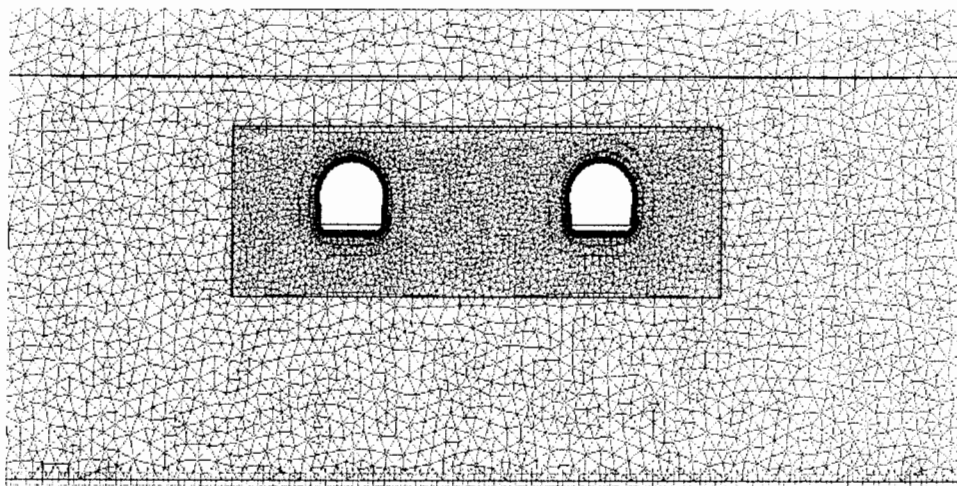
واحد	مقدار	پارامتر
m	۰/۲	t (ضخامت)
Kg/cm ²	۲۱۰	f _c (مقاومت شاتکریت: ۲۸ روزه)
-	۰/۱۵	v (ضریب پواسون)
Kg/cm ²	۲۲۰۰۰۰	E (مدول الاستیسیته)

۷-۸- کنترل نشست

با حفر تونل‌های دوقلو، سطح زمین دچار نشست می‌گردد. شکل (۷-۴۲) تغییر شکل ایجاد شده در سطح زمین را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، مقدار حداکثر نشست در سطح زمین در توده سنگ Jssh حدوداً برابر با ۰/۹ میلی متر می‌باشد. دو کنترل برای نشست انجام شده است که عبارتند از:

۱- نشست کلی

۲- نشست نسبی



Deformed Mesh
 Extreme total displacement: 867.23×10^{-5} m
 (displacements scaled up 1.00×10^3 times)

شکل ۷-۴۲- تغییر شکل قائم ایجاد شده در سطح زمین در توده سنگ Jssh

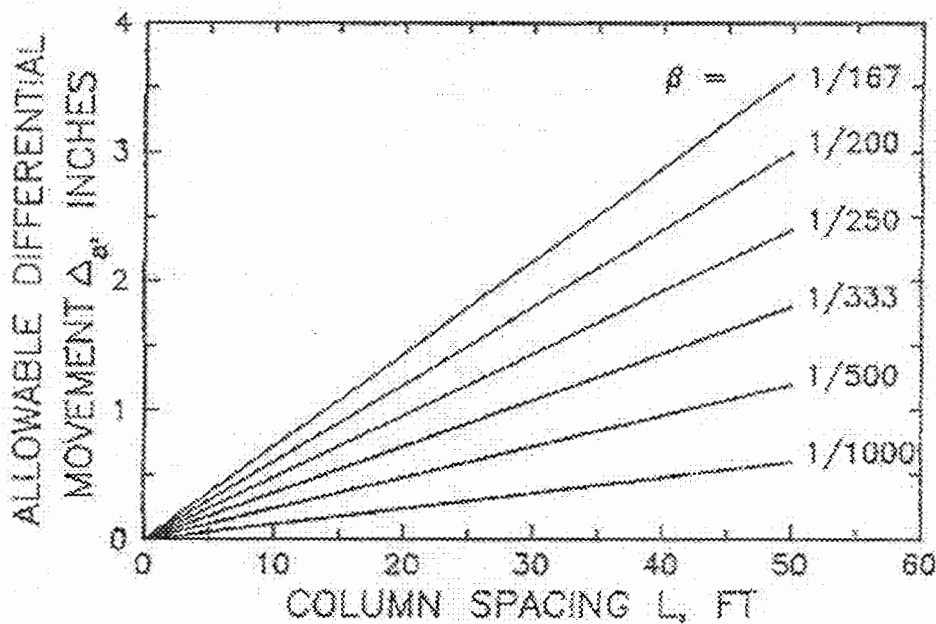
۷-۸-۱- نشست کلی

مطابق آئین نامه‌ها از جمله دستور العمل محاسبه نشست ارائه شده توسط ارتش امریکا، حداکثر نشست کل باید به میزان $25/4$ میلی‌متر محدود شود. بیشینه تغییر مکان ایجاد شده در سطح توده سنگ کمتر از حد مجاز می‌باشد (CECW-Eg 1997).

۷-۸-۲- نشست نسبی

مطابق آئین نامه حداکثر مقدار نشست نسبی برای ساختمانهای بتنی و فولادی باید به مقدار یک پانصدم فاصله بین ستون‌های ساختمان محدود شود. شکل (۷-۴۳) منحنی نشست مجاز را برای فواصل مختلف ستون ساختمان نمایش می‌دهد. در صورتیکه فرض شود فاصله بین ستونهای ساختمانهای مجاور در حدود ۶ متر (۲۰ فوت) باشند نشست مجاز در حدود ۱۲ میلی‌متر $0/5$ اینچ خواهد بود (CECW-Eg, 1997).

با توجه به توزیع تغییر مکان عمودی در سطح زمین در تمامی طول اختلاف تغییر مکان قائم ایجاد شده بین دو نقطه در فاصله ۶ متری به مراتب کمتر از مقدار یاد شده می‌باشد.



شکل ۷-۴۳- میزان نشست نسبی مجاز (CECW-Eg, 1997)

β = نسبت نشست به فاصله بین ستونهای ساختمان و محور عمودی میزان نشست مجاز و محور افقی میزان فاصله بین ستون‌های ساختمان

۷-۹- ارزیابی پایداری تونل با روش کرنش بحرانی

۷-۹-۱- مقدمه

در سال ۱۹۸۶ پروفیسور ساکورای روشی را برای ارزیابی پایداری زمین شناسی با استفاده از کرنش بحرانی به عنوان یک عامل قابل تعیین با استفاده از نتایج آزمایشات آزمایشگاهی تک محوری بر روی نمونه‌های متراکم نشده، پیشنهاد کرد. از این تکنیک غالباً به عنوان یک روش استاندارد کنترل برای همگرایی ایجاد شده جابجایی نسبی در دیواره های تونل در حین عملیات مختلف تونل زنی استفاده می‌شود (بلیغ، ۱۳۷۹).

۷-۹-۲- مفهوم کرنش بحرانی

روابط تنش-کرنش تک محوری با رابطه هیپربولیک زیر تعریف می‌شود (بلیغ، ۱۳۷۹).

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon}{b + a\varepsilon} \quad \text{معادله ۱-۵}$$

که در آن $b = \frac{1}{E}$ ، E ، مدول الاستیسیته، ε_f کرنش شکست سنگ و a مقدار ثابتی است

که عکس آن مجانب افقی تابع هیپربولیک مربوطه می‌باشد. در این حالت مقاومت فشاری تک محوری به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\sigma_c = \frac{R_f}{a} \quad \text{معادله ۲-۵}$$

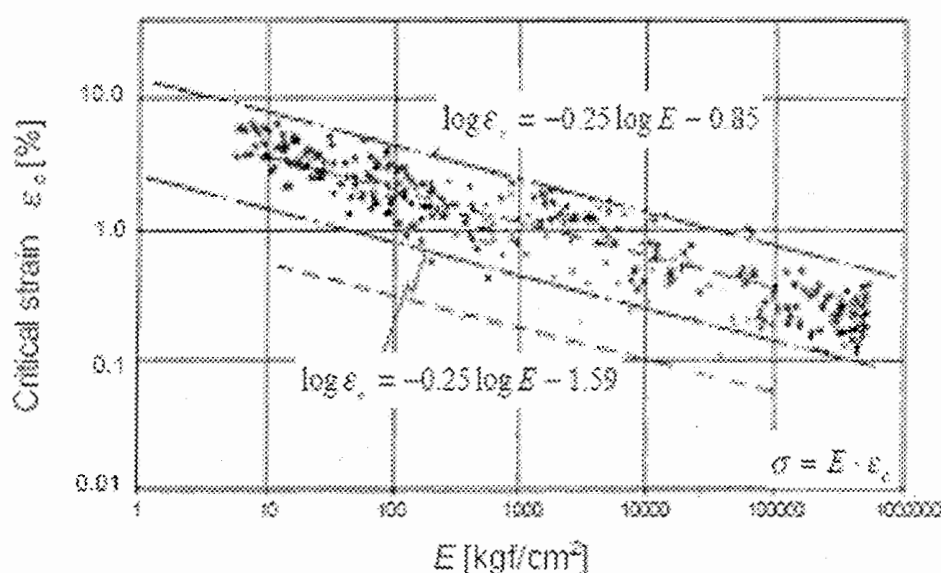
R_f پارامتر نشان دهنده مقاومت شکست می‌باشد. باتوجه به مطالب فوق، پروفیسور ساکورای کرنش بحرانی را بصورت زیر تعریف نموده است:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_c}{E} \quad \text{معادله ۳-۵}$$

که در آن σ_c مقاومت فشاری تک محوری و E مدول الاستیسیته اولیه سنگ است. باید توجه نمود که عموماً کرنش بحرانی با کرنش در نقطه شکست تفاوت دارد. اما برای مواد شکننده که رابطه تنش-کرنش آن تا نقطه شکست تقریباً خطی است، کرنش بحرانی تقریباً برابر همان کرنش در نقطه شکست در نظر گرفته می‌شود.

۷-۹-۳- رابطه بین مدول الاستیسیته و کرنش بحرانی

ساکورای در سال ۱۹۸۸ روابطی بین مدول الاستیسیته و کرنش بحرانی برای مواد زمین شناسی مختلف ارائه کرد. همانطور که در شکل (۷-۴۴) نشان داده شده، معادله (۷-۴) معرف حد بالای مقادیر کرنش بحرانی است، معادله (۷-۶) نشان دهنده حد پایین و معادله (۷-۵) مقدار متوسط لگاریتمی روابط (۷-۴) و (۷-۶) را نشان می‌دهد (Sakurai, 1988).



شکل ۷-۴۴- رابطه بین کرنش بحرانی و مدول الاستیسیته (Sakurai&Adachi, 1988)

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad \text{معادله ۷-۴}$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad \text{معادله ۷-۵}$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad \text{معادله ۷-۶}$$

ε_c : کرنش بحرانی در نمونه‌های تحت فشار در شرایطی که تحکیم نشده باشند.

E : مدول الاستیسیته [kgf cm⁻²]

در کارهای علمی و مهندسی، از کرنش بحرانی نمونه‌های متراکم آزمایشگاهی به عنوان یک معیار در ارزیابی پایداری تونل‌ها استفاده می‌شود. در این صورت فاکتور ایمنی بدست آمده بین ۱ تا ۳

خواهد بود که این امر به علت تراکم بیشتر نمونه‌های آزمایشگاهی و این که نمونه‌های آزمایشگاهی تحت تاثیر عوامل محیطی از قبیل رطوبت، درجه حرارت و ... قرار ندارد (بلیغ، ۱۳۷۹).

۷-۹-۴- کرنش برشی بحرانی

در توده سنگ در بر گیرنده تونل فرض بر این است که تونل در حالت تنش سه محوری می‌باشد و بیشتر منطقی به نظر می‌رسد که از ماکزیمم کرنش برشی برای ارزیابی پایداری مکانیکی استفاده کنیم. در این شرایط، مقدار کرنش برشی بحرانی به عنوان عدد مورد نظر برای کنترل پایداری استفاده می‌شود. ساکورای معادله (۷-۷) را برای محاسبه کرنش برشی بحرانی از کرنش برشی در شرایط فشارشی نامحصور پیشنهاد کرد (Sakurai, 1988).

$$\gamma_c = (1 + \nu)\varepsilon_c \quad \text{معادله ۷-۷}$$

$$\gamma_c = \text{کرنش برشی بحرانی}$$

$$\nu = \text{نسبت پواسن}$$

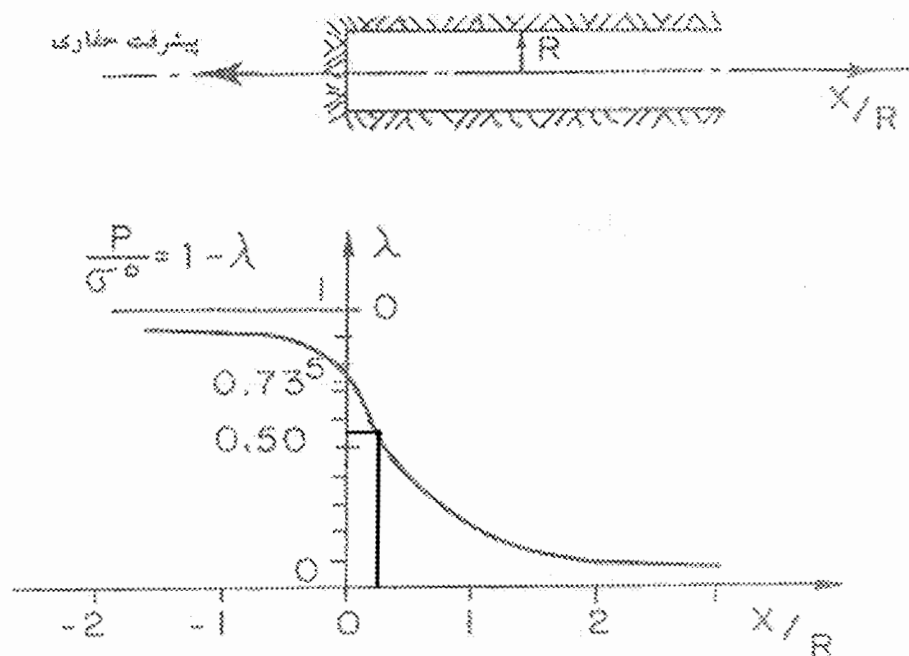
$$\varepsilon_c = \text{کرنش بحرانی در شرایط فشارشی نامحصور}$$

برای ارزیابی پایداری، میانگین رقم لگاریتمی کرنش برشی بحرانی به عنوان مقدار نهایی برای کرنش بحرانی در نظر گرفته می‌شود و توجه بر روی نواحی است که توزیع مقادیرشان بیشتر از مقدار نهایی بدست آمده باشد.

شرایطی که برای یک تونل ساده استفاده می‌شود این است که تغییر شکل مهمی در محیط زمین شناسی نباید وجود داشته باشد. شرایطی که برای ۲ تونل موازی باید برقرار باشد اینست که تغییرات زیادی در کرنش برشی ماکزیمم و توسعه توزیع آن حتی اگر فاصله تونل‌ها از همدیگر

کاهش یافته باشد، رخ ندهد (Sakurai, 1983).

به منظور کنترل پایداری تونل‌های متروی دوقلوی اصفهان از معیار (Sakurai 1988) و مدول الاستیسیته سنگ شیل که در فصل زمین شناسی درج شده است، استفاده گردیده است. مطابق با این اطلاعات، مدول الاستیسیته سنگ شیلی بکر مابین حداقل 2.5 Gpa تا حداکثر 8Gpa برآورد گردیده است که بر این مبنا و با استفاده از معیار Sakurai، مقدار کرنش بحرانی ϵ_c برابر با 0.036% تا 0.048% و کرنش برشی بحرانی γ_c برابر با 0.050% تا 0.067% خواهد بود. جهت در نظر گرفتن اثرات ترخیص تنش ناشی از فاصله ما بین سینه‌کار و محل نصب پوشش اولیه، از منحنی پانه استفاده شده است (شکل ۷-۴۵).

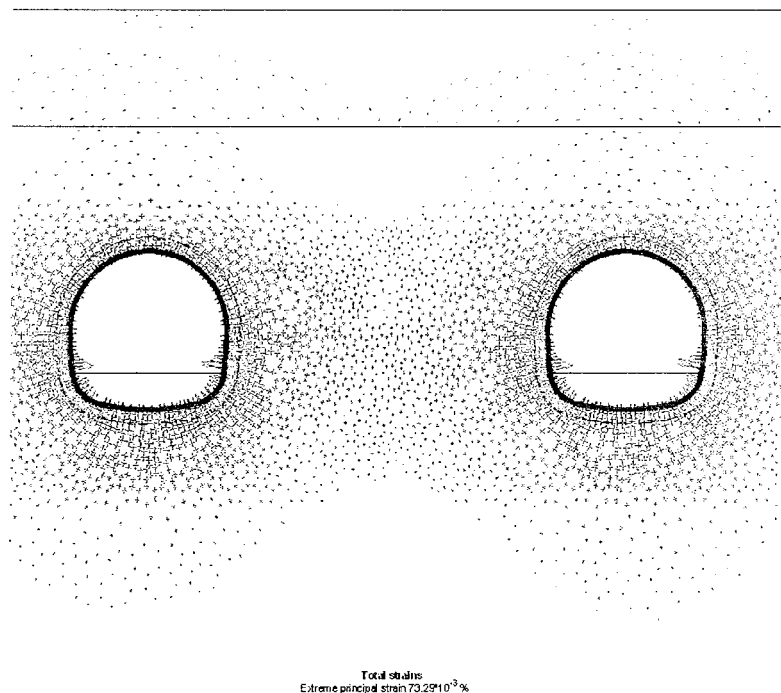


شکل ۷-۴۵- تغییرات نرخ همگرایی بر حسب فاصله از سینه‌کار (بهینا، ۱۳۷۳)

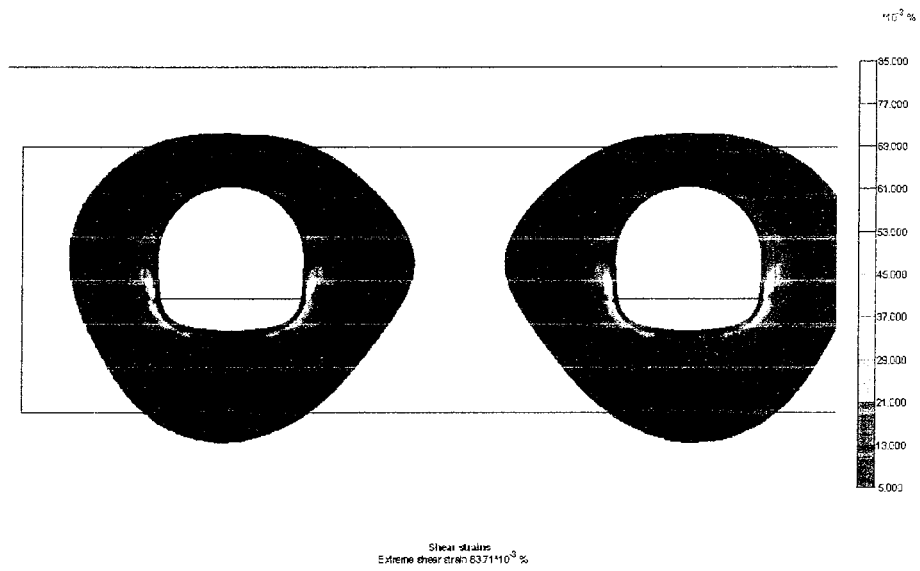
که در آن λ نرخ همگرایی می‌باشد، که نسبت جابجایی ایجاد شده به جابجایی نهایی می‌باشد و σ^0 تنش اولیه و P تنش در دیواره تونل به فاصله X از جبهه‌کار می‌باشد.

$$\frac{X}{R} = \frac{2}{7.1} = 0.28 \Rightarrow \lambda = 0.55 \Rightarrow P = (1 - \lambda)\sigma^0 = (1 - 0.55)\sigma^0 = 0.45\sigma^0$$

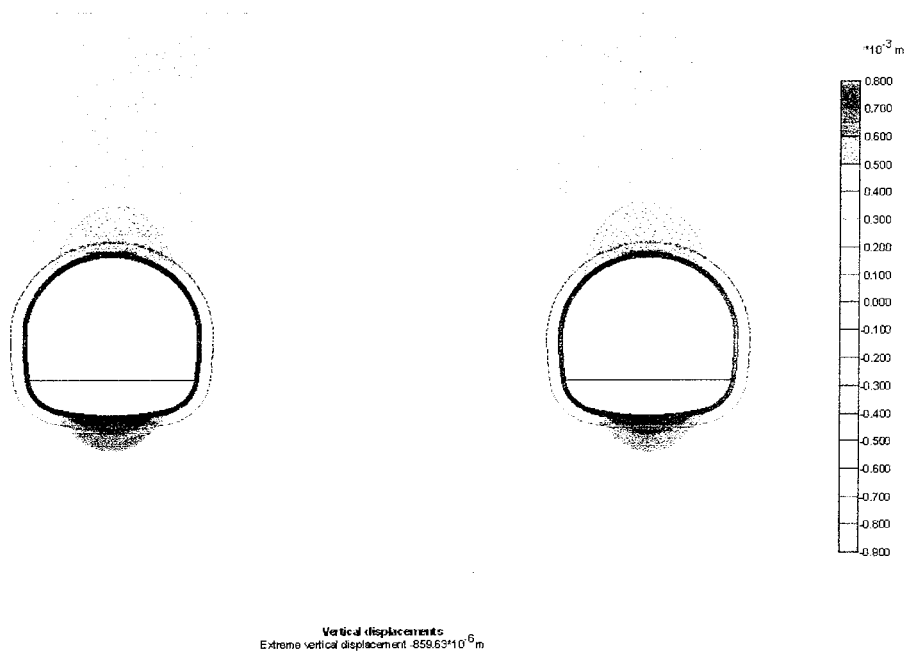
با در نظر گرفتن گام حفاری برابر با ۲ متر، درصد ترخیص تنش برابر با ۵۵٪ تعیین می‌شود. کنترل پایداری مقطع تونل و نیز میزان نشست‌ها و کرنش‌ها با توجه به این میزان ترخیص تنش و استفاده از داده‌های مربوط به توده سنگ شیلی بکر مجدداً انجام گرفته است. بر اساس این تحلیل مجدد، ماکزیمم کرنش برابر با ۰/۰۷۳٪، ماکزیمم کرنش برشی برابر با ۰/۰۸۴٪ و میزان حداکثر نشست سطحی برابر با ۰/۸۶ میلی‌متر است که همگی در حدود قابل قبول می‌باشند و تغییری در طرح ارائه شده بوجود نمی‌آید. در شکل‌های ۷-۴۶ تا ۷-۴۸ مقادیر کنترل شده در بحرانی‌ترین حالت ارائه شده‌اند.



شکل ۷-۴۶- میزان کرنش در پایان مراحل حفاری و نصب پوشش در توده سنگ Jssh



شکل ۷-۴۷- کرنش برشی در پایان مراحل حفاری و نصب پوشش در توده سنگ Jssh



شکل ۷-۴۸- تغییر شکل قائم ایجاد شده در توده سنگ Jssh پس از پایان حفاری و نصب پوشش

۷-۱۰- کنترل نتایج خروجی نرم‌افزار به کمک نتایج ابزار دقیق

به منظور کنترل پایداری تونل‌های متروی دوقلوی اصفهان و بررسی صحت جواب‌های بدست آمده از نرم‌افزار جابجایی‌های بدست آمده از دو ایستگاه واقع در کیلومتر $9+388/48$ تونل غربی و $CE-5$ واقع در کیلومتر $9+263/10$ تونل شرقی که بیشترین جابجایی‌ها در آن رخ داده است، با جابجایی‌های بدست آمده از نرم‌افزار مقایسه شده است.

در ایستگاه همگرایی سنجی $CW-6$, $8/1$ میلیمتر جابجایی در دیواره و $4/5$ میلیمتر جابجایی در سقف و در ایستگاه همگرایی سنجی $CE-5$, $5/5$ میلیمتر جابجایی در دیواره و 4 میلیمتر جابجایی در سقف، اندازه‌گیری شده است. مقادیر بدست آمده توسط نرم‌افزار، جابجایی‌های 6 میلیمتر در سقف و 8 میلیمتر در کف و 6 میلیمتر را در دیواره‌ها نشان می‌دهد که با مقادیر بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها تطابق نسبی دارد.

فصل هشتم

کنترل پایداری بلوک های ایجاد شده

در تونل های قطار شهری اصفهان

(حد فاصل ایستگاه آزادی-صفه)

۸-۱- مقدمه

معمولاً توده سنگ‌های سخت در اعماق کم در اثر تلاقی ناپیوستگی‌هایی مانند صفحات لایه‌بندی، درزه‌ها، زون‌های برشی و گسل‌ها به بلوک‌های مجزا تقسیم بندی می‌شوند. به دلیل زیاد نبودن تنش‌های برجا در اعماق کم، نقش این تنش‌ها در شکستن اجزاء سنگ بکر معمولاً کم است و نقش فرعی را در توده سنگ ایفا می‌کند. لذا این شکستگی‌ها بصورت سر خوردن سنگها روی هم در اثر نیروی وزن و چرخش بلوک‌های منفرد سنگ بروز می‌نماید (قارونی نیک، ۱۳۸۰).

گسترش گسیختگی در سنگ‌های کم عمق در بسیاری از حفاریات سنگی ناشی از جابجایی اولین بلوک می‌باشد که خود در اثر تقاطع ناپیوستگی‌ها بوجود آمده است. از طرف دیگر، حالت‌های لغزش و جابجایی نسبتاً ساده هنگام گسترش گسیختگی بسیار پیچیده به نظر می‌آیند. چرا که در این زمان جابجایی هر بلوک سقف، حرکت بلوک‌های جدید را امکان پذیر ساخته و ضمن گسترش ترک‌های جدید، سبب انحراف بارهای اعمال شده و تغییر مقاومت سنگ می‌شود (دهقان بنادکی، ۱۳۸۰).

بررسی تحلیل پایداری سیستم بلوک‌های منفرد سنگ، مطالعه ضریب‌های کنترل کننده تنش برشی

در ناپیوستگی‌هایی که بلوک‌ها را از هم جدا می‌کند از موضوعات پرداخته شده در این فصل می‌باشد.

اندازه و شکل گوه‌های بالقوه در توده سنگ میزبان به جهت و سوی دسته درزه‌ها بستگی داشته و شرایط ناپایداری نیز به اندازه و جهت مقطع حفاری بستگی خواهد داشت. برای بررسی هندسه سه بعدی گوه‌های سنگی از نرم افزار UNWEDGE استفاده شده است.

۸-۲- وضعیت بلوک‌ها در تونل مترو اصفهان

در تونل مترو اصفهان حد فاصل ایستگاه آزادی- ترمینال صفه، میانگین و جهت شیب دسته درزه‌های

موجود در جدول (۱-۴) در فصل چهارم به صورت خلاصه در جدول (۱-۸) آورده شده است.

جدول ۱-۸- شیب و امتداد شیب دسته درزه‌ها و لایه‌بندی حد فاصل ایستگاه آزادی - شیخ کلینی،
(سازمان قطار شهری اصفهان و حومه، ۱۳۸۴)

فاصله داری متوسط (متر)	امتداد شیب (Dip Dir) درجه	شیب (Dip) درجه	شرح مشخصات
۰/۳۵	۰۹۰	۸۳	دسته درزه ۱ (J ₁)
۰/۱۵	۲۳۶	۷۵	دسته درزه ۲ (J ₂)
۰/۴	۲۸۶	۷۵	دسته درزه ۳ (J ₃)
۰/۱۵	۱۰	۵۷	(B) لایه بندی

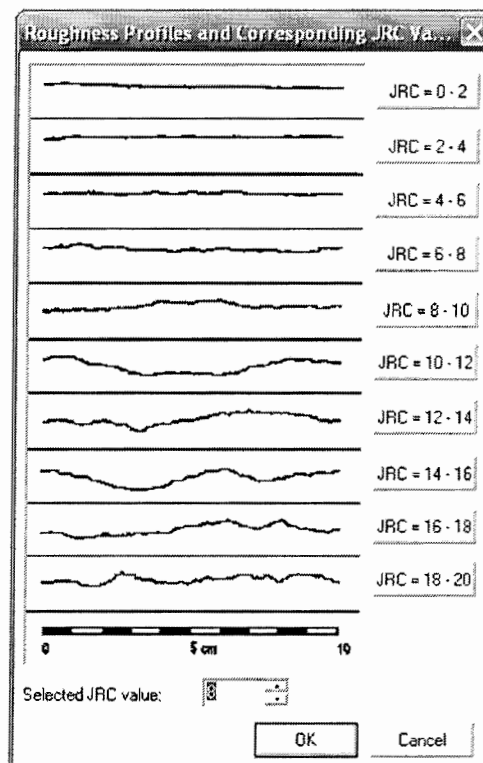
محور تونل در این بخش (قطعه اول) زاویه‌ای برابر با ۶ درجه با شمال تشکیل داده است. به منظور

بررسی کامل تمام شرایط و ترکیبات ممکن دسته درزه‌ها، چهار حالت در نظر گرفته می‌شود. این چهار حالت

از ترکیب دسته درزه‌ها عبارتند از: J₁J₃B, J₁J₂B, J₂J₃B و J₁J₂J₃.

۸-۳- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سطوح درزه‌ها

برای تحلیل پایداری گوه‌ها در دیواره تونل‌ها لازم است که پارامترهای ژئومکانیکی درزه‌ها تعیین گردد. در این تحلیل‌ها چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی درزه‌های سطوح لغزش با استفاده از روش Barton & Bandis در نرم افزار RocData از سری مجموعه نرم افزارهای Rocscience محاسبه شده است. مقادیر در نظر گرفته شده در محاسبه زاویه اصطکاک و چسبندگی آنی عبارت است از: $JRC^1=8-10$ (ضریب زبری سطوح درزه)، در جهت اطمینان (شکل ۸-۲)، $JCS^2=10-12$ MPa (مقاومت فشاری سنگ دیواره درزه) که بطور معمول برابر نصف مقاومت فشاری تک محوری در نظر گرفته می‌شود و در جهت اطمینان (شکل ۸-۳)، $JCS=11$ Mpa، و نهایتاً مقادیر $C=0.3$ MPa، $\Phi=20$ deg و فشار آب نیز برابر ۵ تن بر متر مربع در نظر گرفته شده است. تصویر شکل ۸-۱ مقادیر Sig N (تنش عمودی) و زاویه اصطکاک داخلی پسماند در نظر گرفته شده توسط نرم افزار Rocdata را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۱ - انتخاب JRC مناسب با توجه به پروفیل درزه‌ها

1 - Joint roughness coefficient
2 - Joint wall compressive strength

Selection of Residual Friction Angle for Rocks

List of basic friction angle (phi) values

Rock	Moisture	Sig N range (MPa)	Phib (degrees)
Limestone	wet	0.1 - 8.3	35
Porphyry	dry	0.0 - 1.0	31
Porphyry	dry	4.1 - 13.3	31
Sandstone	dry	0.0 - 0.5	26 - 35
Sandstone	wet	0.0 - 0.5	25 - 33
Sandstone	wet	0.0 - 0.3	29
Sandstone	dry	0.3 - 30.0	31 - 33
Sandstone	dry	0.1 - 7.0	32 - 34
Sandstone	wet	0.1 - 7.3	31 - 34
Shale	wet	0.0 - 0.3	27
Siltstone	wet	0.0 - 0.3	31
Siltstone	dry	0.1 - 7.5	31 - 33
Siltstone	wet	0.1 - 7.2	27 - 31
Slate	dry	0.0 - 1.1	25 - 30

Filter List: Moisture
 Dry
 Wet

Reference: Ripley C.F., Lee K.L. Sliding friction tests on sedimentary rock specimens. Trans. 7th Int. Congr. Large Dams, Rome, 1961, Vol. 4, pp. 657-671 (1962).

Calculate residual friction angle (phi)
 phib value: 27 degrees
 Wet Schmidt rebound, R: 10
 Dry Schmidt rebound, R: 20

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20(R/R)$$

Residual friction angle (phi): 27 degrees

OK Cancel

شکل ۸-۲- مقادیر Sig N (تنش عمودی) و زاویه اصطکاک داخلی پسماند در نظر گرفته شده توسط نرم‌افزار Rocdata

JCS (Uniaxial Compressive Strength) Values

List of joint compressive strength (JCS) values

Material	Description	JCS range (MPa)
rock	Extremely weak rock	0.25 - 1.0
rock	Very weak rock	1.0 - 5.0
rock	Weak rock	5.0 - 25
rock	Medium strong rock	25 - 50
rock	Strong rock	50 - 100
rock	Very strong rock	100 - 250
rock	Extremely strong rock	>250

Field Estimate of Strength:
 Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer.

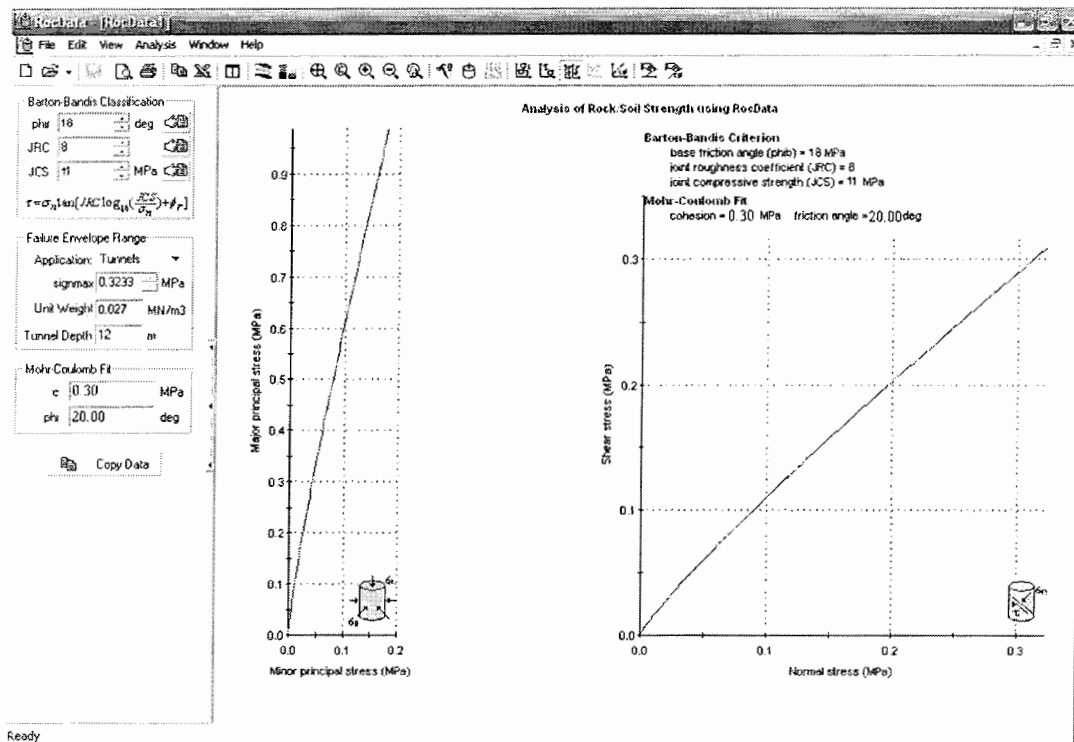
Example:
 Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone.

Filter List: Material
 Rock Soil

Weathered strength reduction
 JCS value: 11.375 MPa

OK Cancel

شکل ۸-۳- انتخاب JRC مناسب با توجه به جنس سنگ و هوازدگی سنگ



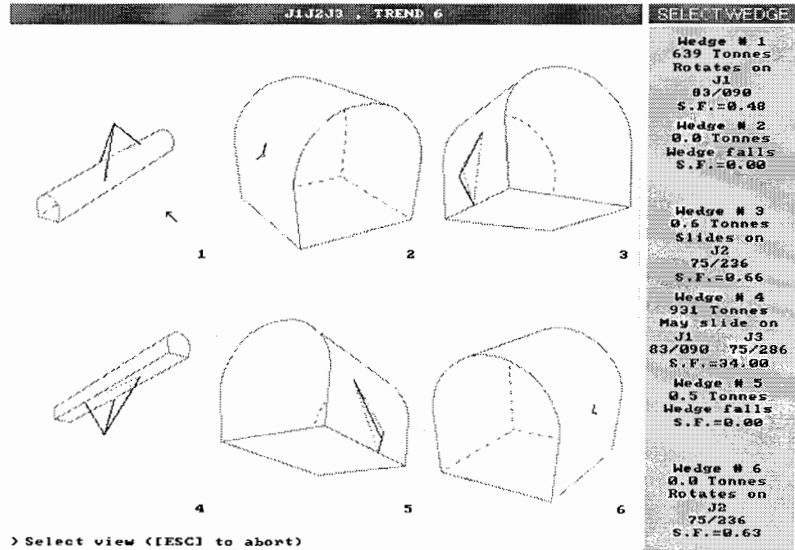
شکل ۸-۴- phi و c محاسبه شده توسط نرم افزار Rocdata

۸-۴- کنترل پایداری بلوک‌های ایجاد شده در دیواره‌های تونل‌های قطار شهری اصفهان

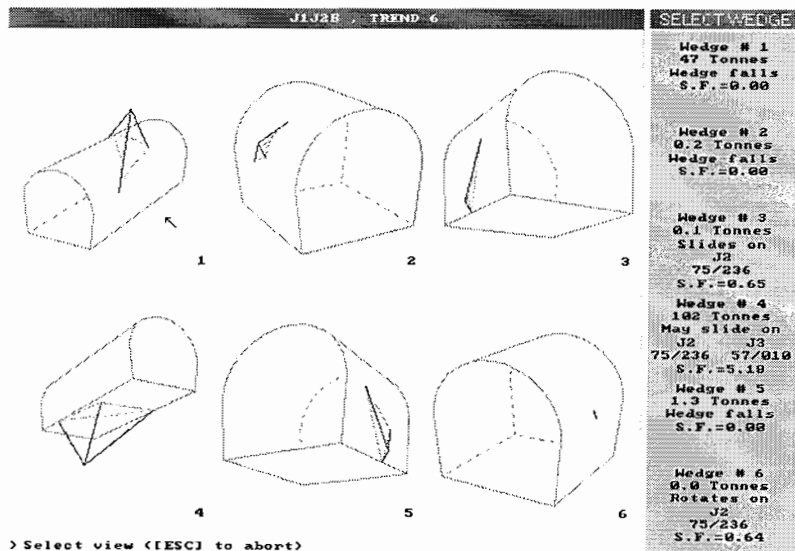
چهار حالت مختلف ممکن در تقاطع دسته درزه‌ها نیز به کمک نرم افزار UNWEDGE مدل شده و نتایج حاصل از تحلیل‌ها در شکل‌های (۸-۵) تا (۸-۹) ارائه شده است. باید توجه شود که این گوه‌ها بزرگترین گوه‌هایی هستند که در شرایط هندسی موجود می‌توانند شکل بگیرند. در روش محاسباتی که برای تعیین گوه‌ها بکار می‌رود فرض بر آن است که ناپیوستگی‌ها در تمامی فضای تونل وجود دارند. به بیان دیگر آنها می‌توانند این آرایش را در هر جایی از توده سنگ تشکیل دهند. در این مورد فرض می‌شود که درزه‌ها، سطوح لایه‌بندی و دیگر مشخصات ساختاری که در تحلیل‌ها گنجانده می‌شوند، همگی صفحه‌ای و ممتد می‌باشند.

نتایج حاصل از این آنالیزها بزرگترین گوه‌هایی که امکان تشکیل آنها در توده سنگ میزبان وجود دارد را نشان می‌دهد که این فرض در اغلب موارد با توجه به مراحل اجرایی ناممکن بوده و نتایج حاصل از آن بسیار

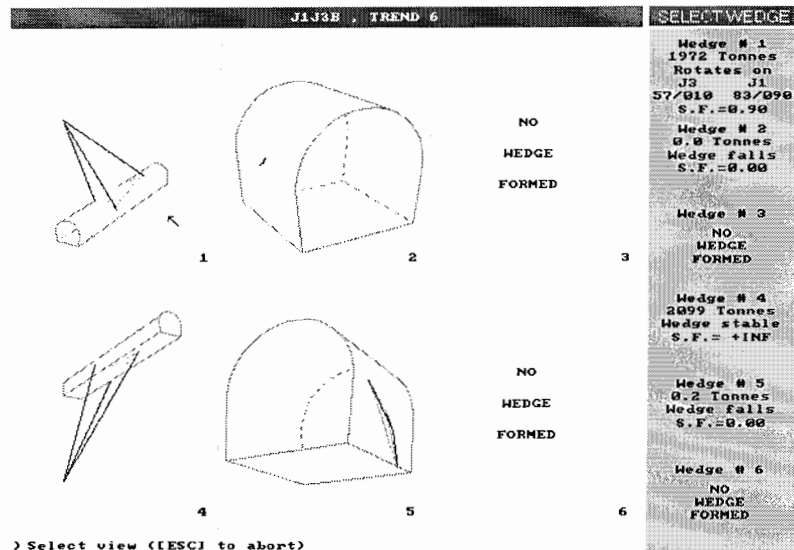
محافظه کارانه و بعضاً غیر واقعی می‌باشد. چرا که اندازه گوه‌هایی که عملاً در توده سنگ می‌تواند شکل گیرد، از طریق تداوم، فاصله‌داری مشخصات ساختاری و گام حفاری محدود می‌شود.



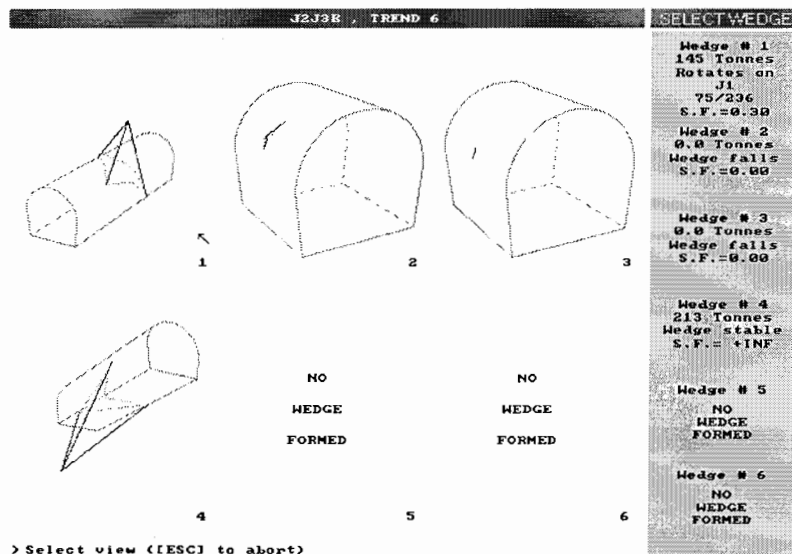
شکل ۸-۵- گسیختگی‌های ساختاری محتمل در با در نظر گرفتن سه دسته درزه J1J2J3



شکل ۸-۶- گسیختگی‌های ساختاری محتمل در تونل با در نظر گرفتن سه دسته درزه J1J2B



شکل ۷-۸- گسیختگی های ساختاری محتمل در تونل با در نظر گرفتن سه دسته درزه J1J3B



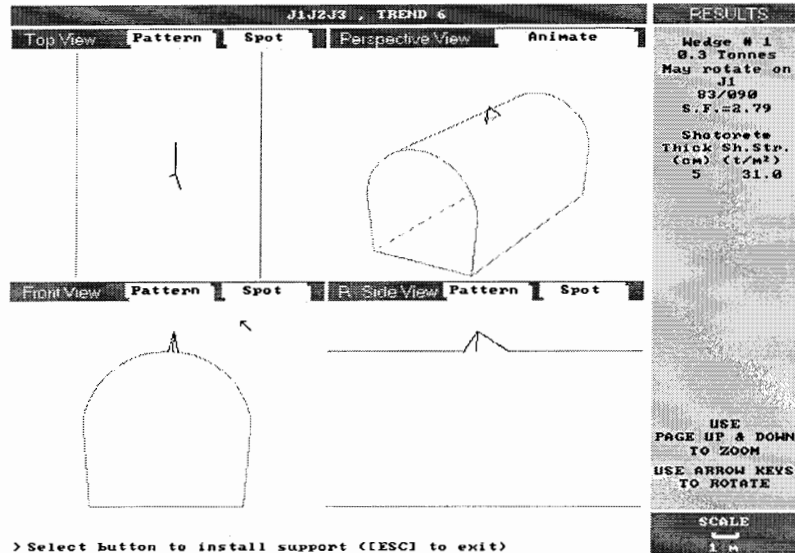
شکل ۸-۸- گسیختگی های ساختاری محتمل در تونل با در نظر گرفتن سه دسته درزه J2J3B

برای نگهداری گوه‌ها در زمین‌های بلوکی با فاصله دارای کم درزه‌ها می‌توان از سیستم نگهداری شاتکریت بهره جست. در این رابطه اگر پوسته شاتکریتی به سرعت و به طور صحیح اجرا شود، اثر بسیار موثری در حفظ پایداری خواهد داشت به طوری که هوک در کتاب مهندسی سنگ کاربردی نیز به این مسأله اشاره می‌کند. کاربرد ایده‌آل شاتکریت در توده سنگ‌های شدیداً درزه‌دار (با فاصله‌داری نزدیک درزه‌ها) همانند توده سنگ‌های میزبان تونل مترو اصفهان می‌باشد. در این گونه موارد گسیختگی گوه بصورت فرآیندی پیشرونده رخ می‌دهد. به طوری که در بدو امر گوه‌های کوچکتری که در سطح حفاری رخنمون دارند تشکیل

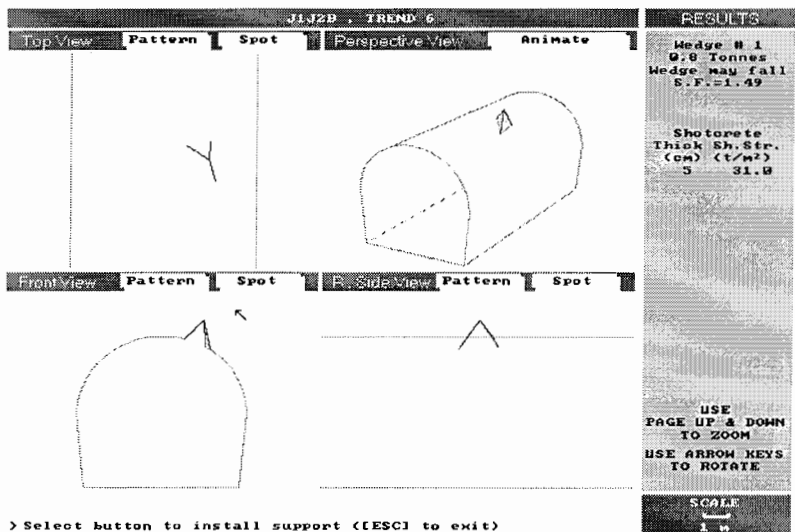
شده و در صورتیکه نگهداری نشوند، شروع به ریزش کرده و سپس به تدریج به سمت داخل توده سنگ رفته و زمینه لازم برای ریزش گوه‌های بزرگتر را فراهم می‌آورد. در اینگونه زمین‌ها، شاتکریت سیستم نگهدارنده بسیار کارآمد می‌باشد (هوک و همکاران، ۱۳۸۰).

شاتکریت در زمانی که به سطح سنگ پاشیده می‌شود علیرغم اینکه از مقاومت کمی برخوردار است قادر به نگهداری گوه‌های کوچک می‌باشد و با گذشت زمان و افزایش مقاومت آن ضریب ایمنی افزایش می‌یابد (هوک و همکاران، ۱۳۸۰). بنابراین لازم است تا با در نظر گرفتن سیکل اجرایی هر مرحله حفاری، عمر و ضخامت شاتکریت مؤثر را مد نظر قرار داده و متناسب با آن مقاومت و ضخامت شاتکریت را در محاسبات منظور کرد.

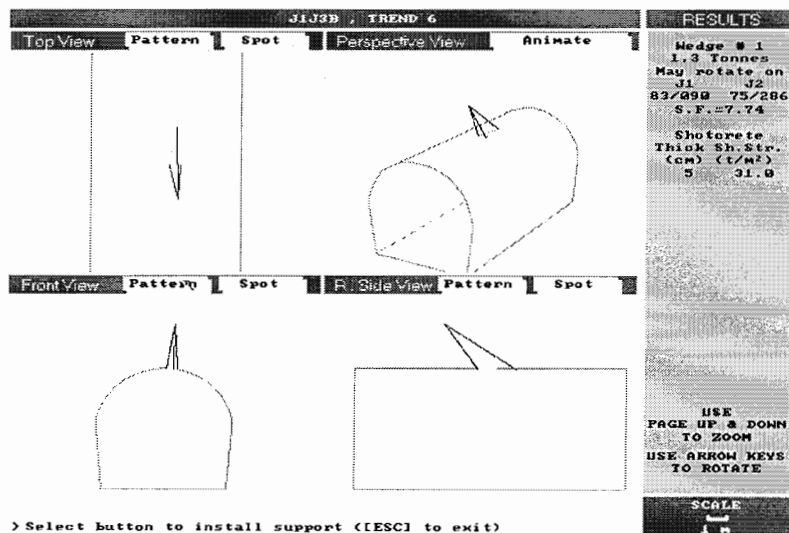
به منظور کنترل دقیقتر گسیختگی‌های ساختاری و تطابق هر چه بیشتر با واقعیت، با توجه به آنکه فاصله داری درزه‌ها بین ۰/۱۵ تا ۰/۵ متر می‌باشد، عملاً امکان تشکیل گوه‌هایی که دارای طول زیاد باشند، وجود نخواهد داشت. بر این اساس و ادامه روند محاسبات، حداکثر طول گوه در راستای حفاری تونل (Z) به دو متر (یک گام حفاری) محدود شده است. با توجه به تغییر در اندازه گوه‌ها و کوچک‌تر شدن آنها ضریب اطمینان در برابر گسیختگی ساختاری مجدداً محاسبه شده است. نتایج این محاسبات در اشکال (۸-۹) تا (۸-۱۲) نمایش داده شده است.



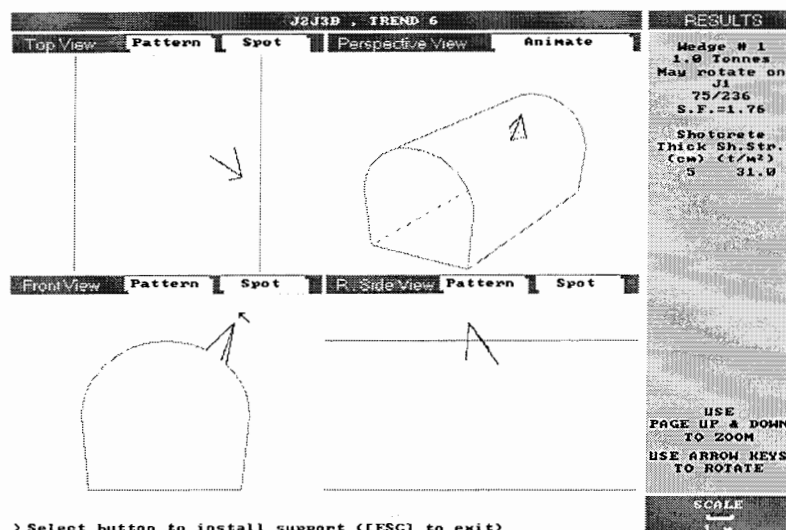
شکل ۸-۹- گسیختگی‌های ساختاری محتمل در تونل با در نظر گرفتن سه دسته درزه J1J2J3 و استفاده از شاکریت بعنوان پوشش



شکل ۸-۱۰- گسیختگی‌های ساختاری محتمل در تونل با در نظر گرفتن سه دسته درزه J1J2B و استفاده از شاکریت بعنوان پوشش



شکل ۸-۱۱- گسیختگی‌های ساختاری محتمل در تونل با در نظر گرفتن سه دسته درزه J1J3B و استفاده از شاکریت بعنوان پوشش

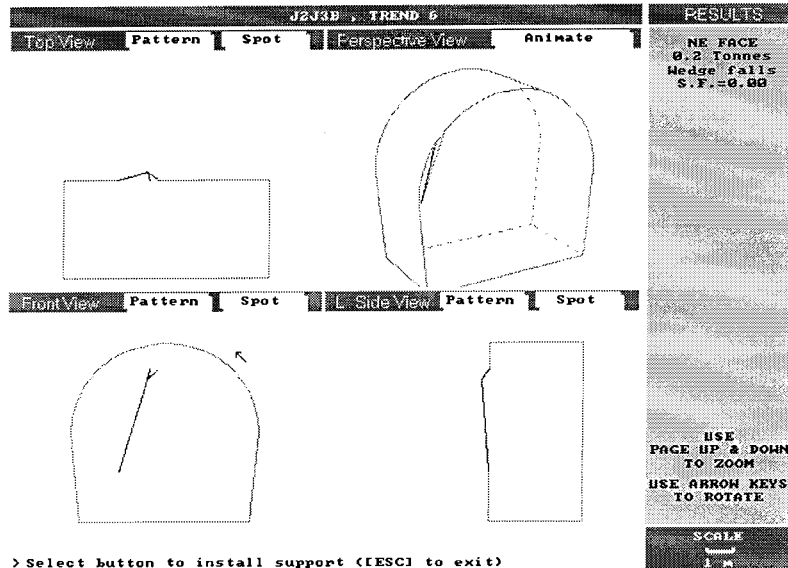


شکل ۸-۱۲- گسیختگی‌های ساختاری محتمل در تونل با در نظر گرفتن سه دسته درزه J2J3B و استفاده از شاکریت بعنوان پوشش

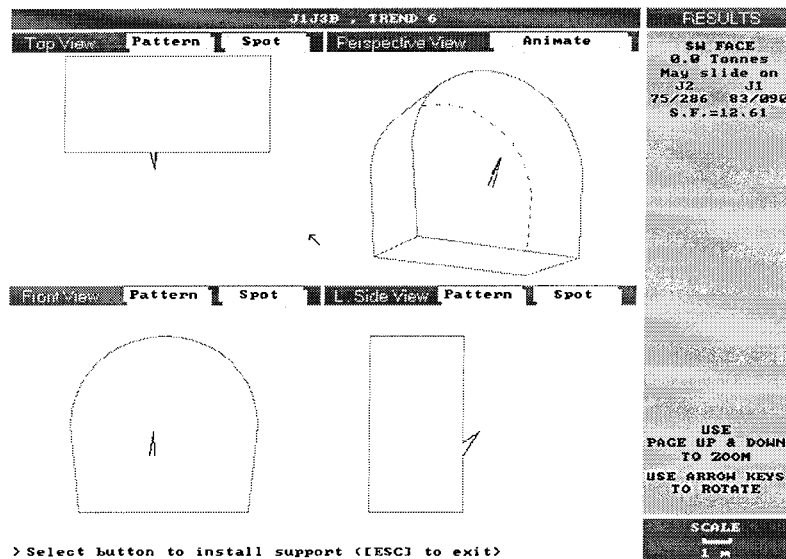
۸-۵- کنترل پایداری بلوک‌های ایجاد شده در سینه‌کار تونل‌های قطار شهری اصفهان

علاوه بر احتمال وقوع گسیختگی ساختاری در سقف و دیواره‌های تونل، ممکن است بلوک‌هایی در سینه کار نیز لغزیده یا جدا شوند. این حالت نیز با توجه به چهار ترکیب محتمل دسته درزه‌ها در نظر گرفته شده است.

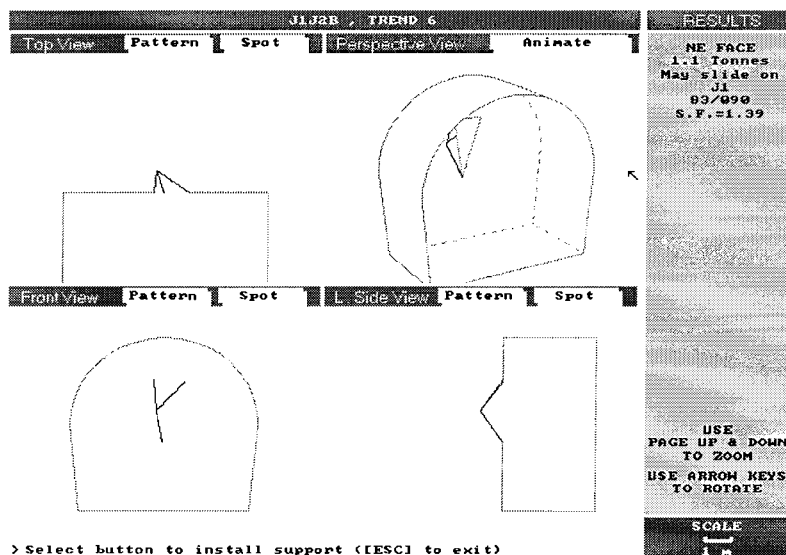
نتایج حاصل از این تحلیل‌ها در شکل‌های (۸-۱۳) تا (۸-۱۶) نشان داده شده است. در این تحلیل‌ها نیز همانطور که پیشتر توضیح داده شده است، با در نظر گرفتن فاصله دسته درزه‌ها و لایه‌بندی، حداکثر ارتفاع گوه به ۱ متر محدود شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که بسیاری از گوه‌های محتمل پایدار بوده و به طور کلی در این شرایط گوه‌ها وزن کمی خواهند داشت. بنابراین در جهت پایداری و جلوگیری از لغزش گوه‌ها می‌توان از روش تونل‌زنی جدید اتریشی که در فصل قبل توضیح داده شد، استفاده کرد.



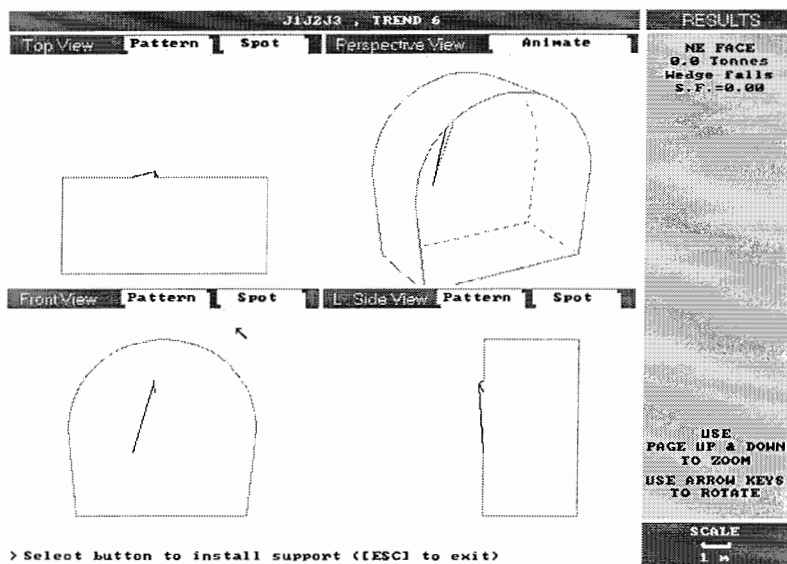
شکل ۸-۱۳- گسیختگی‌های ساختاری محتمل در سینه کار با در نظر گرفتن سه دسته درزه J1J2J3



شکل ۸-۱۴- گسیختگی‌های ساختاری محتمل در سینه کار تونل با در نظر گرفتن سه دسته درزه J1J2B



شکل ۸-۱۵- گسیختگی‌های ساختاری محتمل در سینه کار با در نظر گرفتن سه دسته درزه J1J3B



شکل ۸-۱۶ - گسیختگی‌های ساختاری محتمل در سینه کار تونل با در نظر گرفتن سه دسته درزه J2J3B

فصل نهم

تحلیل برگشتی داده های همگرایی سنجی

تونل های متروی دوقلوی اصفهان

۹-۱- مقدمه

داده‌های پردازش شده رفتارسنجی می‌تواند اطلاعات با ارزشی در ارتباط با وضعیت تنش و محدوده توده سنگ شکسته در اطراف فضای زیرزمینی و پایداری آن بدست بدهد. از آنجا که داده‌های رفتار سنجی ناشی از رفتار واقعی فضای زیرزمینی و توده سنگ پیرامون آن در شرایط اجرایی می‌باشد، بدون تردید با آنالیز برگشتی این داده‌ها می‌توان پارامترهای ژئومکانیکی واقعی توده سنگ را ارزیابی نموده و این واقع بینی مهمترین مزیت روش های آنالیز برگشتی داده های رفتار سنجی می‌باشد.

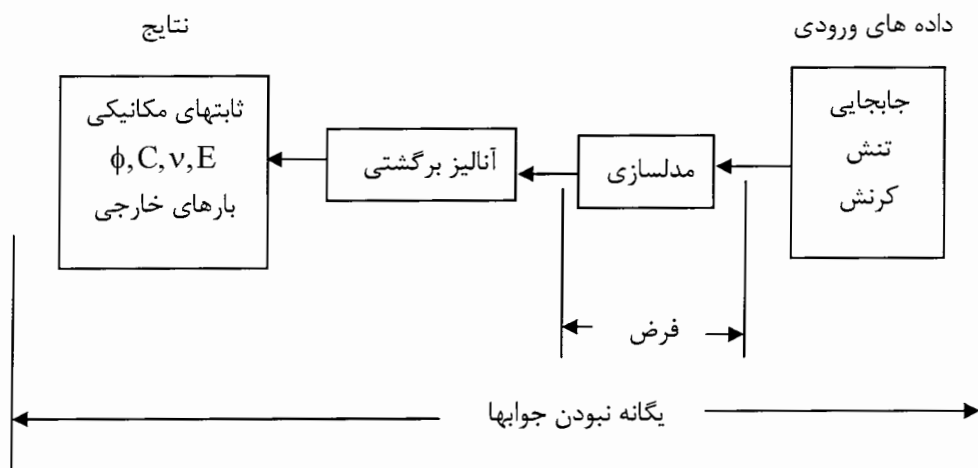
در این فصل ابتدا تفاوت آنالیز برگشتی با آنالیز عادی بیان شده است، سپس آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای ژئومکانیکی انجام شده و حساس‌ترین پارامترها در تحلیل برگشتی تعیین شده و در ادامه آنالیز برگشتی بر روی داده‌های رفتار سنجی صورت گرفته است.

۹-۲- مقایسه روش‌های آنالیز برگشتی با آنالیز عادی

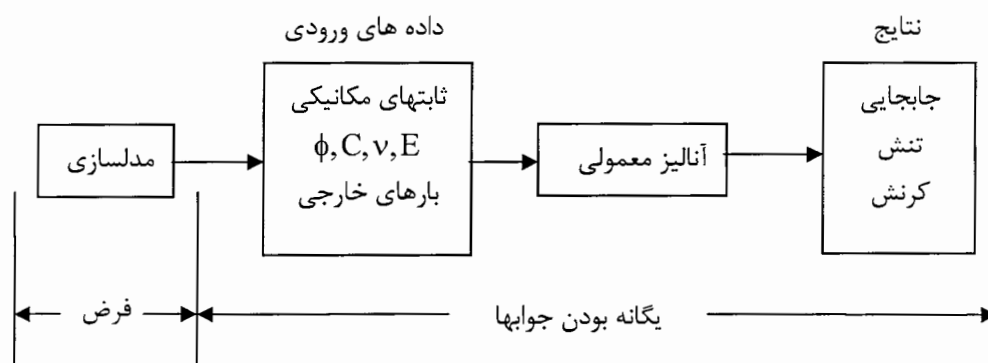
به طور کلی آنالیز پایداری فضاهای زیرزمینی به دو روش آنالیز عادی و آنالیز برگشتی انجام می‌شود. در آنالیز عادی پارامترهایی مثل خصوصیات مکانیکی محیط، هندسه و شرایط مرزی و توزیع تنش در فضای زیرزمینی از طریق آزمایشات مختلف بدست آمده و مکانیسم گسیختگی مشخص می‌شود و با داشتن این اطلاعات مقادیر جابجایی‌ها و تنش‌ها محاسبه می‌شود. در آنالیز برگشتی با اندازه گیری جابجایی‌ها و کرنش‌ها در طول اجرای پروژه، خصوصیات مکانیکی سنگ و وضعیت تنش محیط محاسبه می‌شود. در

آنالیز عادی، مدل رفتاری سنگ (الاستیک، الاستو پلاستیک و...) ساخته شده و ثابت‌های مکانیکی مدل با استفاده از آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. در آنالیز عادی مقادیر جابجایی، تنش و کرنش بوسیله مدل پیش بینی می‌شود. این روش جواب واحدی را برای مدل مشخص می‌کند. ولی در آنالیز برگشتی همانطور که اشاره شد جابجایی، تنش و کرنش اندازه‌گیری شده و با توجه به این داده‌ها مدل مکانیکی ساخته می‌شود و با آنالیز برگشتی، مقادیر ثابت‌های مکانیکی مدل مشخص می‌شود. در آنالیز برگشتی مجموعه جواب واحدی بدست نخواهد آمد و مقادیر بدست آمده در آنالیز برگشتی به داده‌های ورودی و مدل فرض شده بستگی دارند. اگر مدل الاستیک فرض شده باشد، مقادیر خروجی مدول یانگ و نسبت پواسون خواهند بود و اگر این مدل الاستو پلاستیک فرض شده باشد، علاوه بر مدول یانگ و نسبت پواسون، مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ نیز محاسبه خواهد شد. برای بدست آوردن نتایج واقعی در آنالیز برگشتی، باید در انتخاب مدل دقت زیادی شود. تفاوت بین آنالیز عادی با آنالیز معکوس در شکل ۹-۱ نشان داده شده است.

روش آنالیز برگشتی



روش آنالیز عادی



شکل ۹-۱- مقایسه بین آنالیز عادی و آنالیز برگشتی (Sakurai, 1993)

در این شکل مشاهده می‌شود که در آنالیز عادی نتایج واحدی بدست می‌آید و این موضوع حتی وقتی که رفتار واقعی سنگ و مدل یکسان نیستند نیز بوجود می‌آید. اما در آنالیز برگشتی به دلیل اینکه مدل پس از جمع‌آوری اطلاعات ورودی (جابجایی، تنش و کرنش) فرض می‌شود، واحد بودن جواب قطعی نیست (Sakurai, 1993).

۹-۳- روش‌های آنالیز برگشتی

در طراحی یک فضای زیرزمینی بسیاری از مجهولات به وسیله خصوصیات زمین شناسی و ژئومکانیکی سنگ‌ها مشخص می‌شود و این با طراحی یک سازه مثل پل که در آن بارها و خصوصیات مکانیکی مواد کاملاً مشخص است، بسیار متفاوت است. در طراحی فضاهای زیرزمینی پس از در نظر گرفتن یک مدل مکانیکی با توجه به تست‌های برجا و آزمایشگاهی، خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها از قبیل مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تعیین می‌شود. سپس با توجه به این داده‌های ورودی آنالیز طراحی توسط روش اجزاء محدود، المان مجزا، المان مرزی یا روش‌های دیگر انجام می‌شود ولی رفتار واقعی فضاهای زیرزمینی با آنچه که روش‌های عددی نشان می‌دهند کاملاً متفاوت است. بنابراین با

توجه به رفتار واقعی توده سنگ باید خصوصیات مکانیکی سنگ در مدل تصحیح شود. یکی از روش‌های ارزیابی مشخصات مکانیکی واقعی توده سنگ آنالیز برگشتی می‌باشد. همانطور که در مقدمه بیان شد، آنالیز برگشتی روشی است که می‌تواند پارامترهای کنترل کننده یک سیستم را از آنالیز رفتار خروجی آن سیستم تعیین کند. به طور کلی آنالیز برگشتی خود به دو روش مستقیم و معکوس تقسیم‌بندی می‌شود. روش آنالیز برگشتی مستقیم بر اساس بهینه کردن ثابت‌های مکانیکی سنگ با روش سعی و خطا انجام می‌شود که اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده را به حداقل می‌رساند. مزایای استفاده از این روش عبارتند از:

- ۱- این روش را می‌توان بدون نیاز به پشتوانه قوی ریاضی، برای مسائل غیر خطی بکار برد.
 - ۲- از الگوهای استاندارد برنامه‌ریزی ریاضی مانند سیمپلکس می‌توان در این روش استفاده کرد.
- از معایب این روش به صرف وقت زیاد برای تکرارهای متوالی می‌توان اشاره کرد (Sakurai, 1993). در روش معکوس فرمول‌بندی ریاضی دقیقاً عکس تحلیل عادی است و از مقادیر اندازه‌گیری شده برای بهینه‌سازی مقادیر مجهول استفاده می‌شود. باید توجه شود که تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده باید از پارامترهای مجهول بیشتر باشد. وقتی که زمین با یک مدل ساده مکانیکی مدل می‌شود از تئوری الاستیسیته و پلاستیسیته می‌توان استفاده کرد اما برای زمین‌های با هندسه پیچیده تر روش‌های اجزاء محدود قابل قبول‌تر است. از مزایای این روش می‌توان به تکرار کمتر محاسبات و کاهش زمان محاسبات و سرعت در تصمیم‌گیری اشاره کرد. در این روش وقتی که اعداد قرائت شده یا داده‌های ورودی از پراکندگی زیادی برخوردار باشند، جواب قابل قبول بدست نمی‌آید. علاوه بر این برای استفاده از این روش در مسائل غیر خطی مشکلات زیادی وجود دارد و کار بسیار پیچیده است (Sakurai, 1993). در جدول (۹-۱) تعدادی از روش‌های اجرایی مختلف آنالیز برگشتی آورده شده است.

جدول ۹-۱- روش‌های مختلف آنالیز معکوس در مهندسی مکانیک سنگ (صفي خاني، ۱۳۸۱)

شماره	موضوع	توسعه‌دهنده	نوع روش	داده‌های ورودی	داده‌های خروجی	مدل رفتاری سنگ	فرضیات و توضیحات
۱	تعیین مدول الاستیسیته و تنش‌های اولیه با آنالیز معکوس پارامتری‌های اندازه‌گیری شده	Sakurai	Inverse	جابجایی‌های نسبی با مطلق (داده‌های همگرایی سنج و کشیدگی سنج و Inclinometer)	-مدول الاستیسیته -تنش‌های اولیه -گرفتگی -تعیین شعاع ناحیه پلاستیک	الاستیک خطی	-سنگ بصورت الاستیک خطی، همگن و ایزوتروپ -یکپارچگی بودن توزیع تنش در اطراف تونل
۲	بررسی خصوصیات رئولوژی سنگ بر اساس داده‌های همگرایی	Gioda & Cividini	Direct	-همگرایی‌های اندازه‌گیری شده در تعدادی از نقاط تونل -تابش‌های الاستیک (با توجه به آزمایشات تعیین می‌شوند)	-پارامترهای مقاومت برشی (ϕ, c) -ضریب ویسکوزیته (η) و کالبره کردن آنها	مدل شامل یک فنر (V, E) ، یک بلوک اصطکاکی (ϕ, c) و (η) می‌باشد	-حالت تنش صفحه‌ای -حالت تقارن محوری -شرایط تنش هیدرواستاتیک -مقطع تونل دایره‌ای
۳	تعیین تابش‌های الاستیک (مدول حتمی B و مدول برشی G)	Gioda	Inverse	جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در چند نقطه	ضرایب الاستیک یعنی مدول حتمی B و مدول برشی G	الاستیک	رفتار سنگ الاستیک و ایزوتروپ
۴	تعیین مقدار و چگونگی توزیع فشارهای وارد شده به سیستم نگهدارنده	Gioda	Inverse	جابجایی یا چرخش در تعدادی از نقاط -فشارهای اندازه‌گیری شده در تعدادی از نقاط	مقدار فشار زمین و چگونگی توزیع آن روی سیستم نگهدارنده تونل	الاستیک خطی	
۵	تعیین بارهای وارد شده به شاتکریت و بتن به عنوان نگهدارنده‌های موقت و دائمی	Xu, Nie & Q. zhiifa	Inverse	جابجایی‌های نسبی اندازه‌گیری شده در شاتکریت (پوسیده همگرایی سنج)	-محاسبه بارهای وارد آمده به شاتکریت -بررسی رفتار خروجی شاتکریت و بتن	بتن و شاتکریت بصورت الاستیک و ایزوتروپ در نظر گرفته می‌شوند	-خواص مکانیکی سنگها و تنبهای اولیه وارد محاسبات نمی‌شود -جرای سنگهای با خواص مختلف و تونلهای با مقاطع گوناگون قابل استفاده است

جدول ۹-۱: اندازه

شماره	عنوان	نویسنده	نوع روش	داده های ورودی	داده های خروجی	مدل رفتاری سنگ	فرصیات و توضیحات
۶	ارزایی بهینه تشخیصی اولیه با استفاده از جایابیهای اندازه گیری شده	R.W.Lewis & Z.L.Fang	Direct	جایابی های نسبی بین نقاط مجاور داده های همگرایی سنج و کشیدگی (سنج) -تابیهای مکانیکی سنگ -ویژگیهای هندسی نونل	تشخیص های اولیه بهینه	مدلهای رفتاری مختلف (خطی و غیر خطی)	مقایسه کرنش صفحه ای برای سنگ های گوناگون با مدلهای رفتاری مختلف قابل استفاده است
۷	تعیین خواص مکانیکی توده های سنگ درزه دار با آنالیز معکوس	I.Tsuchiyama & Y.Ichikawa	Inverse	داده های همگرایی سنج و کشیدگی سنج -پارهای اندازه گیری شده در چند نقطه -مدل الاستیسیته و نسبت پواسن سنگ بکر	خواص مکانیکی توده های سنگ درزه دار -محاسبه و پیش بینی جایابی مراحل بعدی حفاری	الاستیک خطی و ایزوتروپ	پیشتر برای فضاهای زیرزمینی بزرگ که در چند مرحله و در سنگهای درزه دار حفار می شوند مناسب است.
۸	آنالیز معکوس جایابیهای اندازه گیری شده برای سنگهای ویسکو- الاستیک	W.Sijing & Y.Zhifa	Inverse	جایابیهای اندازه گیری شده با همگرایی سنج و کشیدگی سنج	مدل الاستیسیته -تشخیص اولیه آفتی و قائم -خریب ویسکوژن سنگ	مرحله اول الاستیک مرحله بعد ۲ جسم رولوبونگ، ماکسول، کلبون و پوتینگ- تامسون	مقایسه کرنش صفحه ای است آنالیز شامل دو مرحله است: ۱-آنالیز معکوس الاستیک ۲-آنالیز معکوس ویسکو-الاستیک
۹	تعیین تشخیصی اولیه با آنالیز معکوس تغییرات اندازه گیری شده	P.X.Kaiser & D.Zou	Direct	تغییرات اندازه گیری شده تشخیص در حین حفاری با کرنش سنج	تشخیص اولیه برجا و جهت آنها		تغییرات اندازه گیری شده را با تغییرات پیش بینی شده با مدلهای مختلف مقایسه نموده و با یک روش سعی و خطا تشخیصی اولیه و جهت آنها را تعیین می کند.
۱۰	تعیین پارامترهای الاستو-پلاستیک	Y.Ichikawa & T.Kawamoto	Inverse	جایابیها با پارهای اندازه گیری شده در موز مسئله	پارامترهای الاستیک سنگ -پارامترهای پلاستیک سنگ و اتساع -تعیین مدل رفتاری غیر خطی سنگ	مرحله اول الاستیک مرحله دوم پلاستیک	آنالیز دارای دو مرحله است: ۱-آنالیز معکوس الاستیک برای تعیین ثابت های الاستیک ۲-استفاده از داده های مرحله ۱ آنالیز معکوس پلاستیک برای تعیین پارامترهای پلاستیک و اتساع

ادامه جدول ۹-۱

شماره	عنوان	نویسنده	نوع روش	داده های ورودی	داده های خروجی	مدال رفتاری سنگ	فرصیات و توضیحات
۱۱	تعیین سختی و وضعیت تنش توده سنگهای جلوی سینه کار با داده های بدست آمده از سیستم نقشه برداری	A. Steindorfer & W. Schübert	Direct	چاپخانه های اندازه گیری شده با سیستم نقشه برداری	زاویه بین چاپخانه های رفتاری مختلف قابل استفاده است	برای تونل‌های با روبراه زیاد و حفز شده در سنگهای ضعیف و شدیداً ناهمگون و زمینهای squeezing و مناطق گسله بسیار مفید است	
۱۲	تعیین مقاومت توده های سنگ و شعاع ناحیه پلاستیک با استفاده از داده های همگرایی سنج	C. Tassineto & T. Fujiwara	تجربی	داده های همگرایی سنجی و رسم آن بر حسب فاصله از سینه کار مقاومت فشاری تک محوری سنگ زاویه اصطکاک داخلی سنگ	شعاع ناحیه پلاستیک مقاومت تهابی توده سنگ در نقطه شکست بار وارد آمده روی سیستم نگهدارنده	الاستو-پلاستیک	رفتار زمین بصورت الاستو-پلاستیک -شریط تنش هیپرو استاتیک -مقطع حفاری دایره ای
۱۳	آنالیز معکوس الاستیک برای تعیین مدل الاستیسیته و بارهای ناشی از حفاری	M. Hiratake	Inverse	چاپخانه های اندازه گیری شده با کسیدگی سنج در چند نقطه از سیستم نگهدارنده تونل	مدول الاستیسیته بارهای ناشی از حفاری	الاستیک	
۱۴	روش مقاومت انفجاری برای تعیین مدل الاستیسیته واقعی سنگ و تنش های اولیه	دکتر کاظم نجم	Inverse	چاپخانه های اندازه گیری شده نگهدارنده تونل با همگرایی سنج -گرایش اندازه گیری شده روی نگهدارنده تونل	مدول الاستیسیته واقعی سنگ -کشیدگی اولیه -گرایش و دگرشکلگی نگهدارنده تونل	الاستیک	توده سنگ همگن و ایزوتروپ بوده و در حالت انفجاری رفتار الاستیک از خود نشان می دهند. همچنین تابشهای الاستیک نگهدارنده تونل معلوم فرض می شود

۹-۴- تحلیل برگشتی داده‌های همگرایی سنجی تونل‌های متروی دوقلوی اصفهان

در این تحقیق برای انجام تحلیل برگشتی از نرم افزار Flac5 استفاده شده است که تنها امکان تحلیل مستقیم (سعی و خطا) را فراهم می‌کند. در تحلیل برگشتی اندر کنش کامل بین خاک و سازه در نظر گرفته شده است. مراحل مورد استفاده در این تحلیل عبارتند از:

۱- انتخاب ایستگاه‌های همگرایی سنجی در قسمت‌هایی که از صحت نتایج آنها اطمینان وجود دارد و کمترین خطا در اندازه‌گیری توسط دستگاه دیده می‌شود.

۲- تهیه مدل عددی مناسب با شرایط تونل در ایستگاه مورد نظر، به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ فراگیر از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در فصل چهارم استفاده شده است.

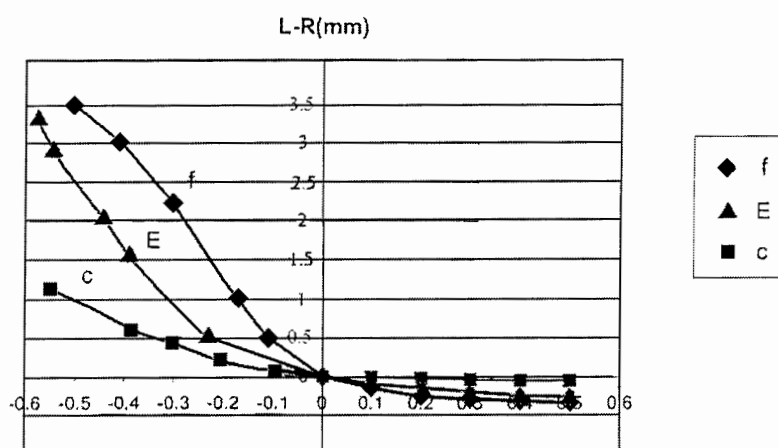
۳- تحلیل مدل عددی و مقایسه نتایج آن با اطلاعات ابزار دقیق.

روش انجام آنالیز برگشتی بدین صورت است که ابتدا پارامترهایی از قبیل ضخامت روباره، نوع و جنس سنگ با توجه به مشخصات ایستگاه به نرم‌افزار داده شده و در مورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ نیز از تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. جابجایی‌های اندازه‌گیری شده با جابجایی‌های بدست آمده از مدل عددی با یکدیگر تفاوت دارند و این تفاوت به این دلیل می‌باشد که، بخشی از جابجایی‌ها بلافاصله پس از حفر تونل و قبل از نصب ابزار دقیق رخ می‌دهد که قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد.

در این تحقیق ابتدا آنالیز حساسیت صورت گرفته سپس با توجه به آنکه در آنالیز برگشتی جواب واحد نمی‌باشد در مجموعه جواب بدست آمده مقادیری را انتخاب می‌کنیم که برابر جابجایی‌های اندازه‌گیری شده توسط کشیدگی سنج‌ها باشد.

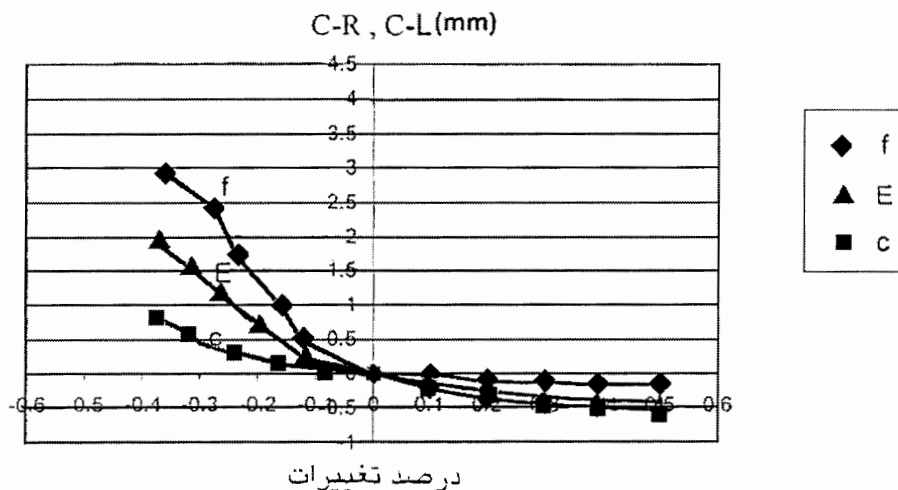
۹-۵- آنالیز حساسیت پارامترهای ژئومکانیکی در نتایج تحلیل برگشتی

در این قسمت برای بررسی تأثیر هر پارامتر در مقادیر جابجایی، آنالیز حساسیت پارامترهای ژئومکانیکی صورت می‌گیرد. این روش با تغییر دادن جداگانه هر یک از پارامترهای E , f , c و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها انجام می‌شود. ایستگاه $cw-6$ و $cw-5$ به‌عنوان نمونه انتخاب شده و پارامترهای ورودی آن تغییر داده می‌شود. نتایج آنالیز حساسیت روی پارامترها در شکل (۹-۲) نشان داده شده است. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود حساسترین پارامتر نسبت به تغییرات جابجایی، زاویه اصطکاک داخلی f می‌باشد و تغییرات مدول الاستیسته و چسبندگی از حساسیت کمتری برخوردار است. البته باید این نکته را مد نظر داشت که ضریب پواسون و چگالی توده سنگ نسبت به سایر پارامترها از تغییرات کمتری برخوردار است و از آنالیز حساسیت نسبت به آنها صرف‌نظر شده است. آنالیز حساسیت برای چند ایستگاه دیگر نیز انجام شده و همین نتایج حاصل شده است.



درصد تغییرات

(a)



(b)

شکل ۹-۲- نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی f ، چسبندگی c و مدول الاستیسته E ، بر روی جابجایی در جهت L-R (a) و C-R و C-L (b) ایستگاه‌های رفتار سنجی متروی اصفهان

۹-۶- تحلیل برگشتی داده‌های همگرایی سنجی

بعد از انجام آنالیز حساسیت، هر کدام از پارامترهای ورودی به مدل تغییر داده می‌شود، تا مقادیر جابجایی‌های بدست آمده از مدل عددی، به مقادیر بدست آمده از جابجایی اندازه‌گیری شده از رفتارسنجی نزدیک شود. این کار برای دو ایستگاه رفتارسنجی صورت گرفته و در جدول (۹-۲) مقایسه نتایج بدست آمده از روش عددی با نتایج رفتارسنجی مشاهده می‌شود، سپس در جدول (۹-۳) محدوده جواب بدست آمده توسط نرم افزار و در ادامه از محدوده جواب بدست آمده محتمل‌ترین عدد آورده شده است.

جدول ۹-۲- مقایسه مقادیر همگرایی بدست آمده از رفتار سنجی و آنالیز عددی

جابجایی های بدست آمده از مدل عددی			جابجایی های بدست آمده از رفتار سنجی			نام ایستگاه رفتار سنجی
L-R(mm)	C-L(mm)	C-R(mm)	L-R(mm)	C-L(mm)	C-R(mm)	
۶/۳	۵	۵	۸/۱۰	۴/۳۰	۴/۵۰	cw-6
۴/۵	۴	۴/۲	۳/۵	۳/۲	۳/۲	ce-5

جدول ۹-۳- انتخاب محتمل ترین جواب در محدوده جواب که از طریق تحلیل برگشتی بدست آمده است

زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (مگاپاسکال)		مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)		نام ایستگاه رفتار سنجی
	محدوده جواب	محتمل ترین جواب	محدوده جواب	محتمل ترین جواب	
محتمل - ترین جواب	محدوده جواب	محتمل ترین جواب	محدوده جواب	محتمل ترین جواب	
۳۹	۴۵-۳۵	۰/۱۶۸	-۰/۱۷۵ ۰/۱۶۰	۲۸۳۰	۲۹۰۰-۲۴۰۰ cw-6
۳۸	۴۳-۳۲	۰/۱۶۲	-۰/۱۷۳ ۰/۱۵۸	۲۸۹۳	۳۲۰۰-۲۵۶۷/۸ ce-5

فصل دهم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۱۰- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه در تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان بر پایهٔ پروفیل ساختار زمین‌شناسی موجود در مسیر مترو، بحرانی‌ترین مقاطع از لحاظ ارتفاع روباره، پارامترهای ژئوتکنیکی، ارتفاع آبرفت و فاصلهٔ دو تونل از هم انتخاب گردیده و تحلیل پایداری و انتخاب وسیلهٔ نگهدارندهٔ مناسب انجام شده است. در این راستا از آنالیز برگشتی داده‌های ابزار دقیق نیز استفاده شده است. با دقت در پروفیل زمین‌شناسی مشخص می‌شود که سازند اصلی میزبان تونل در این قطعه، توده سنگ سازند شمشک (Jssh) می‌باشد. که در کنار سازند فوق سازندهای دیگری نیز در مسیر به چشم می‌خورند که با توجه به آنکه این سازندها طول زیادی از مسیر را به خود اختصاص نمی‌دهند و به صورت پراکنده و به طولهای کوتاه دیده می‌شوند، در این قسمت از سازند Jssh برای آنالیز پایداری تونل‌های متروی دوقلوی اصفهان استفاده شده است.

برای انجام این مهم وضعیت درزه‌ها در طول مسیر خط مترو بررسی شده و اندازه‌گیری جهت و تراکم دسته درزه‌ها در طول مسیر در قطعهٔ جنوبی نشان دهندهٔ آن است که دسته درزه‌ها دارای شیب زیاد به سوی توده سنگ‌های اطراف تونل می‌باشند. شیب لایه‌ها به سوی سینه‌کار است و سینه‌کار حفاری ضعیف‌تر از دیواره‌ها می‌باشد. برای بررسی تحلیل پایداری سیستم بلوک‌های منفرد سنگ و

ناپیوستگی‌هایی که بلوک‌ها را از هم جدا می‌کند حالت‌های مختلف برای ترکیب دسته درزه‌ها به کمک نرم‌افزار UNWEDGE مدل شده است.

چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی درزه‌های سطوح با استفاده از روش Barton & Bandis در نرم‌افزار RocData محاسبه شده و در نرم‌افزار UNWEDGE مدل شده است. با توجه به اینکه فاکتور ایمنی اکثر گوه‌های بدست آمده صفر می‌باشد، سیستم نگهداری شاتکریت به نرم‌افزار اضافه شده و فاکتور ایمنی برای تمامی گوه‌ها به بالای ۱/۷۶ رسیده است. با توجه به اینکه سیستم نگهداری شامل قاب مشبک فلزی و شبکه تور فولادی نیز به سیستم نگهداری اضافه می‌شود فاکتور ایمنی بالاتر از رقم ۱/۷۶ می‌باشد.

در ادامه احتمال وقوع گسیختگی گوه‌ها در سینه‌کارها بررسی شده است. در شرایط مورد بررسی گوه‌ها وزن کمی خواهند داشت و در جهت پایدارسازی و جلوگیری از لغزش گوه‌ها می‌توان از روش تونل‌زنی جدید اتریشی استفاده کرد.

برای رده‌بندی مهندسی سنگها دو رده‌بندی مهندسی RMR و GSI در فاصله میان ایستگاه آزادی و صفه انجام شده است و این مقادیر برای فواصل بین دو ایستگاه محاسبه شده و از روی پارامترهای بدست آمده پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های میزبان سازه‌های مترو از قبیل مقاومت فشاری توده سنگ، مدول دگر شکلی و مقاومت کششی و مدول برشی با دو روش RMR و GSI تخمین زده شده است. با توجه به اینکه نتیجه برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ در دو روش رده‌بندی مهندسی RMR و GSI با یکدیگر تفاوت دارند و اختلاف‌ها به ویژه در مورد چسبندگی و مقاومت فشاری توده‌سنگ زیاد است، به دلیل کامل‌تر بودن روش GSI مقادیر c و ϕ بیشتر بر اساس

روش GSI برآورد شده است و پارامترهای ژئومکانیکی به کمک برنامه رایانه‌ای Roclab برای اعماق مختلف تونل محاسبه شده است. پارامترهای ژئومکانیکی بدست آمده برای هر سازند سنگی در فاصله میان ایستگاههای آزادی - صفه با استفاده از روش لوبشر با توجه به اینکه هر سازند از واحدهای سنگی مختلفی تشکیل شده است، محاسبه می‌شود.

در ادامه برای انجام آنالیز برگشتی در این فصل در ابتدا آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای ژئومکانیکی انجام شده و حساس‌ترین پارامترها در تحلیل برگشتی به ترتیب f , E , C تعیین شده، سپس هر کدام از پارامترهای f , E , C تغییر داده شده تا جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در همگرایی سنج با مقادیر بدست آمده از مدل عددی نزدیک شود.

نکته قابل توجه در تحلیل برگشتی اینست که مقدار مدول ارتجاعی (الاستیسیته) در تحلیل برگشتی کمی بیشتر از مدول اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی می‌باشد و این امر به این دلیل می‌باشد که بخش زیادی از شیل در اطراف تونل در محدوده باربرداری بوده و مدول حاصل متوسطی از مدول ارتجاعی اطراف تونل می‌باشد. همچنین چسبندگی اندازه‌گیری شده در تحلیل برگشتی کمتر از نتایج آزمایشات آزمایشگاهی می‌باشد، علت این مسئله را می‌توان در عوامل زیر جستجو نمود.

- اثر مقیاس بزرگتر در تحلیل برگشتی نسبت به آزمایشات آزمایشگاهی و آزمایشات برجا

- تأثیر رطوبت و اشباع بودن در برخی از نقاط در اطراف تونل

- ساده بودن مدل رفتاری بکار رفته نسبت به رفتار واقعی سنگ

برای دو ایستگاه cw-6 و ce-5 مقادیر ۲۸۳۰ و ۲۸۹۳ مگاپاسکال برای مدول الاستیسته و ۰/۱۶۸ و ۰/۱۶۲ مگاپاسکال برای چسبندگی و ۳۹ و ۳۸ درجه برای زاویه اصطکاک داخلی بدست آمده است.

به‌منظور تحلیل پایداری تونل‌های قطار شهری اصفهان که بطول ۳۸۷۵ متر از میدان آزادی شروع و تا ترمینال صفا ادامه دارد، با توجه به بحرانی‌ترین مقاطع جهت محاسبات پایداری و طراحی سازه ای تحلیل پایداری با دو روش تجربی و نظری صورت پذیرفته است. در ابتدا به کمک روش پیشنهادی بنیاوسکی (۱۹۸۹) در خصوص ضخامت شاتکریت همراه با پیچ سنگ و یا قابهای فلزی بر اساس امتیازدهی RMR، همچنین روش امتیازدهی Q ارائه شده توسط بارتون (۱۹۹۳)، پوشش نگهدارنده اولیه انتخاب شده است. سپس با استفاده از مدلسازی‌های عددی به کمک نرم‌افزار Plaxis 2D Version 7.2 تحلیل پایداری انجام گرفته و سیستم نگهدارنده مناسب شامل قاب مشبک فولادی به همراه شاتکریت پیشنهاد شده است. برای مدلسازی در این فصل جزئیات مراحل اجرایی تونل، روش NATM به همراه مشخصات کاملی از بارگذاری‌های مختلف، وضعیت توده خاک و سنگ و پلان و پروفیل مسیر و مقاطع تونل‌ها با استفاده از نرم افزارهای عددی در حالات مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است و بر اساس نتایج نیروهای بدست آمده، طراحی سیستم‌های نگهدارنده انجام پذیرفته است. عملکرد سیستم نگهدارنده اولیه با توجه به روند اجرایی، با ابزارهای دقیق رفتارسنجی کنترل شده است.

۱۰-۲- پیشنهادات

۱- برای بررسی پایداری کامل تونل در هر سه بعد می‌توان از نرم افزار Plaxis 3D tunnel استفاده کرد. با توجه به قابلیت‌های این برنامه، کلیه اثرات حفاری اعم از پایداری سینه کار، پیشروی جبهه‌های حفاری، حالات مختلف حفاری و تغییر شکل‌های سه بعدی در سطح و عمق زمین قابل محاسبه می‌باشد.

۲- در عمل ملاحظه گردید که در برخی از ایستگاههای همگرایی سنجی که دارای ۵ پین می‌باشد پین‌های کف پس از کف برداری دچار آسیب دیدگی شده‌اند و مجدداً ترمیم شده است. همچنین در قسمتی از پایین دیواره‌ها، پین‌های نصب شده در پوشش بتنی مدفون گردیده است. بنابراین باید در تمامی مراحل نصب و نگهداری پین‌ها دقت لازم را بعمل آورد تا در قرائت‌ها خطا وارد نشود.

فهرست منابع

فهرست منابع:

- امامی تبریزی م. (۱۳۷۶)، مطالعه و ارزیابی روش های تعیین منحنی اندرکنش بین توده سنگ اطراف فضاهای زیرزمینی و سیستم نگهدارنده، سمینار کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه امیرکبیر.
- امامی تبریزی، م. (۱۳۷۷)، رفتارنگاری و آنالیز پایداری تونل های انحراف و انتقال آب سد آید و غموش، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- اکبری جور، حسین، (۱۳۷۸)، گسترش یک سیستم تحلیل برگشتی به منظور تعیین مدول دگرشکلی و تنش های برجا با استفاده از روش المان محدود؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- بلیغ، محمود، (۱۳۷۹)، تحلیل پایداری تونل تالون با استفاده از داده های ابزار دقیق، پایان نامه - کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- بهنیا، ا و بهنیا، ک. ۱۳۷۳. بناهای زیرزمینی. موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران
- ترابی، سید رحمان، (۱۳۸۰)، مقدمه ای بر مکانیک سنگ، انتشارت دانشگاه صنعتی شاهرود.
- دانشگاه تربیت مدرس و شرکت خاک و سنگ، (۱۳۸۲)، نتیجه آزمایش های ژئوتکنیکی نمونه های قطار شهری اصفهان.
- دهقان بنادکی، محمد مهدی، (۱۳۸۰)، تئوری بلوک و کاربرد آن در مهندسی سنگ، جن هوا شی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- سازمان قطار شهری اصفهان و حومه، (۱۳۸۴)، گزارش رفتار سنجی و ابزار دقیق تونل های قطار شهری اصفهان - قطعه جنوبی (مسیر میدان آزادی - ترمینال صفه)
- شرکت الموت، (۱۳۸۲)، گزارش زمین شناسی و ژئوتکنیک متروی اصفهان، قطعه جنوبی
<http://www.alamoot-co.com>
- صفی خانی، علی اصغر، (۱۳۸۱)، تحلیل سه بعدی مغار نیروگاه طرح و توسعه سد مسجد سلیمان با استفاده از نتایج بدست آمده از آنالیز برگشتی به کمک نرم افزار ANFYS.
- فاروق حسینی، محمد، (۱۳۷۹)، درآمدی بر مکانیک سنگ، (مؤلف: وتوکوری، وی - اس، کاتسویاما، ک.)، مرکز خدمات فرهنگی سالکان.

قارونی نیک، مرتضی، (۱۳۸۰)، نگهداری حفریات زیرزمینی در سنگ‌های سخت، (مؤلف: هوک، کیسر، باودن)، موسسه علمی - فرهنگی نص

موحدزاده اصفهانی، حمیدرضا، (۱۳۸۰)، آنالیز برگشتی داده‌های ابزار دقیق مغار سد مسجد سلیمان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

هراتی، محمدرضا، (۱۳۷۴)، طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها در ارتباط با طراحی فضاهای زیرزمینی.

ASTM, D4403-84,(1996), **standard practice for extensometers used in rock**, volume:04.08,section 4, pp.610 -619.

Bieniawski Z.T, (1989), **Engineering rock mass classifications**, Wiley-inter science Newyork, P.272.

Brinkgreve R.B.J and Verneer P.A., (1998), Plaxis version 7.2, **Reference manual**, P.89.

CECW-Eg, (1997), **Engineering and Design Tunnels and Shafts In Rock** Department of the U.S. Army Corps of Engineers, Manual No. 1110-2-2901, www.usace.army.mil/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-2901/toc.htm, pp.272 -292.

Dunnicliff, John, (1993), **Geotechnical Instrumentation For Monitoring Field Performance**, John Wiley&Sons, Newyork, P .608.

Esfahanmetro, (2005), www.esfahanmetro.org.

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

Hoek, E. and Brown, E.T., (1997), **practical estimates of rock mass strength** int. J. R. Mech. Min, PP. 33-34.

Hoek, E. et al, (2002), **Hoek - Brown Failure criterion**, 2000 Edition. www.roscience.com/library/pdf/RL_1.pdf, pp. 1-7.

Hoek, E., (2000)-a, **Rock Engineering Course notes by Prof Evert Hoek** www.roscience.com, pp. 204-221.

Hoek, E., (2000)-b, **Practical Rock Engineering by Prof Evert Hoek**, www.roscience.com/hoek/pdf/Chapter_3_of_Rock_Engineering.pdf, pp. 40-60.

Hoek, E., Kaiser, P.K., (1995), **support of underground excation in Hard rock**, Balkema., P. 215.

<http://www.Slopeindicator.com>

<http://www.sisgeo.com>

<http://www.Interfels.com>

<http://www.payab-zamzam.com>

<http://www.Geokon.com>

Kirkaldic, L., (1988), **Rock classification systems for Engineering Purposes**, ASTM, chapter12, pp.1-18.

Laubscher, D.H. (1993), **Planning mass mining operations**, vol 2, Comprehensive Rock Engineering. Pergamon Press, P. 283.

Marinos P. and Hoek E. ,(2001), **Estimating the geotechnical. properties of heterogeneous. rock masses such as flysch**
<http://users.ntua.gr/marinos/downloads/estimating.pdf>, pp.85-92.

Palmstrom, A., (1996), **Characterizing Rock Mass by Rmi for use in practical Rock Engineering**, Tunneling and Underground Space Technology, Elsevier Science Vol.11, No.3, PP.287-303.

Sakurai and Adachi, (1988), **Evaluation of the mechanical stability of underground excavations**, <http://www.jaea.go.jp/04/tisou/zh12/h12/s02/pdf/c-03-01.pdf>, pp.1-6.

Sakurai, S., Takeuch, K., (1983), **Back analysis of measured displacements of tunnels**, Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 16, Issue 3, pp.173-180.

Sakurai S., (1993),**Back Analysis in Rock Engineering** , Comprehensive Rock Engineering, Vol.4, Eds: J.A . Hudson,Elsevier , pp. 543-569.

Serafim, J. L. and pereira,J. F., (1983), **Consideration of Geomechanics classification of Bieniawski**, proc.Int, sym, Eng, geo and underground construction Lisbon,Vol.1, pp. II.33- II.42.

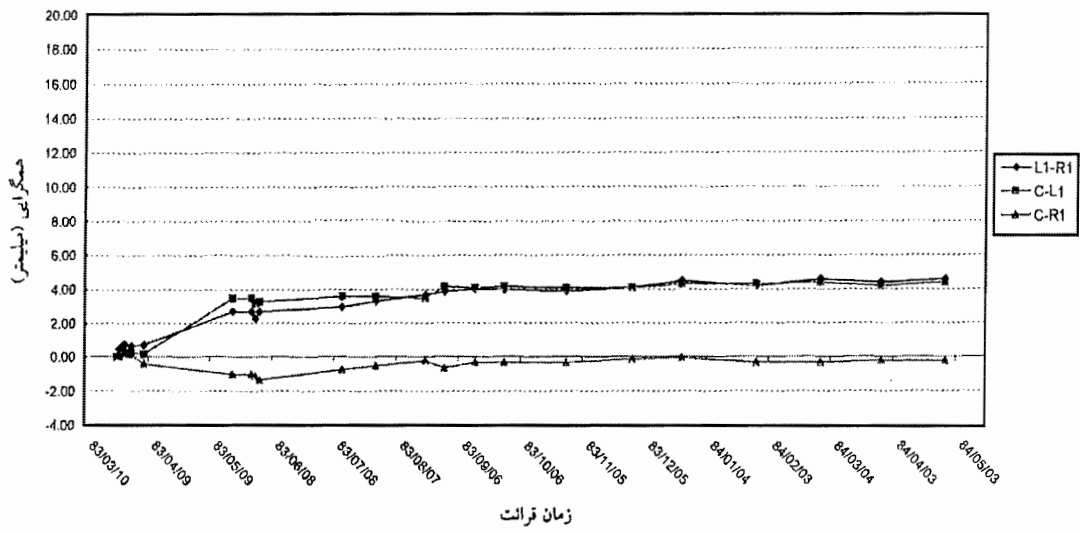
Terzaghi, (1946), **Rock Load Classification Engineering**,
<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-2901/c-7.pdf>

Zhang, L., (2005), **Engineering Properties of Rock**, Elsevier Science, P. 290.

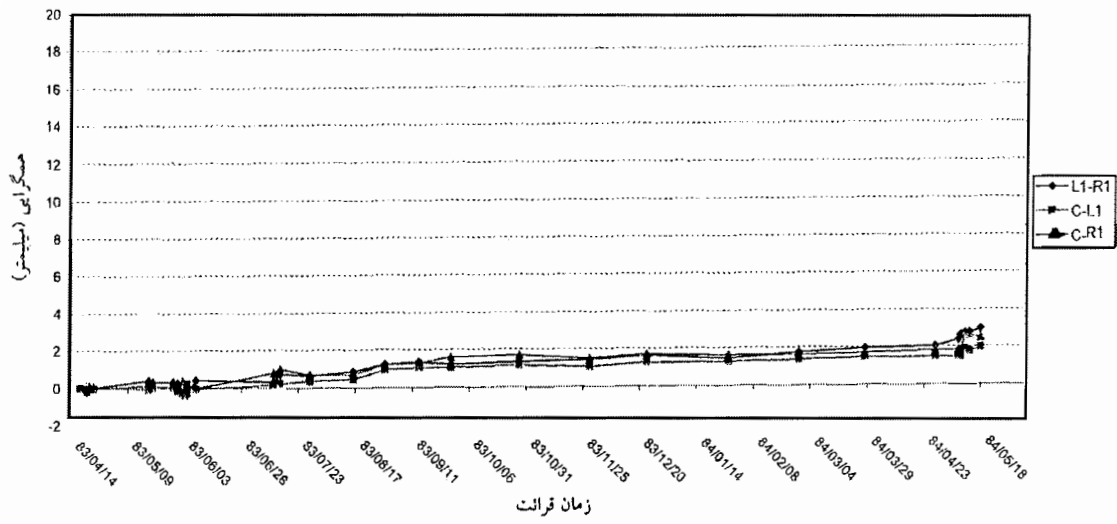
پوست

پیوست

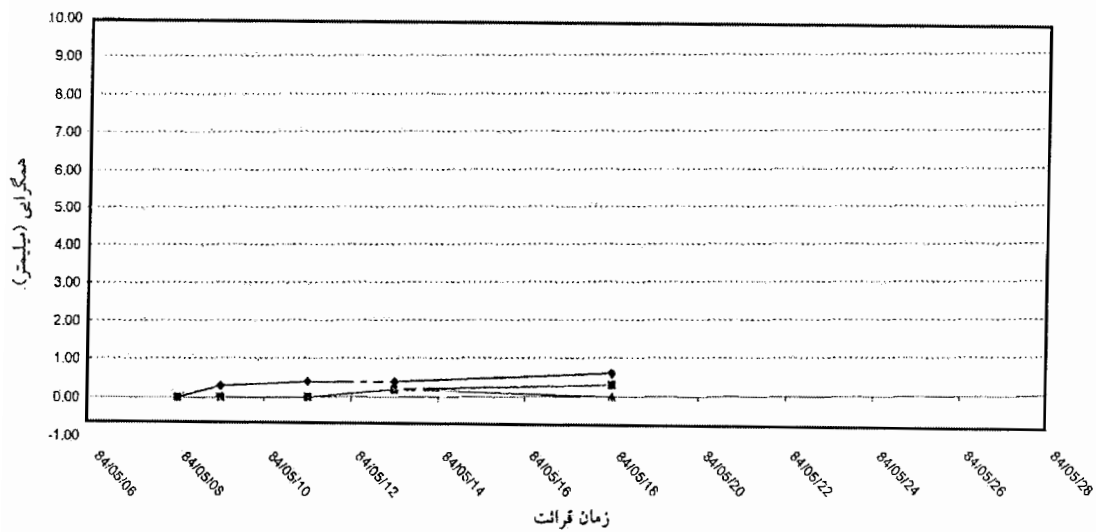
نمودارهای همگرایی بر حسب زمان
در قطعه جنوبی قطار شهری اصفهان
حدفاصل (ایستگاه آزادی-صفه)



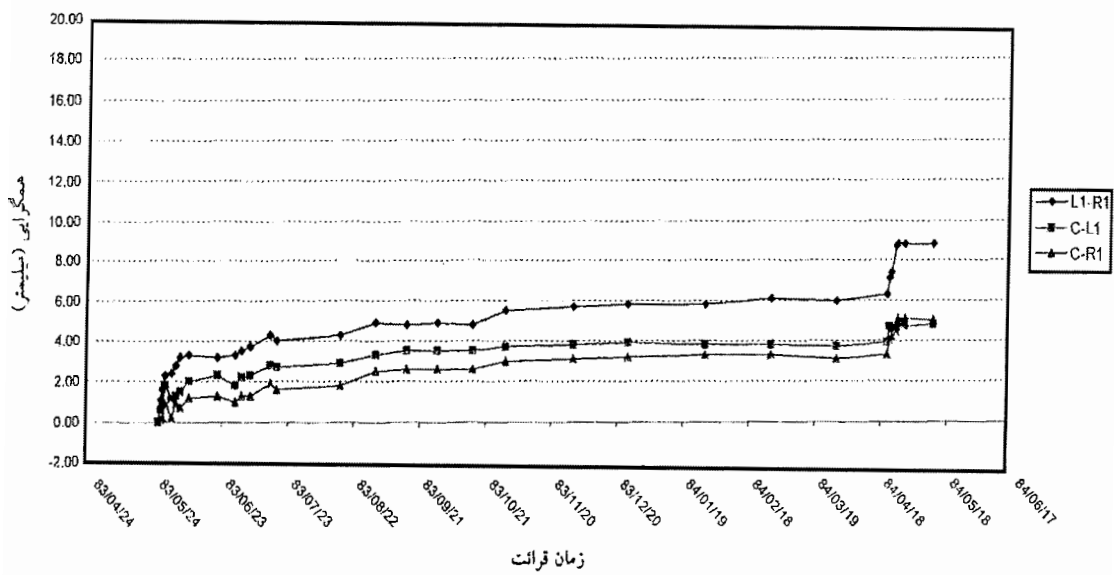
شکل الف-۱- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۴ همگرایی سنج



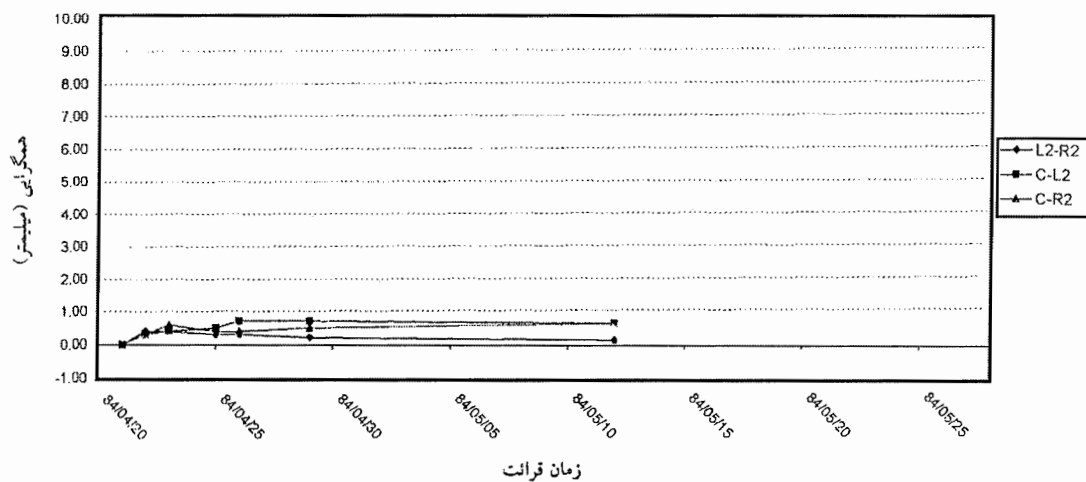
شکل الف-۲- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۵ همگرایی سنج



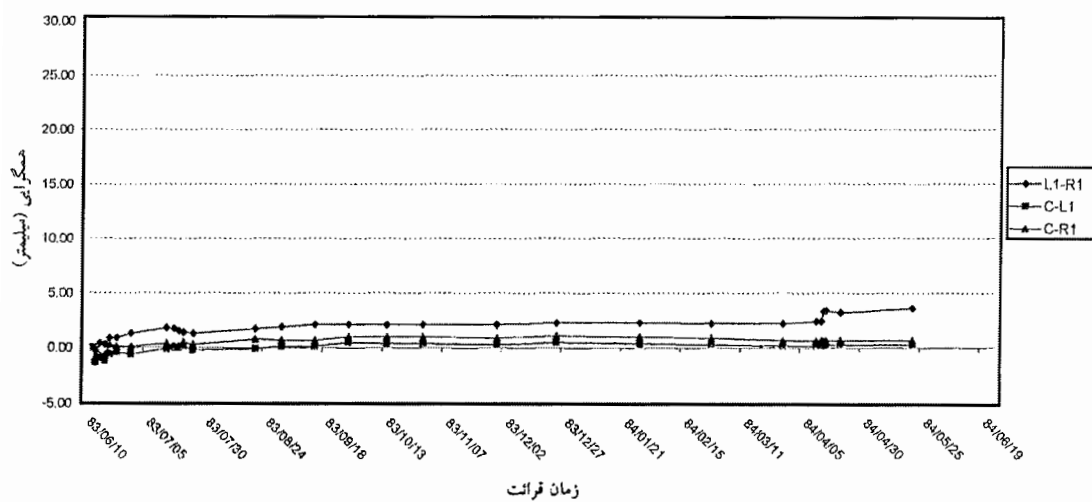
شکل الف-۳- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-5 همگرایی سنج پنج نقطه‌ای



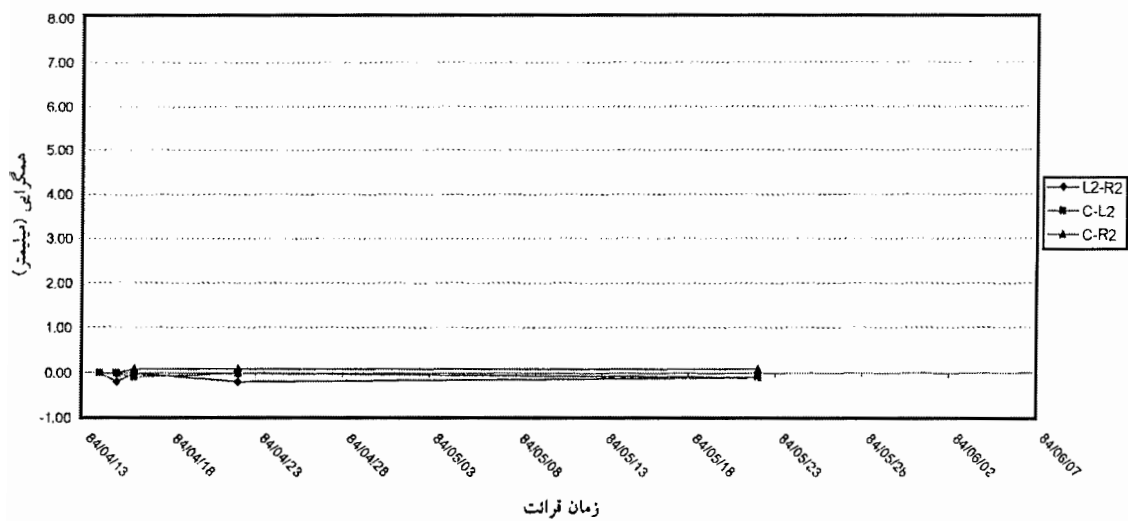
شکل الف-۴- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-6 همگرایی سنج



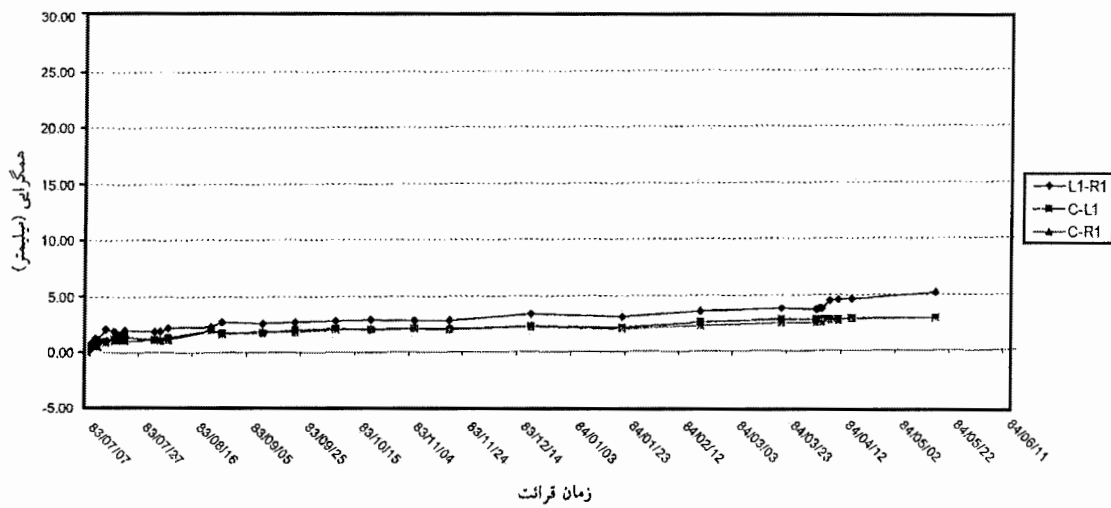
شکل الف-۵- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-6 همگرایی سنج پنج نقطه‌ای



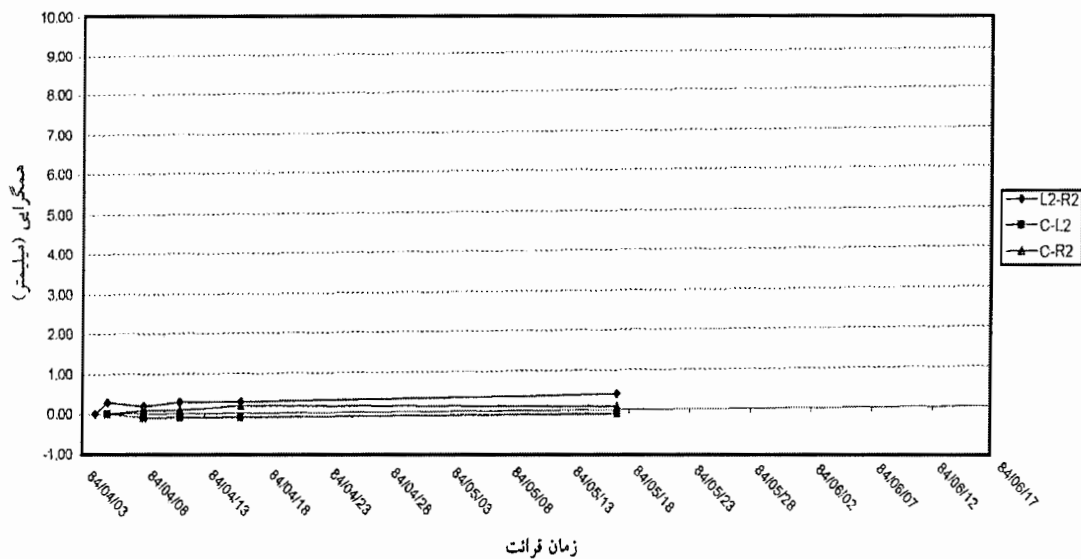
شکل الف-۶- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-7 همگرایی سنج



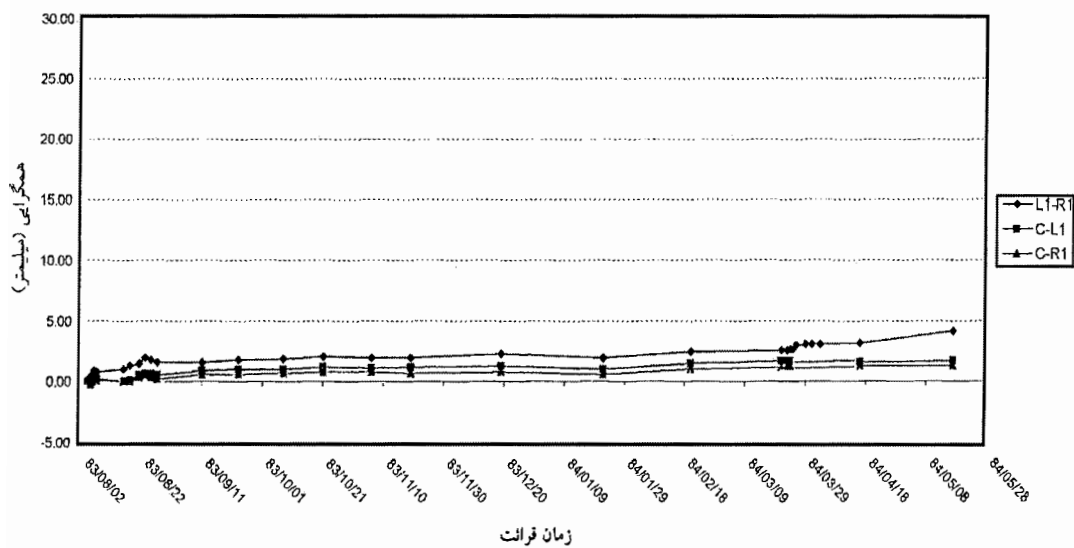
شکل الف-۷- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۷- CW همگرایی سنج پنج نقطه‌ای



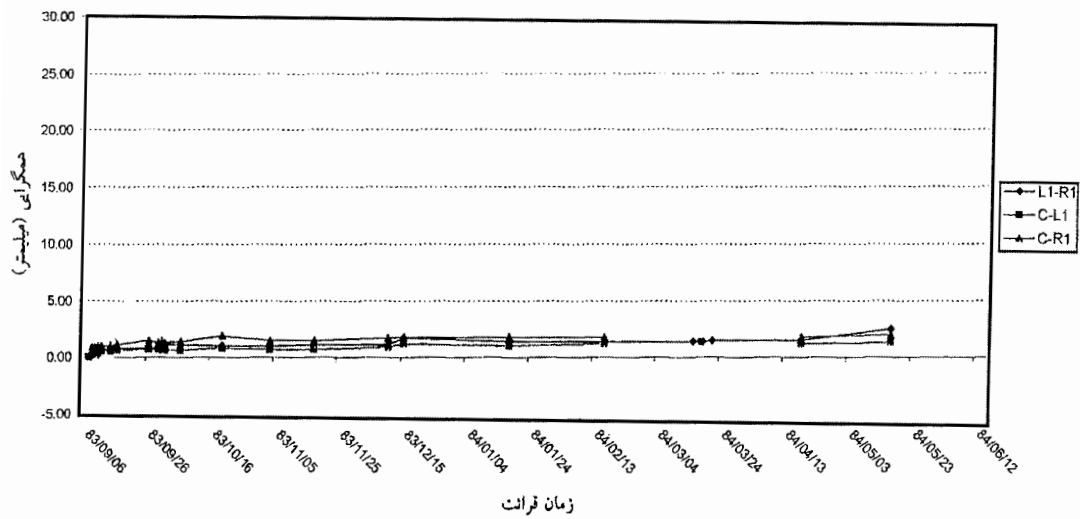
شکل الف-۸- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۸- CW همگرایی سنج



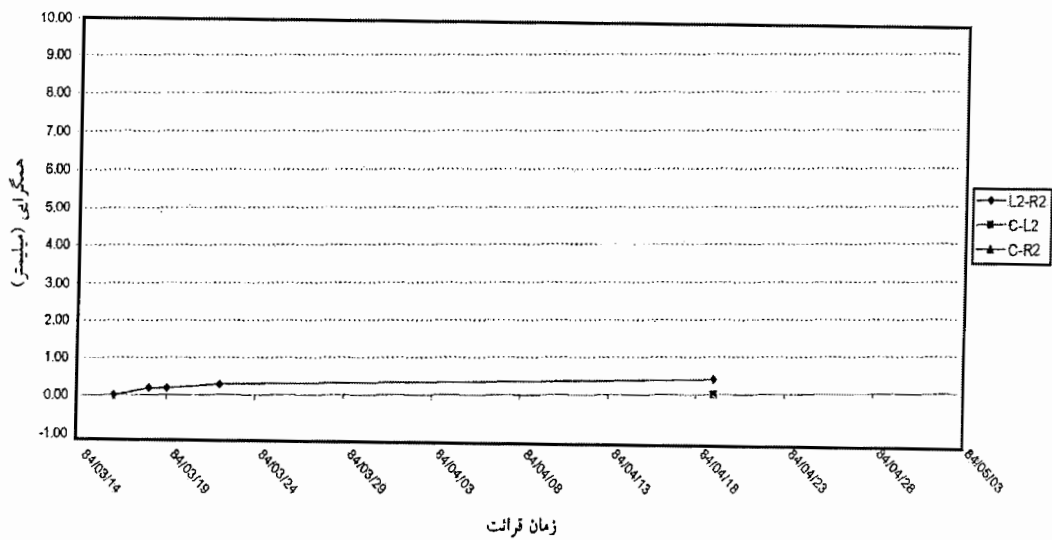
شکل الف-۹- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۸ همگرایی سنج پنج نقطه‌ای



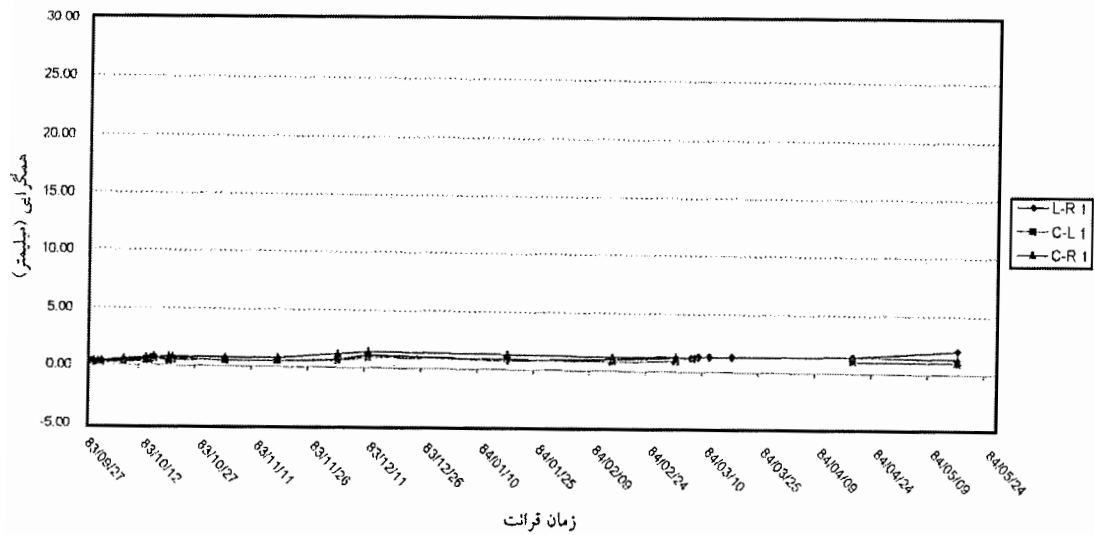
شکل الف-۱۰- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۹ همگرایی سنج



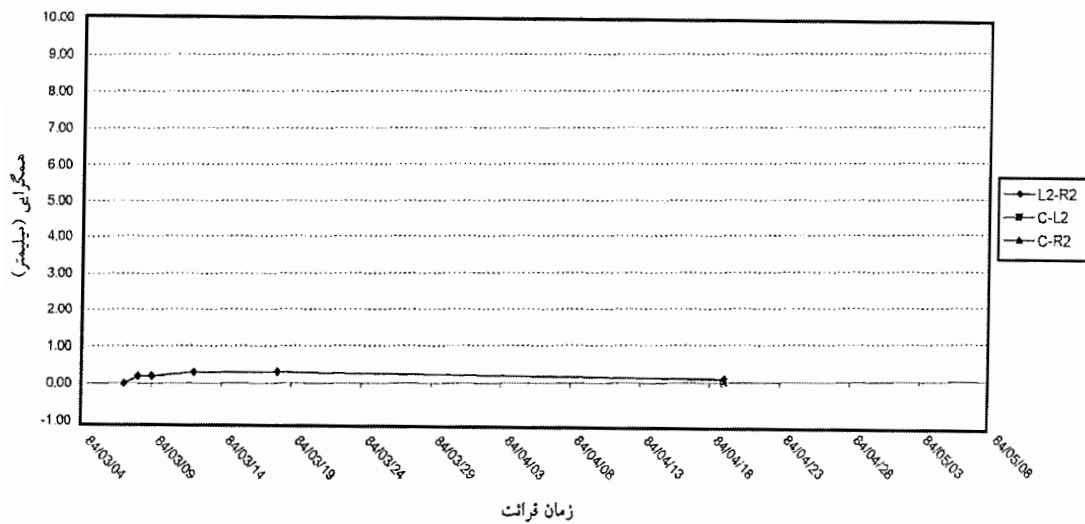
شکل الف-۱۱- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۰- CW همگرایی سنج



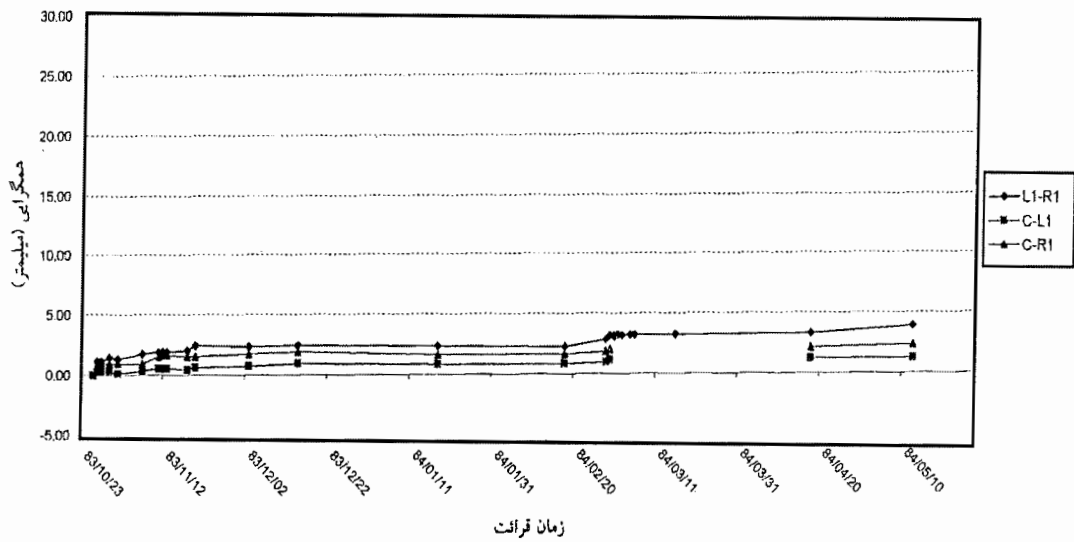
شکل الف-۱۲- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه ۱۰- CW همگرایی سنج پنج نقطه‌ای



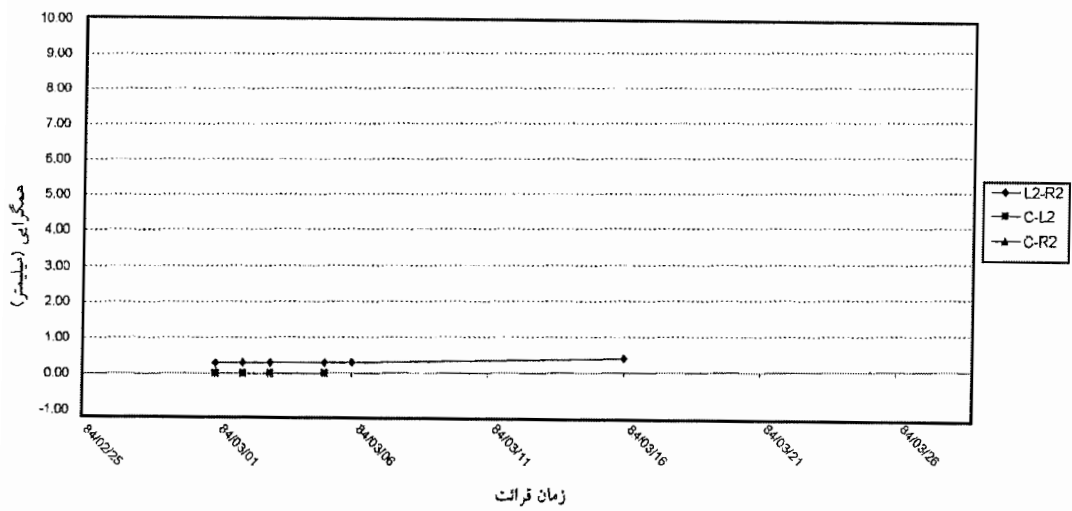
شکل الف-۱۳- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۱ همگرایی سنج



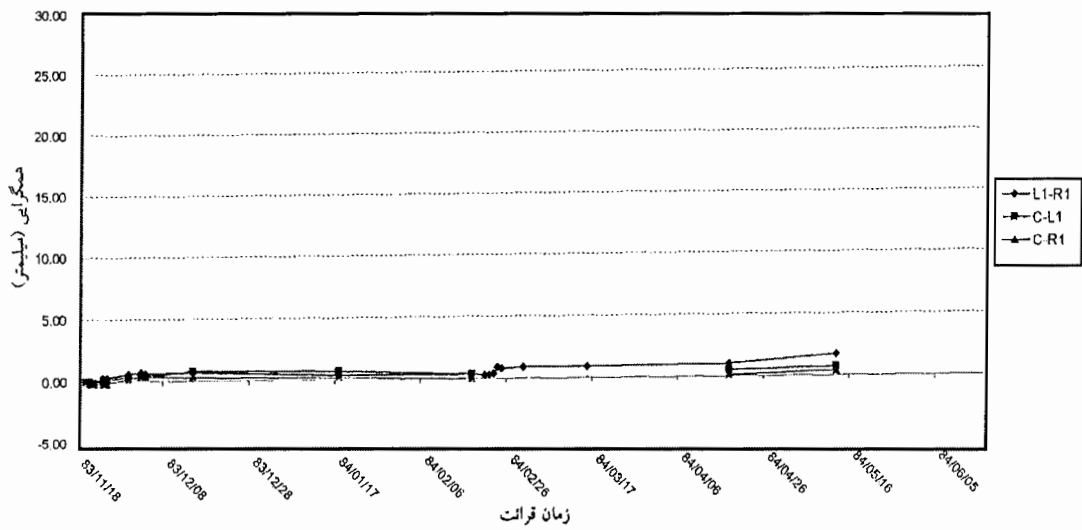
شکل الف-۱۴- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۱ همگرایی سنج پنج نقطه‌ای



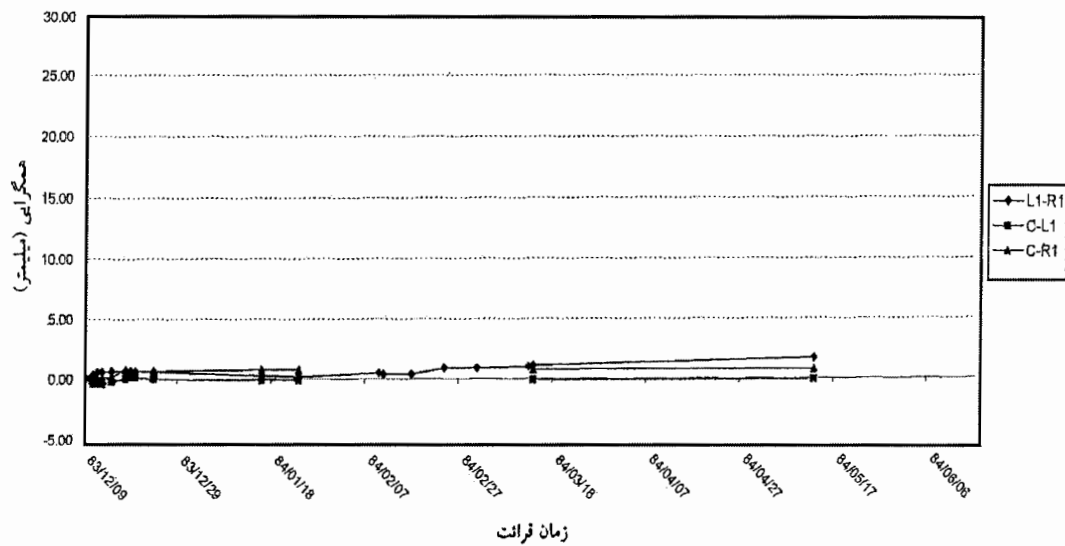
شکل الف-۱۵- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۲ همگرایی سنج



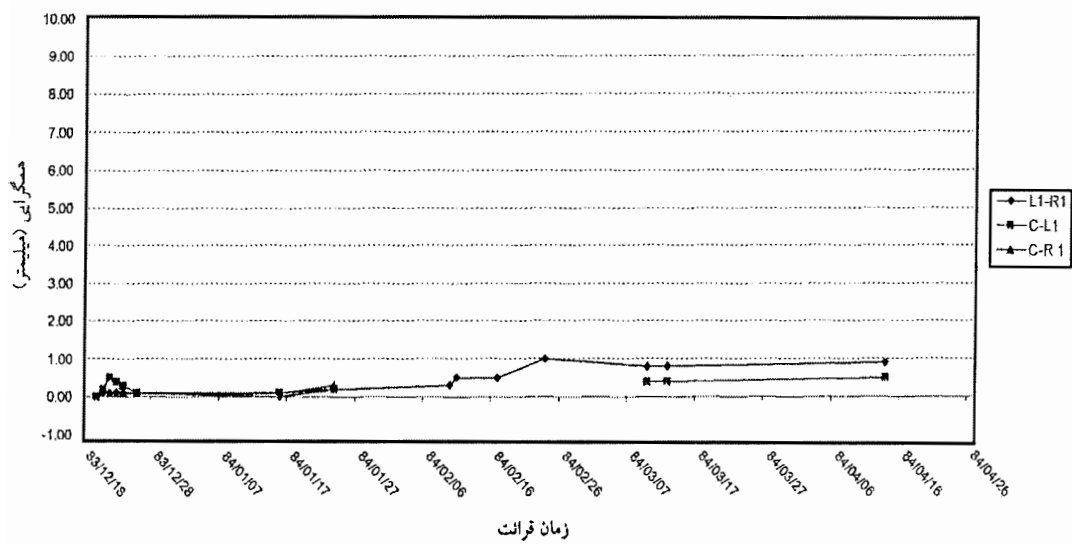
شکل الف-۱۶- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۲ همگرایی سنج پنج نقطه‌ای



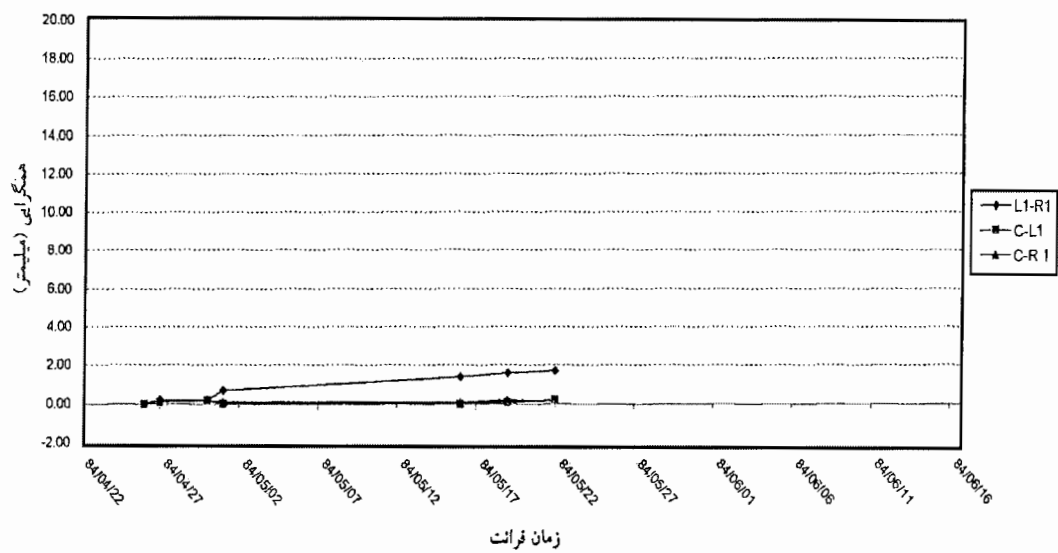
شکل الف-۱۷- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۳ همگرایی سنج



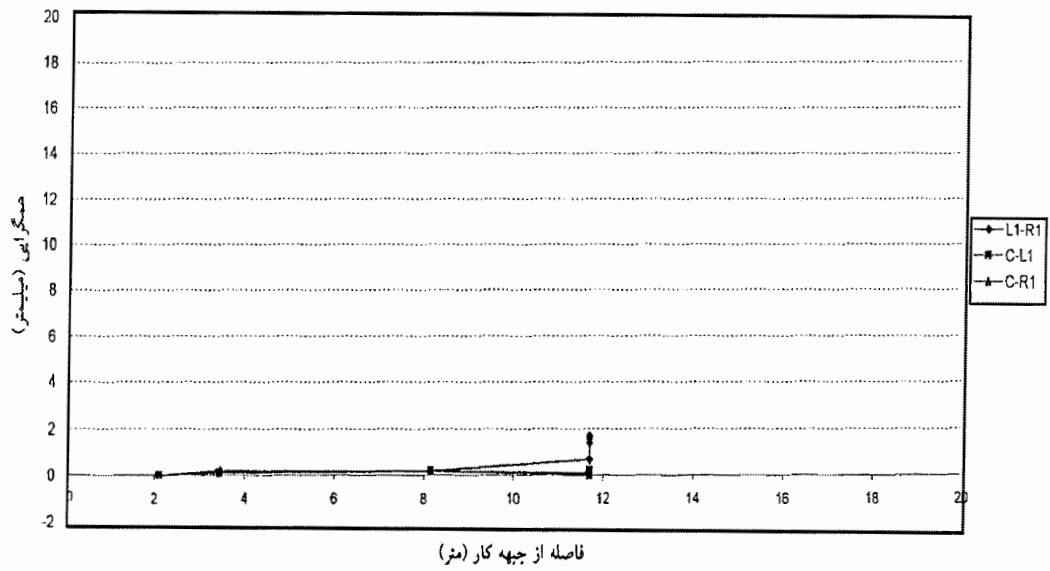
شکل الف-۱۸- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۴ همگرایی سنج



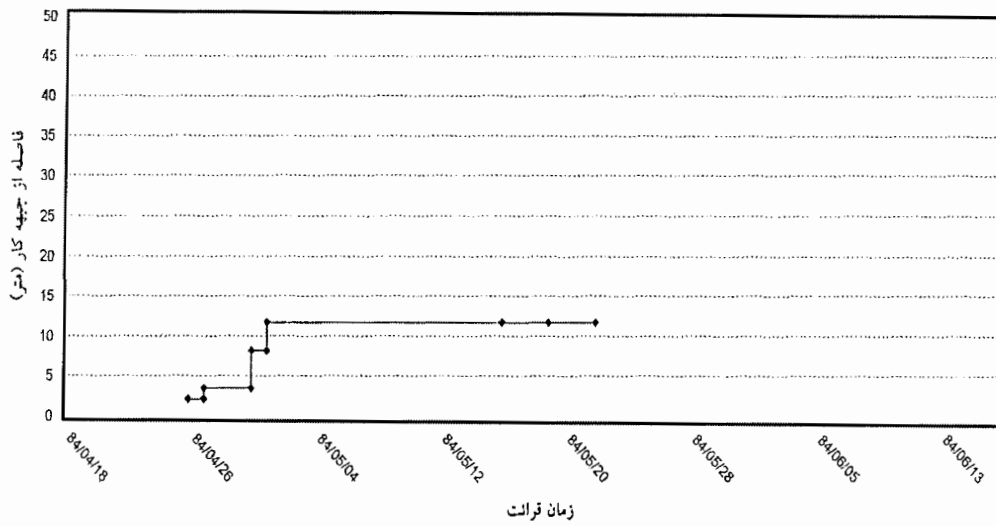
شکل الف-۱۹- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۵ همگرایی سنج



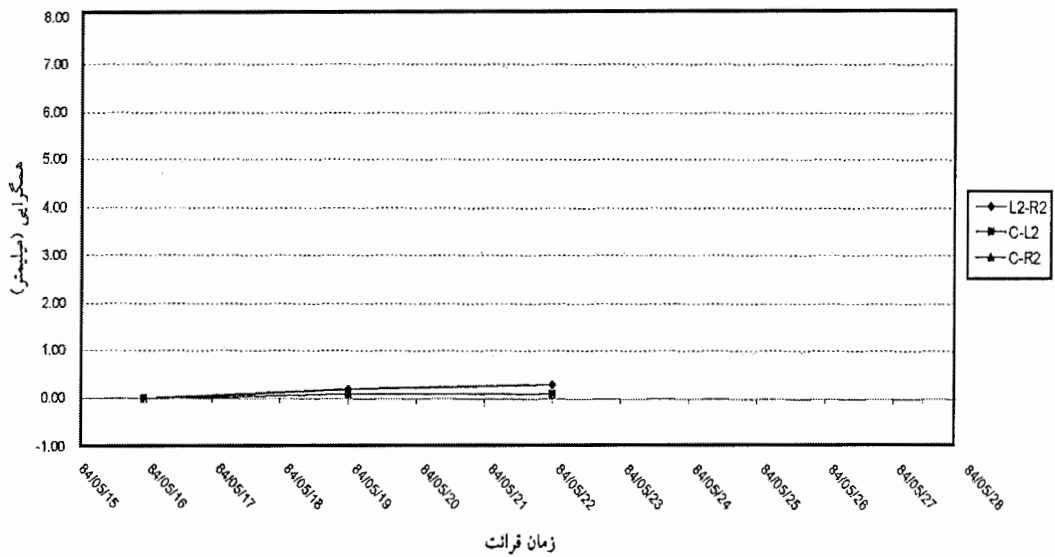
شکل الف-۲۰- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۶ همگرایی سنج



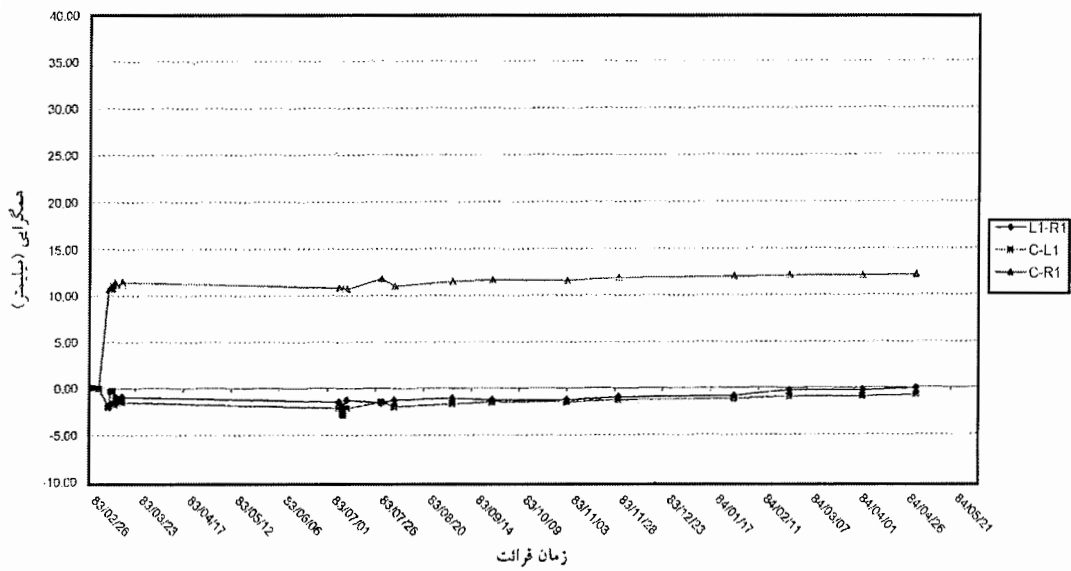
شکل الف-۲۱- نمودار همگرایی بر حسب فاصله جبهه کار از ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱۶



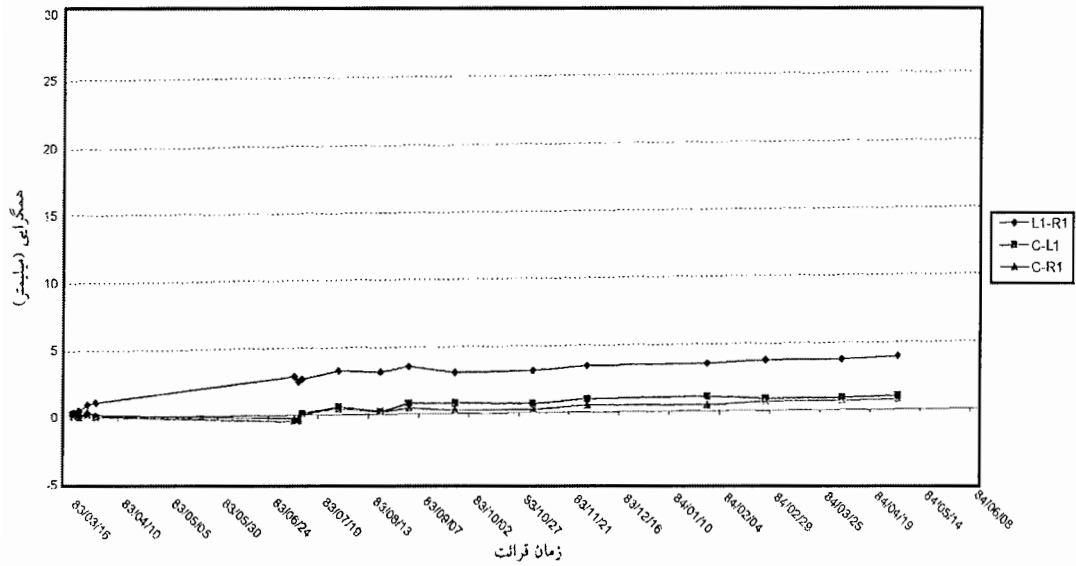
شکل الف-۲۲- نمودار فاصله ایستگاه همگرایی سنجی CW-۱۶ از جبهه کار بر حسب زمان



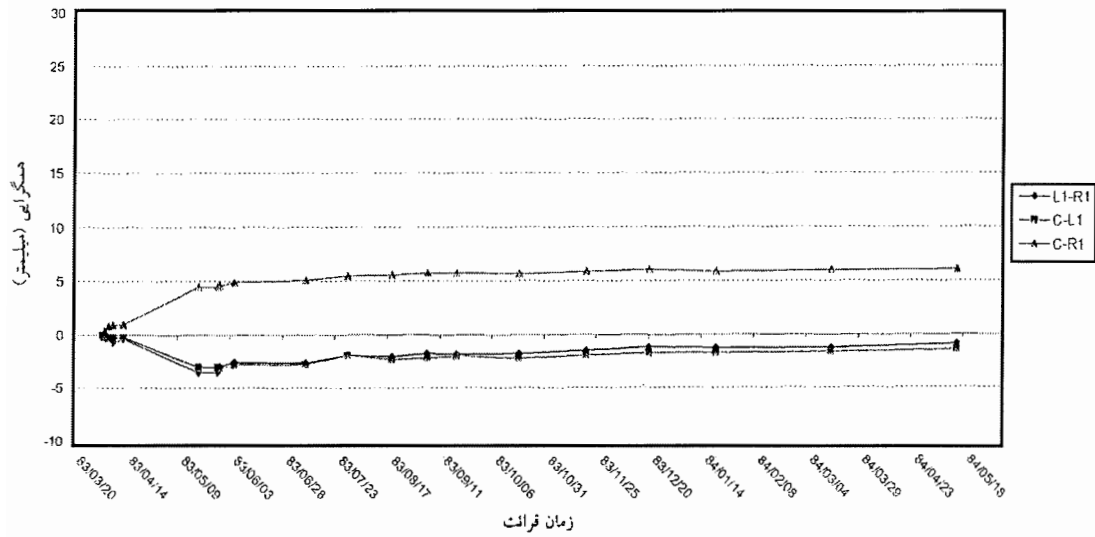
شکل الف-۲۳- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CW-۱۶ همگرایی سنج پنج نقطه‌ای



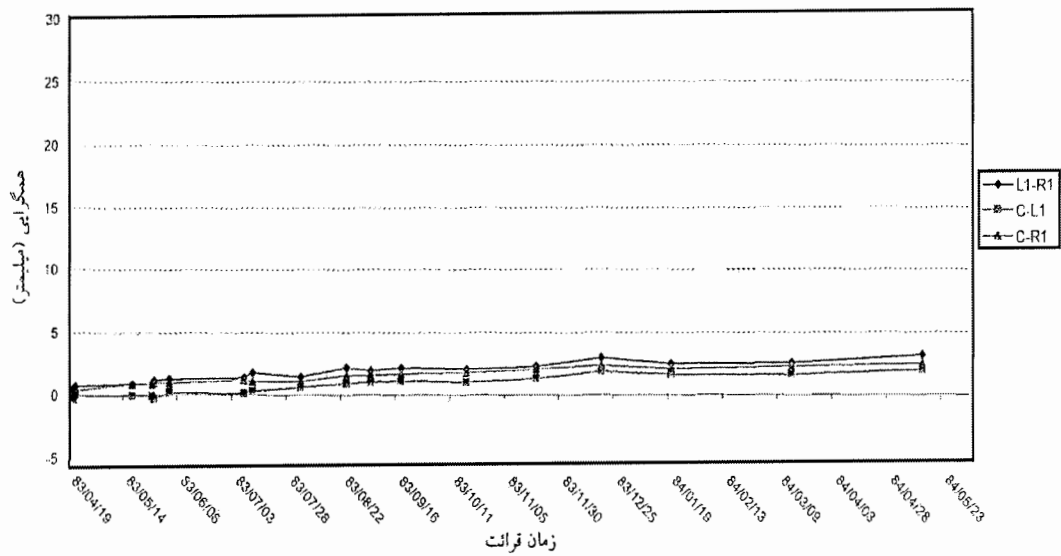
شکل الف-۲۴- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۱ همگرایی سنج



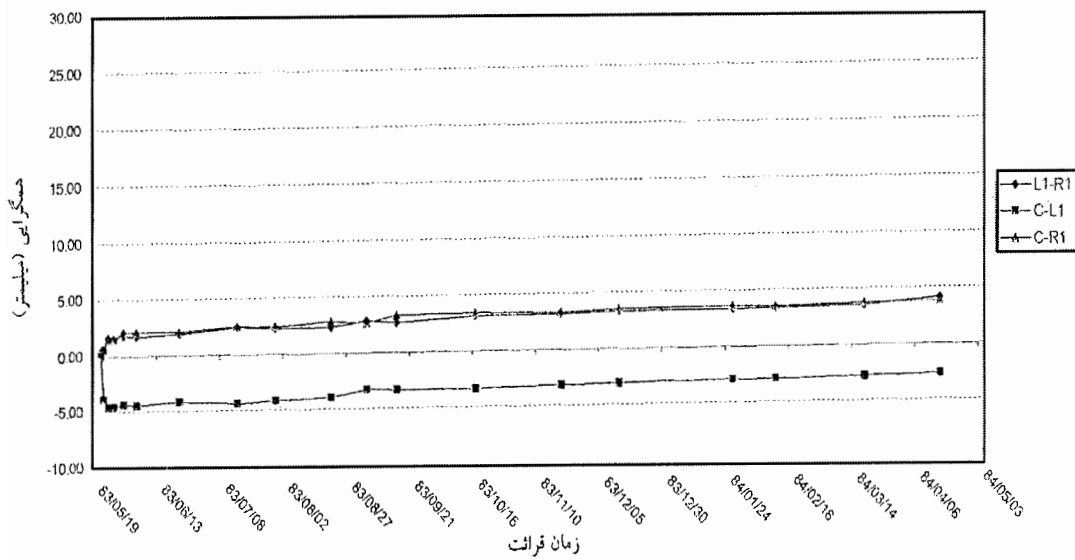
شکل الف-۲۵- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۲ همگرایی سنج



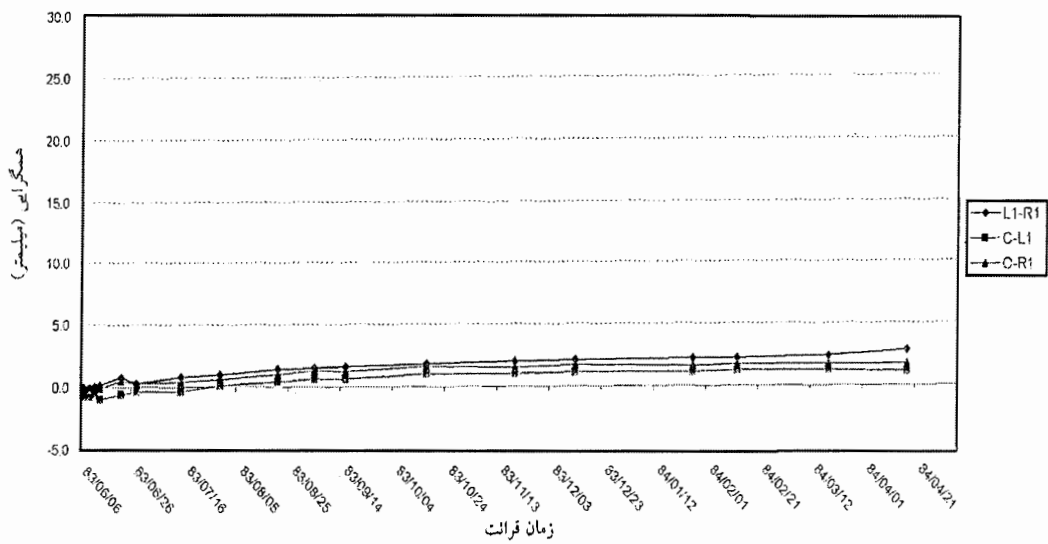
شکل الف-۲۶- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۳ همگرایی سنج



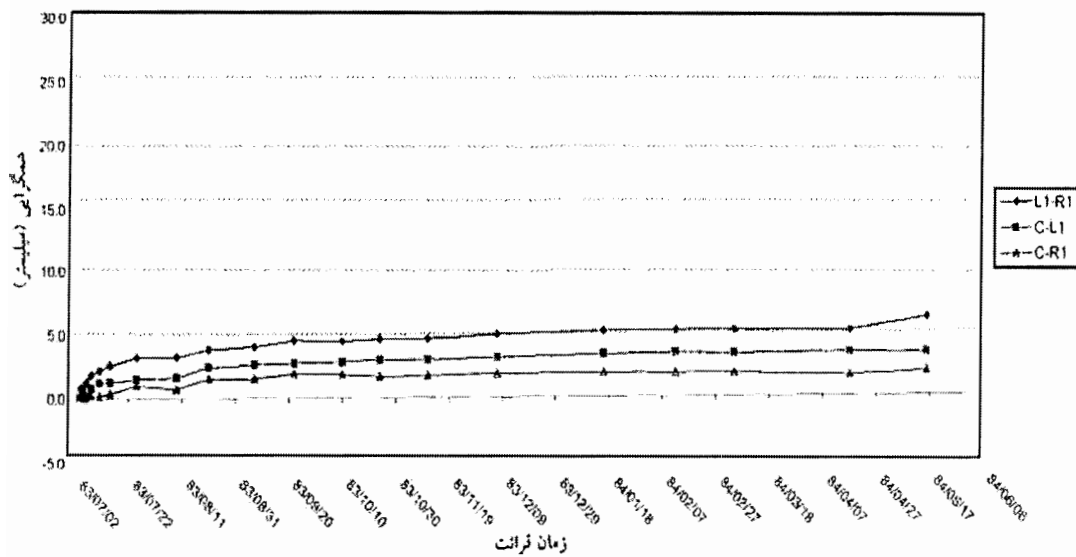
شکل الف-۲۷- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۴ همگرایی سنج



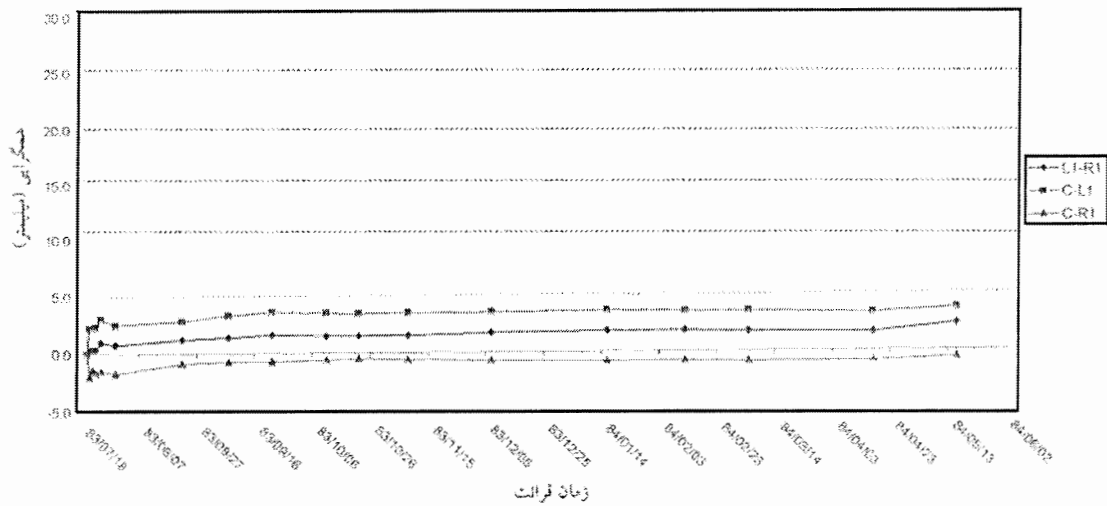
شکل الف-۲۸- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۵ همگرایی سنج



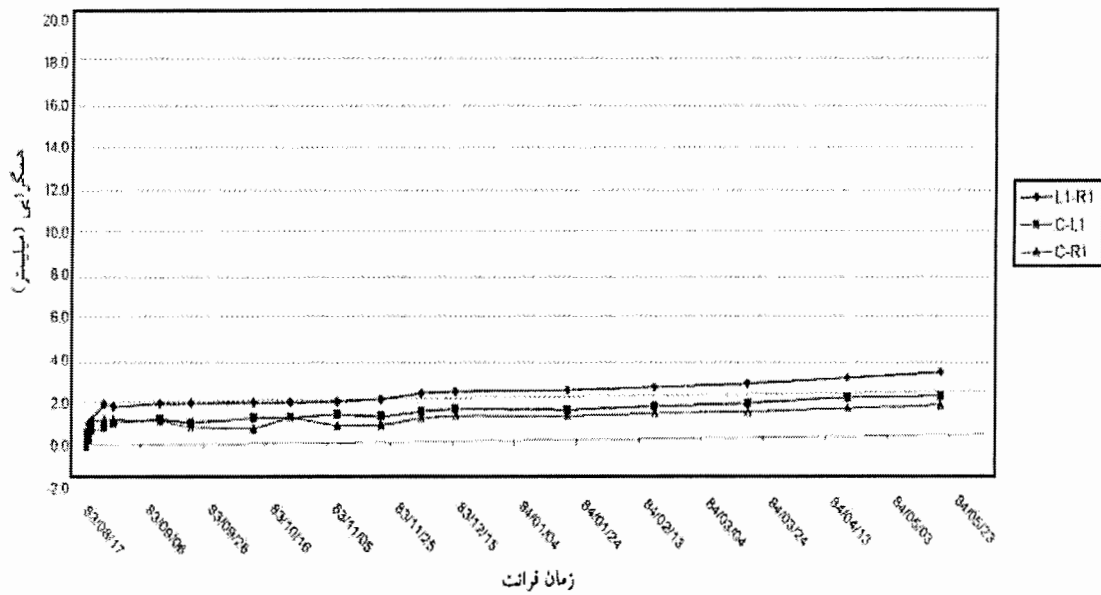
شکل الف-۲۹- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۶ همگرایی سنج



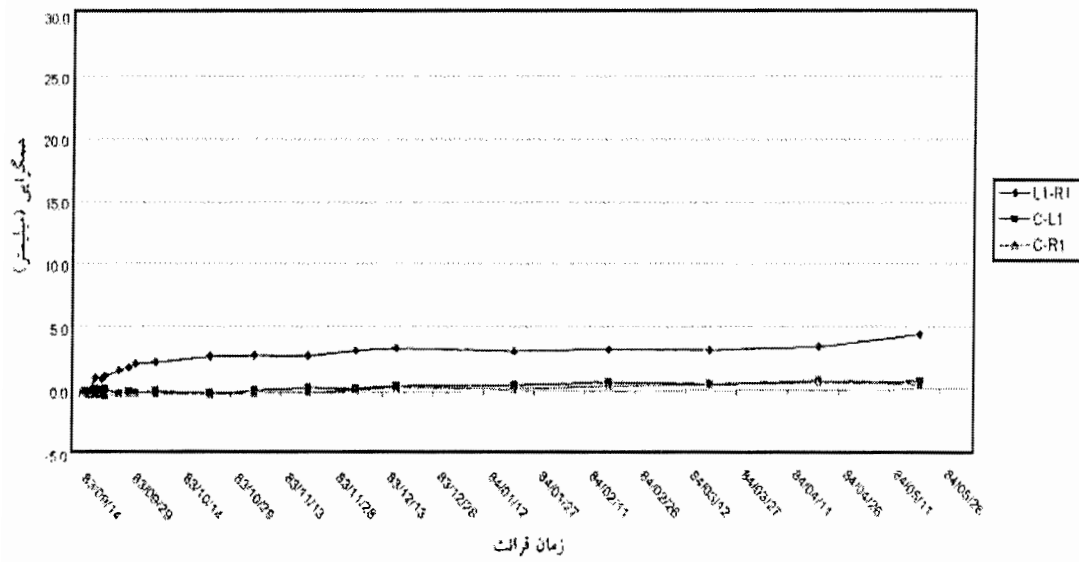
شکل الف-۳۰- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۷ همگرایی سنج



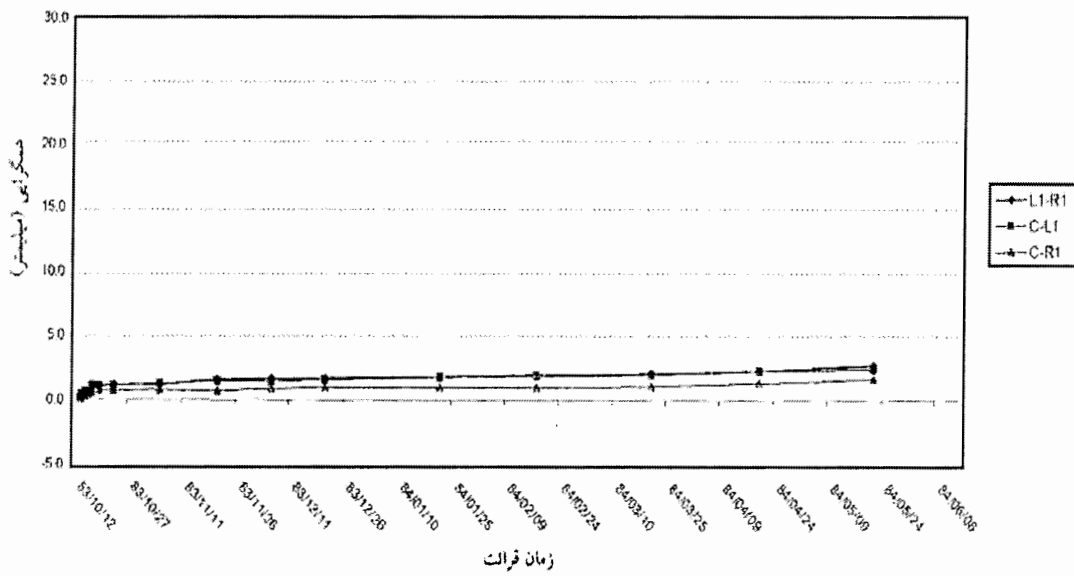
شکل الف-۳۱- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۸ همگرایی سنج



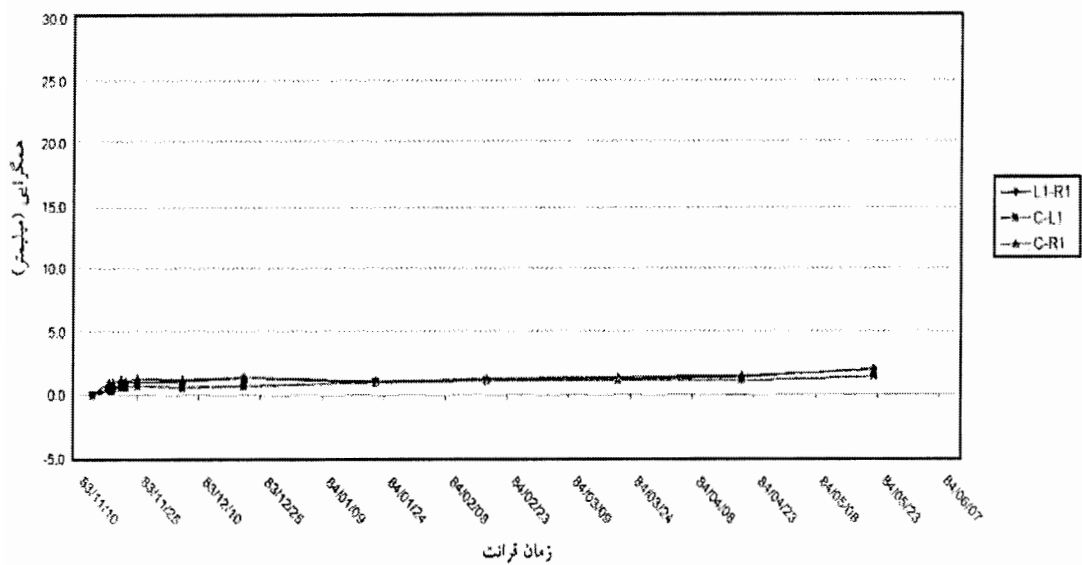
شکل الف-۳۲- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۹ همگرایی سنج



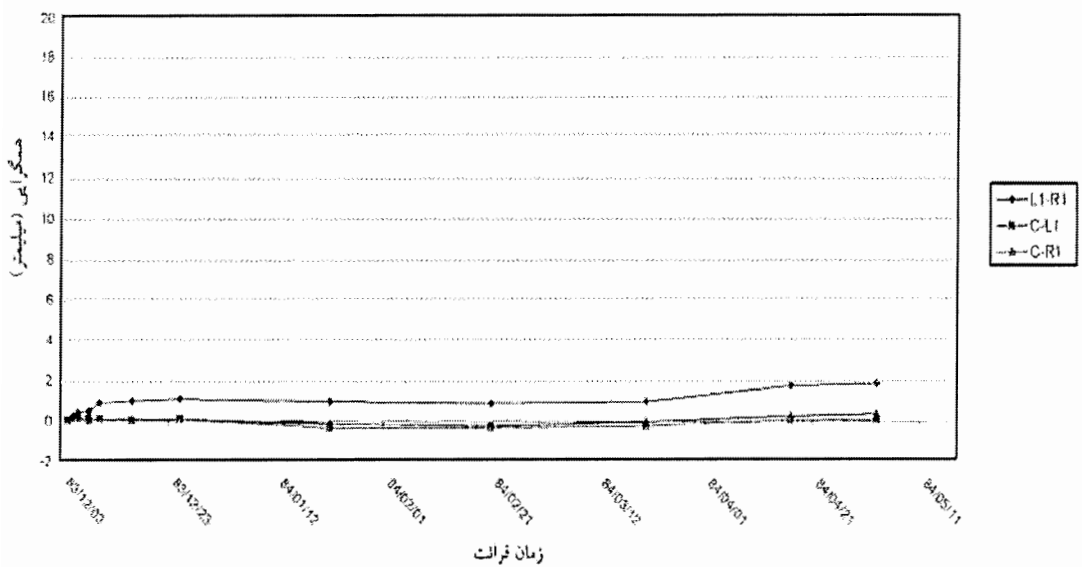
شکل الف-۳۳- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۱۰ همگرایی سنج



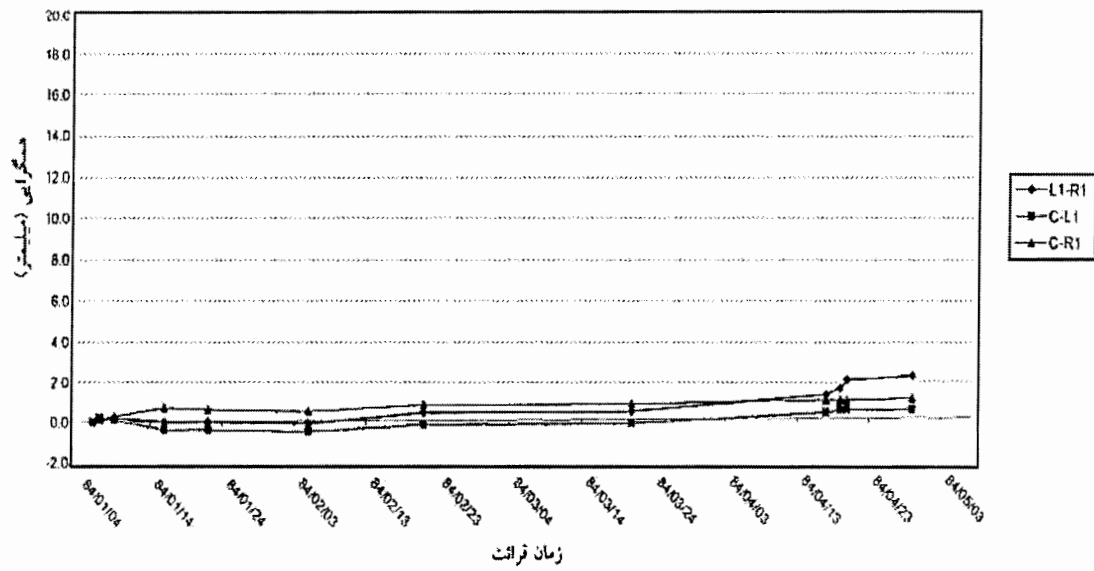
شکل الف-۳۴- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۱۱ همگرایی سنج



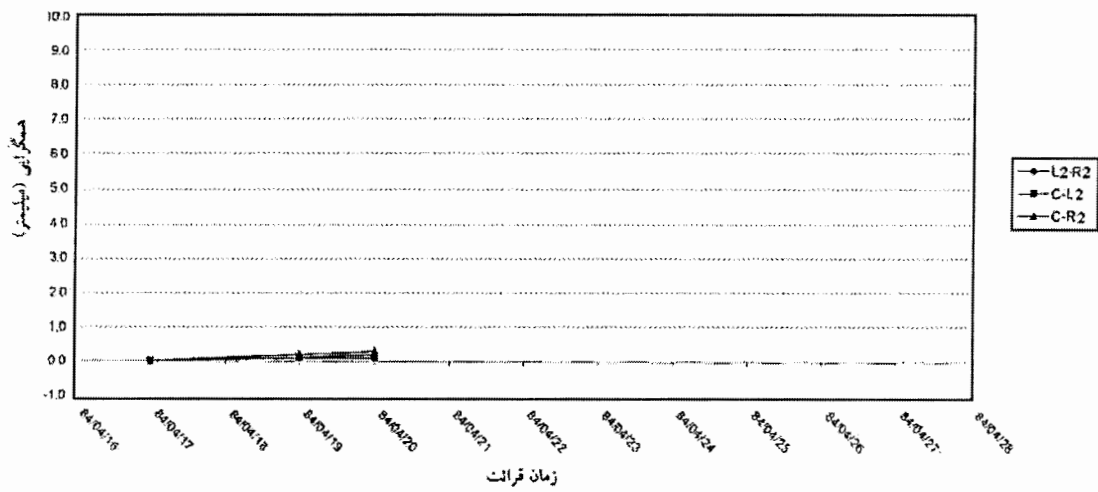
شکل الف-۳۵- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۱۲ همگرایی سنج



شکل الف-۳۶- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۱۳ همگرایی سنج



شکل الف-۳۷- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۱۴ همگرایی سنج



شکل الف-۳۸- نمودار همگرایی بر حسب زمان در ایستگاه CE-۱۴ همگرایی سنج پنج نقطه‌ای

Abstract

Isfahan is one of the most important cities in economy and business located in the center of Iran. Development of the transportation system in this city and in the first stage its subway system is the priority. In this thesis, the stability analysis of Isfahan subway tunnels is investigated in southern part with 3875 meters from Azadi square station to Sofe station. The subway is designed with a couple tunnels which will be used for two-way transportation. Stability analysis started after selecting the critical sections from geological profiles and defining the geomechanical parameters of included formations with numerical methods by Plaxis 2D version software package.

To control the input geomechanical data, back analysis approach has been carried out on the results of instrumentation. To control also the stability of the wedges formed by the discontinuities along the tunnel another analysis with Unwedge software has been carried out. After defining the cohesion factor, shear modulus and internal angle of friction using Barton & Bandis method by RocData software package, supporting system with steel lattice girder and shotcrete was suggested.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining and Geophysics

Stability Analysis of Shallow Tunnels Using Monitoring Techniques-Case study: Esfahan Twin Metro Tunnels

Master of Science in Mining Exploitation Engineering

Student:
Farshasb Jamshasb

Supervisors:
Dr. R. Torabi
Dr. M. Sadaghiani

Consultant:
F. Habibbeigi

June 2006