

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد
(گروه استخراج)

عنوان:

**بررسی نشست در اثر حفر تونل های دوقلو – مطالعه موردی
تونل های دوقلوی مترو اصفهان**

ارائه دهنده:

عباس اسداللهی طهرانی

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطایی

دکتر فرهنگ سرشکی

استاد مشاور:

مهندس حسین زمانی

شهریور ۱۳۸۶

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقديم

پدر و مادر م
❖

تقدیر و تشکر

ضمن سپاس خدای بی‌همتا، در ابتدا از اساتید راهنما، جناب آقای دکتر عطایی و جناب آقای دکتر سرشکی که وظیفه راهنمایی و نظارت بر مراحل تحقیق را به نحو احسن به انجام رساندند، نهایت تشکر را دارم. همچنین از استاد مشاورم جناب آقای مهندس زمانی به خاطر همکاری‌های بی‌دریغ سپاسگذارم و از مهندس میکاییل به دلیل زحماتشان در بخش تحلیل‌های نرم افزار نهایت تقدیر و تشکر را دارم. در نهایت از تمام کسانی که به نحوی مرا در انجام و به اتمام رساندن این پایان‌نامه یاری نمودند، کمال تشکر و سپاس را دارم.

تابستان ۱۳۸۶

عباس اسداللهی طهرانی

چکیده

موضوع بررسی اثرات جانبی حفر تونل‌های کم‌عمق، از ده‌ها سال پیش مورد توجه بعضی از پژوهشگران ژئوتکنیک و مهندسين تونل‌سازی قرار گرفته است. از آن تاریخ تا به امروز تحقیقات نسبتاً فراوانی در این زمینه انجام گرفته که سرمنشأ این تحقیقات را می‌توان پیامدهای ناشی از حفر تونل‌ها در مناطق شهری مانند متروهای شهری دانست. یکی از پیامدهای ناشی از حفر تونل‌های کم‌عمق، پدیده نشست است. مطالعات نشان می‌دهد که عوامل مختلفی مانند نوع و جنس زمین، عمق نسبی تونل، ابعاد تونل، شرایط و حالت‌های تنش موجود، روش حفاری تونل، نوع سیستم نگهداری و ... بر نشست سطح زمین در اثر حفر تونل‌ها اثر می‌گذارند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که پیش‌بینی و کنترل تغییر شکل‌های زمین در رابطه با تونل را می‌توان از طریق قوانین تجربی بدست آورد. علاوه بر این روش‌ها می‌توان از روش‌های عددی نیز استفاده کرد. در این تحقیق، برای پیش‌بینی نشست در سطح زمین، ناشی از حفر تونل‌های دوقلوی مترو اصفهان، از روش عددی تفاضل محدود (نرم افزار $FLAC^{2D}$) استفاده شده است. در نهایت نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج واقعی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در مقطع آبرفتی در مرحله اول و دوم حفاری، به میزان $9/4$ میلی‌متر و در مقطع سنگی 1 میلی‌متر و در مقطع سنگ و آبرفت $7/4$ میلی‌متر نشست در سطح زمین ایجاد شده است. مقایسه نتایج نرم افزار $FLAC^{2D}$ با نتایج ابزار دقیق، نشان می‌دهد که مدل‌های عددی ساخته شده در مقاطع مختلف، حداقل خطای ممکن در محاسبه نشست ناشی از حفر تونل‌های دوقلوی مترو اصفهان را دارد.

فهرست

فصل اول: مقدمه

۱-۱ کلیات	۱
۲-۱ ضرورت انجام پروژه	۳
۳-۱ هدف از پروژه	۴
۴-۱ ساختار پروژه	۴

فصل دوم: بررسی نشست در اثر حفر تونل‌ها

۱-۲ مقدمه	۶
۲-۲ مفهوم نشست	۷
۳-۲ نشست در اثر حفر تونل در مناطق کم عمق	۸
۴-۲ علل نشست زمین در اثر حفر تونل	۹
۵-۲ مکانیزم نشست در ضمن پیشروی حفر تونل	۱۱
۱-۵-۲ شرایط زمین	۱۲
۲-۵-۲ روش حفاری	۱۳
۳-۵-۲ ابعاد تونل	۱۳
۴-۵-۲ عمق تونل	۱۴
۵-۵-۲ حالت میدان تنش برجا	۱۴
۶-۲ منابع حرکات زمین	۱۵
۱-۶-۲ تغییر سطح تنش در نزدیکی سطح سینه کار	۱۵
۲-۶-۲ تنش‌های برشی در طول دیواره تونل	۱۶
۳-۶-۲ تغییر شکل شعاعی ایجاد شده در دیواره تونل	۱۶
۴-۶-۲ تراکم خاک‌های دست خورده موجود	۱۶
۵-۶-۲ تغییر شکل در سیستم نگهداری	۱۷
۶-۶-۲ تراکم زمین در اثر تراوش آب از تونل	۱۷

۷-۲ نشست و جابجایی.....	۱۸
۸-۲ فرم منحنی توزیع نشست.....	۱۹
۹-۲ روش های پیش‌بینی نشست زمین بر اثر حفر تونل.....	۲۲
۱-۹-۲ روش های تجربی برای پیش‌بینی نشست در بالای تونل.....	۲۳
۲-۹-۲ روش های تحلیلی برای پیش‌بینی نشست در بالای تونل.....	۲۴
۳-۹-۲ روش های عددی برای پیش‌بینی نشست در بالای تونل.....	۲۵
۱۰-۲ انواع مطالعات در زمینه نشست.....	۲۵
۱-۱۰-۲ مطالعات نظری.....	۲۶
۲-۱۰-۲ مطالعات بر روی مدل‌های آزمایشگاهی.....	۳۱
۳-۱۰-۲ مطالعات و اندازه‌گیری‌ها در تونل‌های واقعی.....	۳۸
۱-۳-۱۰-۲ نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌ها.....	۴۰
۴-۱۰-۲ ضرورت توجه به روش‌های سه گانه مطالعه.....	۴۲
۱۱-۲ روش پیش‌بینی نشست ناشی از حفر یک تونل.....	۴۳
۱۲-۲ خسارت ناشی از نشست.....	۴۵
۱-۱۲-۲ راه حل‌هایی برای کنترل نشست.....	۴۶
۱۳-۲ نشست در اثر حفر تونل‌های دوقلو.....	۴۶
۱۴-۲ پیش‌بینی نشست در اثر حفر تونل‌های دوقلو.....	۴۷

فصل سوم: زمین شناسی منطقه

۱-۳ مقدمه.....	۶۶
۲-۳ زمین شناسی عمومی.....	۶۸
۱-۲-۳ سنگ بستر.....	۶۸
۲-۲-۳ رسوبات آبرفتی.....	۷۰
۱-۳-۲-۳ خاک‌های دستی.....	۷۱
۳-۳ زمین شناسی ساختمانی.....	۷۲
۱-۳-۳ گسل‌ها.....	۷۲
۲-۳-۳ درزه‌ها و لایه بندی.....	۷۴

۳-۳-۳ چین خوردگی.....	۷۴
۴-۳ زمین شناسی مهندسی.....	۷۵
۱-۴-۳ لیتولوژی کلی توده سنگ.....	۷۵
۲-۴-۳ ویژگی های زمین شناسی مهندسی واحد شیلی (حد فاصل آزادی - شریعتی).....	۷۵
۵-۳ هیدروژئولوژی.....	۷۶
۱-۵-۳ هیدرولوژی محدوده مطالعاتی.....	۷۷
۲-۵-۳ آبخوان آبرفتی.....	۷۸
۳-۵-۳ آبخوان شیلی - ماسه سنگی.....	۷۹
۵-۳ روش حفاری.....	۷۹

فصل چهارم: پیش بینی نشست در اثر حفر تونل های دوقلوی مترو اصفهان

۱-۴ مقدمه.....	۸۱
۲-۴ روش های پیش بینی نشست در اثر حفر تونل های دو قلوی متروی اصفهان.....	۸۳
۱-۲-۴ روش های عددی.....	۸۳
۱-۱-۲-۴ انتخاب محدوده مناسبی از توده سنگ اطراف تونل.....	۸۷
۲-۱-۲-۴ انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن.....	۸۸
۳-۱-۲-۴ میزان فشار وارد به تونل ها ناشی از بار خیابان.....	۸۹
۴-۱-۲-۴ نسبت تنش افقی به عمودی (K).....	۸۹
۲-۲-۴ روش های تجربی.....	۹۰
۳-۲-۴ روش رفتارنگاری و ابزار دقیق.....	۹۱
۳-۴ پیش بینی نشست در اثر حفر تونل های دوقلوی متروی اصفهان.....	۹۲
۱-۳-۴ پیش بینی نشست در مقطعی که تونل ها کاملاً در آبرفت حفر شود.....	۹۲
۱-۱-۳-۴ پیش بینی نشست با استفاده از مدلسازی عددی.....	۹۳
۲-۱-۳-۴ تعیین منحنی نشست در سطح زمین با استفاده از روابط تجربی در مقطع آبرفت.....	۱۰۷
۳-۱-۳-۴ تفسیر نتایج در مقطع آبرفت.....	۱۰۹
۲-۳-۴ پیش بینی نشست در مقطعی که تونل ها کاملاً در سنگ حفر شود.....	۱۰۹

۱-۲-۳-۴ پیش‌بینی نشست با استفاده از مدلسازی عددی.....	۱۱۰
۲-۲-۳-۴ تعیین منحنی نشست در سطح زمین توسط روابط تجربی در مقطع سنگی.....	۱۱۸
۳-۲-۳-۴ تفسیر نتایج در مقطع سنگی.....	۱۲۰
۳-۳-۴ پیش‌بینی نشست در مقطعی که تونل‌ها کاملاً در سنگ و آبرفت حفر شود.....	۱۲۱
۱-۳-۳-۴ پیش‌بینی نشست با استفاده از مدلسازی عددی.....	۱۲۱
۲-۳-۳-۴ تعیین منحنی نشست در سطح زمین توسط روابط تجربی در مقطع سنگ و آبرفت.....	۱۳۰
۳-۳-۳-۴ تفسیر نتایج در مقطع سنگ و آبرفت.....	۱۳۱
۴-۴ ارزیابی نتایج در مقاطع مختلف.....	۱۳۲

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۵ مقدمه.....	۱۳۳
۱-۱-۵ نتیجه‌گیری.....	۱۳۳
۲-۱-۵ پیشنهادات.....	۱۳۵
فهرست منابع.....	۱۳۶

فهرست اشکال

شکل ۱-۲- حالت تیپیک جابجایی ذرات در بالا و دیواره‌های تونل.....	۱۱
شکل ۲-۲- مناطق تحت کشش و فشردگی در نیم‌رخ نشست.....	۱۸
شکل ۳-۲- منحنی‌های جابجایی، نشست و تغییر شکل نسبی.....	۱۹
شکل ۴-۲- منحنی توزیع عرضی نشست بر اساس قانون منحنی توزیع آماری نرمال.....	۲۰
شکل ۵-۲- وضعیت تنش‌ها و ابعاد نسبی مقطع یک تونل.....	۲۹
شکل ۶-۲- شرایط مرزی و ابعاد تونل مدل را در حالت تیپیک.....	۳۲
شکل ۷-۲- ارتباط عمق نسبی تونل و تغییر شکل‌های مشاهده شده در نزدیکی تونل.....	۳۵
شکل ۸-۲- موقعیت تونل‌ها با آرایش افقی.....	۴۸
شکل ۹-۲- میزان نشست برای حالت‌های مختلف آرایش افقی.....	۴۸
شکل ۱۰-۲- میزان گشتاور خمشی در پوشش تونل برای حالت‌های مختلف افقی.....	۴۹
شکل ۱۱-۲- میزان فشار محوری برای حالت‌های مختلف افقی.....	۴۹
شکل ۱۲-۲- موقعیت تونل‌ها با آرایش قائم.....	۵۰
شکل ۱۳-۲- میزان نشست در سطح زمین برای حالت‌های قائم.....	۵۰
شکل ۱۴-۲- میزان گشتاور خمشی در پوشش تونل پایینی برای حالت‌های مختلف قائم.....	۵۱
شکل ۱۵-۲- میزان فشار محوری در تونل پایینی برای حالت‌های مختلف قائم.....	۵۱
شکل ۱۶-۲- موقعیت تونل‌ها با آرایش شیب‌دار.....	۵۲
شکل ۱۷-۲- میزان نشست در سطح زمین برای حالت‌های شیب‌دار.....	۵۲
شکل ۱۸-۲- میزان گشتاور خمشی در پوشش تونل بالایی برای حالت‌های مختلف شیب دار.....	۵۳
شکل ۱۹-۲- میزان فشار محوری در پوشش تونل بالایی برای حالت‌های مختلف شیب دار.....	۵۳
شکل ۲۰-۲- توزیع پلاستیسیته برای حالت مرجع ($\alpha = 45$).....	۵۴
شکل ۲۱-۲- توزیع پلاستیسیته برای حالت معکوس ($\alpha = -45$).....	۵۴
شکل ۲۲-۲- منحنی نشست عرضی در حالت‌های مختلف حفاری چند مرحله‌ای.....	۵۵
شکل ۲۳-۲- میزان نشست در سطح زمین برای تونل‌های چند تایی با فاصله متفاوت.....	۵۶
شکل ۲۴-۲- ارتباط بین ماکزیمم نشست و فاصله تونل‌های چند تایی.....	۵۷
شکل ۲۵-۲- مقطع عرضی تونل.....	۵۹

- شکل ۲-۲۶ مشاهده نمای سه بعدی مدل و پلان های مدل ۵۹
- شکل ۲-۲۷ بردارهای جابجایی اطراف تونل ها برای حالتی که $L_T = 0$ در مقاطع مختلف ۶۱
- شکل ۲-۲۸ بردارهای جابجایی اطراف تونل ها برای حالتی که $L_T = 3.5D$ در مقاطع مختلف ۶۲
- شکل ۲-۲۹ تغییر شکل اطراف تونل ها برای حالتی که $L_T = 0$ و $L_T = 3.5D$ ۶۳
- شکل ۲-۳۰ پروفیل نشست در حالت $L_T = 3.5D$ در مقاطع مختلف طولی ۶۴
- شکل ۲-۳۱ میزان نشست در حالت $L_T = 3.5D$ در مقاطع مختلف عرضی ۶۵
- شکل ۲-۳۲ میزان ماکزیمم نشست در L_T های متفاوت ۶۵
- شکل ۳-۱ مسیر خط شمال به جنوب اصفهان و ایستگاه های مربوطه ۶۷
- شکل ۳-۲ وضعیت قرارگیری گسل ها و روند آن ها بر روی نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ اصفهان ۷۳
- شکل ۴-۱ مشخصات هندسی به همراه مراحل مختلف حفاری برای یک تونل ۸۲
- شکل ۴-۲ مشخصات هندسی به همراه مراحل مختلف حفاری برای دو تونل ۸۳
- شکل ۴-۳ روند کلی شبیه سازی در $FLAC^{2D}$ ۸۴
- شکل ۴-۴ ابعاد مدل ایجاد شده در نرم افزار برای حالت آبرفت ۸۷
- شکل ۴-۵ کنتورهای جابجایی عمودی قبل از حفاری تونل ۹۳
- شکل ۴-۶ کنتورهای تنش عمودی قبل از حفاری تونل ۹۴
- شکل ۴-۷ منحنی مشخصه زمین برای مقطع آبرفت ۹۵
- شکل ۴-۸ تغییرات نرخ ناهمجواری بر حسب فاصله از جبهه کار ۹۶
- شکل ۴-۹ تعیین میزان ترخیص تنش از روی نمودار GRC برای مقطع آبرفتی ۹۷
- شکل ۴-۱۰ همگرایی در بخش نخست حفاری برای مقطع آبرفتی ۹۸
- شکل ۴-۱۱ کرنش برشی در اطراف تونل برای مقطع آبرفتی ۹۹
- شکل ۴-۱۲ میزان جابجایی های قائم در بالای تونل اول ۱۰۱
- شکل ۴-۱۳ میزان جابجایی های قائم در مرحله دوم حفاری ۱۰۲
- شکل ۴-۱۴ میزان جابجایی های قائم در مرحله سوم حفاری ۱۰۲
- شکل ۴-۱۵ میزان جابجایی های قائم در مرحله چهارم حفاری ۱۰۳
- شکل ۴-۱۶ کنتورهای تنش عمودی در مرحله اول حفاری ۱۰۳
- شکل ۴-۱۷ کنتورهای تنش عمودی در مرحله دوم حفاری ۱۰۴

شکل ۴-۱۸- کنتورهای تنش عمودی در مرحله سوم حفاری.....	۱۰۴
شکل ۴-۱۹- کنتورهای تنش عمودی در مرحله چهارم حفاری.....	۱۰۵
شکل ۴-۲۰- میزان نشست در سطح زمین بعد از مرحله دوم حفاری در مقطع آبرفت.....	۱۰۵
شکل ۴-۲۱- میزان نشست در سطح زمین بعد از مرحله چهارم حفاری در مقطع آبرفت.....	۱۰۶
شکل ۴-۲۲- نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در مقطع آبرفت.....	۱۰۷
شکل ۴-۲۳- میزان نشست در تونل دوم با استفاده از رابطه Peck.....	۱۰۸
شکل ۴-۲۴- میزان نشست در تونل اول با استفاده از رابطه Peck.....	۱۰۸
شکل ۴-۲۵- میزان نشست در منحنی مجموع.....	۱۰۸
شکل ۴-۲۶- منحنی مشخصه زمین برای مقطع سنگ.....	۱۱۱
شکل ۴-۲۷- همگرایی در بخش نخست حفاری برای مقطع سنگ.....	۱۱۱
شکل ۴-۲۸- حداکثر میزان جابجایی‌های قائم در طاق تونل اول.....	۱۱۲
شکل ۴-۲۹- میزان جابجایی‌های قائم در طاق تونل اول.....	۱۱۳
شکل ۴-۳۰- میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفر طاق تونل دوم.....	۱۱۳
شکل ۴-۳۱- میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفاری مرحله چهارم.....	۱۱۴
شکل ۴-۳۲- کنتورهای تنش عمودی در مرحله اول حفاری.....	۱۱۴
شکل ۴-۳۳- کنتورهای تنش عمودی در مرحله دوم حفاری.....	۱۱۵
شکل ۴-۳۴- کنتورهای تنش عمودی در مرحله سوم حفاری.....	۱۱۵
شکل ۴-۳۵- کنتورهای تنش عمودی در مرحله چهارم حفاری.....	۱۱۶
شکل ۴-۳۶- میزان نشست در سطح زمین بعد از مرحله دوم حفاری در مقطع سنگ.....	۱۱۶
شکل ۴-۳۷- میزان نشست در سطح زمین بعد از مرحله چهارم حفاری در مقطع سنگ.....	۱۱۷
شکل ۴-۳۸- نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در ماه‌های شهریور و مهر.....	۱۱۸
شکل ۴-۳۹- نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در ماه‌های مهر و آبان.....	۱۱۸
شکل ۴-۴۰- میزان نشست در تونل اول با استفاده از رابطه Peck در مقطع سنگ.....	۱۱۹
شکل ۴-۴۱- میزان نشست در تونل دوم با استفاده از رابطه Peck در مقطع سنگ.....	۱۱۹
شکل ۴-۴۲- میزان نشست در منحنی مجموع در مقطع سنگ.....	۱۱۹
شکل ۴-۴۳- میزان نشست در منحنی مجموع در مقطع سنگ ($S_{max} = 3 \text{ mm}$).....	۱۲۰

شکل ۴-۴۴ مدل سنگ و آبرفت.....	۱۲۲
شکل ۴-۴۵- منحنی مشخصه زمین برای مقطع سنگ.....	۱۲۲
شکل ۴-۴۶- همگرایی در بخش نخست حفاری برای مقطع سنگ.....	۱۲۳
شکل ۴-۴۷ میزان جابجایی قائم حداکثر را در تاج تونل اول.....	۱۲۳
شکل ۴-۴۸ میزان جابجایی‌های قائم در اثر حفر مرحله اول حفاری.....	۱۲۴
شکل ۴-۴۹ میزان جابجایی‌های قائم در اثر حفر مرحله دوم حفاری.....	۱۲۵
شکل ۴-۵۰ میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفاری مرحله سوم.....	۱۲۵
شکل ۴-۵۱ میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفاری مرحله چهارم.....	۱۲۶
شکل ۴-۵۲- کنتورهای تنش عمودی در مرحله اول حفاری.....	۱۲۶
شکل ۴-۵۳- کنتورهای تنش عمودی در مرحله دوم حفاری.....	۱۲۷
شکل ۴-۵۴- کنتورهای تنش عمودی در مرحله سوم حفاری.....	۱۲۷
شکل ۴-۵۵- کنتورهای تنش عمودی در مرحله چهارم حفاری.....	۱۲۸
شکل ۴-۵۶ میزان نشست در سطح زمین بعد از مرحله دوم حفاری در مقطع سنگ و آبرفت.....	۱۲۸
شکل ۴-۵۷ میزان نشست در سطح زمین بعد از مرحله چهارم حفاری در مقطع سنگ و آبرفت.....	۱۲۹
شکل ۴-۵۸ نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در ماه‌های شهریور و مهر.....	۱۲۹
شکل ۴-۵۹ نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در ماه‌های مهر و آبان.....	۱۳۰
شکل ۴-۶۰ میزان نشست در تونل اول با استفاده از رابطه Peck در مقطع سنگ و آبرفت.....	۱۳۱
شکل ۴-۶۱ میزان نشست در تونل دوم با استفاده از رابطه Peck در مقطع سنگ و آبرفت.....	۱۳۱
شکل ۴-۶۲ میزان نشست در منحنی مجموع در مقطع سنگ و آبرفت.....	۱۳۱

فهرست جداول

جدول ۱-۲ روابط تجربی برای محاسبه پارامتر i	۲۱
جدول ۱-۳ جمع بندی پارامترهای ژئوتکنیکی برای محاسبات بخش سنگی	۷۰
جدول ۲-۳ پارامترهای ژئوتکنیکی خاک دستی در محدوده طرح	۷۲
جدول ۳-۳ پارامترهای ژئوتکنیکی خاک آبرفت در محدوده طرح	۷۲
جدول ۱-۴ مشخصات سیستم نگهداری اولیه در مراحل مختلف حفاری در مقطع آبرفت	۱۰۰
جدول ۲-۴ مقدار i با استفاده از فرمولهای تجربی در مقطع آبرفت	۱۰۷
جدول ۳-۴ نتایج مدلسازی برای مراحل سوم و چهارم در مقطع آبرفت	۱۰۹
جدول ۴-۴ مشخصات سیستم نگهداری اولیه در مراحل مختلف حفاری در مقطع سنگ	۱۱۰
جدول ۵-۴ نتایج مدلسازی برای مراحل سوم و چهارم در مقطع سنگ	۱۲۱
جدول ۶-۴ نتایج مدلسازی برای مراحل سوم و چهارم در مقطع سنگ و آبرفت	۱۳۲

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ کلیات

از اوایل قرن نوزدهم با توجه به سیر صعودی افزایش جمعیت کره زمین و تراکم جمعیت در شهرها از یک سو و پیشرفت تکنولوژی در تمامی زمینه‌های علمی و بالا رفتن سطح استاندارد زندگی از سوی دیگر، لزوم تحول و گسترش امکانات برای تأمین نیازهای عمومی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. در این زمینه تأمین و توزیع آب قابل شرب از طریق احداث سدها و انتقال آب به وسیله تونل‌های آبرسانی، جمع‌آوری فاضلاب ساختمان‌ها، احداث متروهای زیرزمینی به منظور رفت و آمد سریع شهری و حفر تونل‌ها برای توسعه راه‌های بین شهری جهت تسریع در توزیع و حمل کالا از مراکز تولید به مصرف از الویت خاصی برخوردار گردید. اهمیت اجرای پروژه‌هایی از این قبیل باعث شد که در اکثر قریب به اتفاق کشورها فن تونل‌سازی مورد توجه روز افزون قرار گیرد (شریعتمداری، فرزانه، ۱۳۸۰). مراجعه به گزارش‌های موجود مربوط به تونل‌های کم‌عمق در سراسر دنیا نشان می‌دهد که با چه اهمیت و دقتی به بررسی اثرات احتمالی حفر این تونل‌ها بر سطح زمین پرداخته شده است. بدیهی است، بی‌توجهی به این موضوع ممکن است موجب ایجاد زیان‌های جبران‌ناپذیری به پی ساختمان‌ها و تأسیسات واقع بر سطح زمین گردد.

مسئله نشست زمین در اثر حفر تونل تابع عوامل و شرایط اجرایی، در ضمن حفر و پس از آن می‌باشد. به طور خلاصه روش حفاری اعم از دستی یا با استفاده از دستگاه‌های حفاری، وجود آب زیرزمینی، وجود یا عدم وجود هوای فشرده در ضمن کار، کاربرد سپر در زمین‌های خاکی، زمان‌بندی مراحل حفاری، نوع نگهداری اولیه و نهائی، ابعاد و شکل مقطع تونل و در مواردی اجرای تزریق و عوامل دیگر در کنترل نشست سطح زمین نقش دارند که انتخاب بهترین ترکیب از این عوامل می‌تواند اجرای پروژه را با کمترین آسیب و با موفقیت به پایان برساند. مسئله نشست در سطح زمین، هر چند به کرات مشاهده شده است ولی به علت این که خطرات جانی زیادی به بار نمی‌آورد، زیاد مورد توجه قرار نمی‌گیرد. یعنی بر خلاف سایر پدیده‌های طبیعی از جمله زلزله، فوران آتشفشان و غیره که در مدت زمان کوتاهی خسارت‌های زیادی حاصل می‌شود. نشست یک پدیده طولانی مدت و نسبتاً کند است. خطر نشست در مناطقی که گسیختگی در زیر زمین به صورت بالقوه وجود دارد مسأله مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد. موضوع بررسی اثرات جانبی حفر تونل‌ها، از سال‌ها پیش مورد توجه مهندسين تونل‌سازی قرار گرفته است. از آن تاریخ تا به امروز تحقیقات نسبتاً فراوانی در این زمینه انجام گرفته که سرمنشأ این تحقیقات را می‌توان پیامدهای ناشی از حفر تونل‌ها در مناطق شهری مانند متروها و فاضلاب‌های شهری دانست. یکی از پیامدهای ناشی از حفر تونل‌های کم‌عمق، پدیده نشست است. مطالعات نشان می‌دهد که، عوامل مختلفی مانند عمق تونل، جنس زمین به لحاظ دانه‌بندی و تراکم، مشخصات مقاومتی (C, ϕ)، میزان رطوبت و ... بر نشست سطح زمین در اثر حفر تونل‌ها اثر می‌گذارند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که پیش‌بینی و کنترل تغییر شکل‌های زمین در رابطه با تونل را می‌توان، از طریق

قوانین تجربی بدست آورد. علاوه بر روش‌های تجربی می‌توان از روش‌های عددی برای محاسبه میزان نشست در اثر حفر تونل‌ها استفاده کرد. برای توسعه و پیشرفت شهرهای بزرگ ما نیازمندیم که، برای ارائه تسهیلات و حمل و نقل بهتر از فضاهای زیرزمینی استفاده کنیم. در بعضی شهرها، شرایط ژئوتکنیکی و شرایط زیرزمینی ما را به ساختن یک تونل جدید در نزدیکی تونل اول مجبور می‌کند. در نتیجه استفاده از تونل‌های دوقلو^۱ راه حل بسیار مناسبی می‌باشد. استفاده از این تونل‌ها باعث کاهش قطر تونل و در نتیجه کاهش جابجایی‌های زمین می‌شود.

۱-۲ ضرورت انجام پروژه

حفر تونل در خاک موجب تحول میدان تنش و تغییر شکل در اطراف آن می‌شود. تغییر شکل‌های زمین نزدیک به تونل به طرف سطح زمین گسترش یافته و به صورت فرورفتگی در سطح اصطلاحاً با گودی نشست ظاهر می‌شود. لذا ممکن است خسارت‌هایی به سازه‌ها و تاسیسات سطح زمین وارد کند. به همین دلیل افزایش مطالعات و پژوهش‌ها در زمینه شناخت رفتار خاک قبل از اجرا، حین اجرا و پس از اجرای تونل‌ها، پیش‌بینی نشست زمین خصوصاً در مناطق مسکونی و نیز میزان همگرایی و تغییر شکل‌های مقطع تونل که بر چگونگی طراحی اثر قابل توجهی دارد، ضروری است. تا کنون مطالعات مختلفی به منظور پیش‌بینی نشست در اثر حفر تونل‌های کم عمق انجام شده است اما در زمینه پیش‌بینی نشست ناشی از حفر تونل‌های دوقلو مطالعات چندانی انجام نشده است. لذا پیش‌بینی نشست در اثر حفر این تونل‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه سعی

^۱ Twin tunnels

فصل چهارم به بررسی پیش بینی نشست در اثر حفر تونل‌های دوقلوی مترو اصفهان توسط روش عددی تفاضل محدود، روش‌های تجربی تعیین نشست و مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج واقعی پرداخته شده است.

فصل پنجم شامل نتیجه گیری و پیشنهادات پروژه می‌باشد.

فصل دوم:

بررسی نشست در اثر حفر تونل‌ها

۱-۲ مقدمه

در اثر حفر تونل در نقاط کم‌عمق در زمین‌های سنگی یا غیر سنگی، مخصوصاً در رسوبات آبرفتی سست، جابجائی‌هایی در محیط ایجاد شده و تغییر شکل‌هایی پدید می‌آید، این جابجایی‌ها را می‌توان به دو مؤلفه قائم و افقی تجزیه کرد. خساراتی که از حرکات سطح زمین پدید می‌آید، قسمتی از آن به علت مؤلفه قائم و قسمتی از آن ناشی از مؤلفه افقی جابجایی‌ها در سطح زمین می‌باشد. مؤلفه قائم سبب پائین آمدن سطح زمین، یعنی نشست^۱ تدریجی و مؤلفه افقی سبب حالت کششی یا فشاری در سطح زمین می‌شود، این مؤلفه‌ها می‌توانند تنش‌های جدیدی را بر سازه‌های واقع بر سطح زمین وارد کنند. در صورتی که حفر تونل در مناطق شهری انجام شود و نشست سطح زمین در اثر آن‌ها قابل ملاحظه باشد، از آن‌جا که شرایط درون زمین بسیار متغیر است و برخلاف سطح زمین، امکان شناسایی و دسترسی به تمام نقاط آن به آسانی میسر نیست، طراح باید قبل از شروع عملیات حفر تونل، کلیه پدیده‌هایی که احتمال وقوع آن می‌رود، و راه حل آن‌ها را پیش‌بینی کند. مهندسان برای کاهش دادن هزینه‌های پروژه و خطر ایجاد آسیب و حادثه

^۱ Settlement

در ساختمان تونل باید بتوانند پیش‌بینی‌های درستی از میزان نشست ساختمان در شرایط گوناگون تونل‌زنی داشته باشند (سعیدی کاخکی، ۱۳۷۸).

۲-۲ مفهوم نشست

به طور کلی کلمه نشست در اصطلاح مهندسی سنگ عبارت است از حرکت نقاط مختلف سطح زمین در راستای قائم در اثر عوامل مختلف می‌باشد. پدیده‌هایی از جمله فرورفتن ساختمان‌های سطحی و خرابی‌هایی که در سطح زمین اغلب مشاهده می‌شود به علت پدیده نشست هستند. هر چند پدیده نشست اغلب برای حرکات نقاط مختلف سطح زمین در جهت قائم کاربرد دارد با این حال هنگامی که در یک منطقه به علت‌های مختلف پدیده نشست رخ می‌دهد حرکات افقی هم قابل مشاهده هستند. یعنی بعضی از نقاط سطح زمین تحت کشش و بعضی نقاط تحت فشار قرار می‌گیرند (Whittaker & Reddish, 1989).

معمولاً حرکت قائم قسمت‌های مرکزی منطقه تحت تاثیر نیروی ثقل را به نام نشست و حرکت افقی نقاط واقع در حاشیه محل، جابجایی گفته می‌شود. به طور کلی حرکات (نشست و جابجایی) و اختلاف آنها باعث تخریبات در سطح زمین خواهد شد. لذا نشست و جابجایی توأم با هم در نظر گرفته می‌شود مثلاً در ساختمانی، اختلاف نشست و اختلاف جابجایی باعث تخریب می‌شود. در مناطق زراعی نیز نشست عامل تخریب می‌باشد (عطایی، ۱۳۸۴).

همان طور که ملاحظه می‌شود عوامل مؤثر بر نشست متنوع می‌باشند. پس در هنگام بررسی و مطالعه طرح‌ها باید هوشیار بود. در مورد نشست‌های نامساوی باید گوشزد کرد که حتی در زمین‌های به اصطلاح همگن نشست‌های واقعی ممکن است بین ۲۵ تا ۵۰ درصد با نشست‌های

پیش‌بینی شده، تفاوت داشته باشند، دلیل این امر ناهمگنی زمین‌های طبیعی می‌باشد. از این‌رو توجه به مسئله نشست احتمالی زمین در زمان احداث تونل‌های نزدیک به سطح زمین و یا وقتی که در اعماق بیشتر شبکه وسیعی از تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی حفر می‌شود (مثل معادن)، از اهمیت فنی خاصی برخوردار است (شریعتمداری، ۱۳۸۰).

۲-۳ نشست در اثر حفر تونل در مناطق کم عمق

امروزه موضوع تونل‌زنی هم در محیط سنگی و هم در محیط خاکی مطرح می‌باشد. هر چند ممکن است تونل‌های در محیط سنگی در مناطق کم عمق نیز حفر شوند، ولی غالباً این تونل‌ها در اعماق زمین حفر می‌شوند. در صورتی که محیط سنگی در مناطق کم عمق، فاقد ناپیوستگی باشد و روش حفر تونل در این محیط‌ها ناپیوستگی‌های حادی را به وجود نیاورد، به علت سرباره کمی که بالای این تونل‌ها وجود دارد، تونل از لحاظ پایداری مشکلی نخواهد داشت و در چنین تونل‌هایی مسئله نشست زیاد قابل توجه نیست، زیرا در سطح بالای این تونل‌ها یا اصلاً نشست اتفاق نمی‌افتد و یا اگر هم بیافتد، مقدار آن بسیار کم می‌باشد. اگر محیط سنگی در مناطق کم عمق دارای ناپیوستگی‌های شدید و یا سنگ سست باشد، این حالت را می‌توان مانند محیط آبرفتی سفت و سخت شده با ناپیوستگی‌هایی در داخل آن در نظر گرفت.

به هر حال در حالت کلی، تونل‌های حفر شده در مناطق کم عمق عمدتاً در محیط‌های آبرفتی و خاکی احداث می‌شوند و در این زمین‌ها مسئله اصلی حفاظت دیواره‌ها و سقف تونل است، در عین حال حفاری در این محیط‌ها راحت‌تر از محیط سنگی می‌باشد. حرکات سطحی بر اثر حفر تونل‌های کم عمق و به خصوص در مناطق شهری و مسکونی تفاوت زیادی با بروز این پدیده در

تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی عمیق از قبیل معادن دارد. این تفاوت‌ها نه تنها به خاطر اختلاف در عمق و وجود لایه‌های مختلف زمین‌شناسی، بلکه به خاطر حساسیت نسبت به میزان نشست و اثرات احتمالی بر سازه‌های دیگر قابل توجه و بررسی است. احداث تونل در یک منطقه کم عمق و سست، باعث تغییرات تنش و حرکات موضعی در توده‌های مجاور می‌شود. این حرکات مستقیماً به سمت سینه کار و نیز به صورت شعاعی به طرف داخل حفره ایجاد شده در پشت جبهه کار صورت می‌گیرد. تعیین میزان دقیق این حرکت به سادگی امکان‌پذیر نیست، اگرچه تخمین این مقدار و اثرات احتمالی آن بر ساختمان‌ها، در عمق معین و با سرعت پیشرفت مشخص از اهمیت به سزایی برخوردار است. در مواردی که احداث تونل در زیر سطح آب زیرزمینی صورت گیرد حرکت مصالح و ریزش آن همراه با جریان آب به داخل تونل، حادثه ساز خواهد بود. در این شرایط لازم است با حفر شبکه‌ی چاه‌های قائم و افقی، سطح آب پایین انداخته شود و یا این که با استفاده از روش‌های دیگر از قبیل انجماد مصنوعی آب و یا هوای فشرده از حجم آب به داخل محدوده حفاری جلوگیری شود (Kim & et al, 2001).

۲-۴ علل نشست زمین در اثر حفر تونل

اصولاً حفاری‌های زیرزمینی به علت ایجاد ناپیوستگی در محیط اطراف، باعث پدیده‌هایی از قبیل نشست، سست شدگی و افزایش تنش در یک محدوده معین می‌شوند. در نتیجه این پدیده‌ها، تغییر شکل در خاک به وجود می‌آید که میزان آن بستگی به مقاومت خاک، ضخامت پوشش و میزان دست‌خوردگی و ناهمگونی ایجاد شده در خاک در اثر عملیات اجرایی دارد. بدون شک در شرایط یکسان از نظر خصوصیات خاک و ابعاد و عمق تونل، نشست سطحی و محدوده سست

شدگی خاک، مستقیماً وابسته به مهارت عوامل اجرایی، دقت در به کارگیری روش‌های اجرایی، پایداری و مقاومت نگهدارنده موقت و پوشش دائمی و به حداقل رساندن عوامل محرک و ایجاد لرزش است. به طور کلی علل پدیدار شدن نشست سطح زمین در اثر حفر تونل را باید در ارتباط با پدیده‌های زیر دانست (شریعتمداری، فرزانه، ۱۳۸۰):

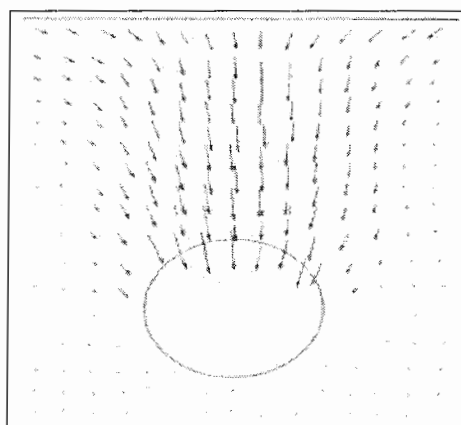
- ایجاد مرزهای جدید در حوزه تنش‌های درون خاک، در این صورت برای تعادل تنش‌های جدید، تغییر شکل‌هایی پدید می‌آید.
- نشست طبیعی رسوبات جوان
- شکل‌گیری و آرایش مجدد خاک در اثر حفر تونل که باعث بروز سیکل جدید تحکیم می‌شود. این پدیده به علت تمرکز تنش‌های قائم در دیواره‌های طرفین تونل اتفاق می‌افتد.
- پائین رفتن سطح آب زیرزمینی، این مسئله از یک طرف باعث کاهش فشار و از طرف دیگر با جایگزینی و حرکت ذرات بسیار ریز خاک، باعث نشست در اثر تحکیم طبیعی خاک می‌شود.
- حرکت زمین به سمت جبهه کار و دیواره‌های حفاری شده تونل
- عملکرد تونل به صورت زهکش آب‌های موجود در زمین
- تزریق ناقص در توده خاک اطراف تونل در حین عملیات ساختمانی
- تغییر شکل و انعطاف پذیری پوشش تونل

علاوه بر موارد فوق، عوامل ثانویه در نشست زمین دخیل هستند که می‌توان آن‌ها را به صورت زیر در نظر گرفت:

- اثرات تراکم دینامیکی ناشی از سربار ترافیک روی لایه‌های سست شده زمین
- بالا و پائین رفتن متناوب سطح آب زیرزمینی
- آزاد شدن و خروج هوای فشرده از محوطه کارگاه، در مواردی که از این روش برای پایداری دیواره‌ها و سینه کار و جلوگیری از ورود آب استفاده شود.

۵-۲ مکانیزم نشست در ضمن پیشروی حفر تونل

مهم‌ترین موضوعی که در زمینه پدیده نشست مد نظر است، بررسی اثر حفر تونل بر روی تغییر شکل‌های جزئی زمین می‌باشد، که این تغییر شکل هم در سطح زمین و هم در اطراف تونل پیش می‌آید. شکل ۱-۲ حالت تیپیک جابجایی ذرات در بالا و دیواره‌های تونل، پس از آن که تونل از نقطه مورد نظر عبور کرده را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- حالت تیپیک جابجایی ذرات در بالا و دیواره‌های تونل (O'Reilly & New, 1982)

در ضمن پیشروی حفر تونل، نشست نقاط مختلف سطح زمین از مقدار کم به مقدار نهایی ثابت آن، افزایش می‌یابد. عوامل موثر بر پایداری جبهه کار تونل مشتمل بر خصوصیات مکانیکی، فیزیکی، هیدروژئولوژیکی خاک، ژئومتری سازه و روش حفاری می‌باشد (O'Reilly & New, 1982). مقدار نشست ایجاد شده در اثر احداث تونل‌های کم عمق، به چند عامل اساسی وابسته است. مهمترین این عوامل عبارتند از (منصوری بروجنی، ۱۳۸۱):

- نوع و جنس زمین
- روش حفاری تونل، مراحل حفاری تونل، نوع سیستم نگهداری
- ابعاد تونل حفاری شده
- عمقی که در آن تونل احداث شده است
- شرایط و حالت‌های تنش موجود در محل

۲-۵-۱ شرایط زمین

بیشتر تونل‌های کم عمق، در زمین‌های نرم احداث می‌شوند که حین اجرای حفاری تونل، نیاز به سیستم نگهداری موقت ویژه می‌باشد. خصوصیت عمومی این زمین‌ها این است که اگر از سیستم حائل موقت مناسبی استفاده نشود، در سقف تونل ریزش صورت خواهد گرفت. حتی در بعضی موارد با وجود یک طراحی مناسب سیستم حائل موقت، هجوم مقادیر زیاد آب به داخل حفره سبب مشکلات و وقوع نشست در سطح زمین می‌شود. تحقیقات نشان داده که حفاری تونل در زمین‌های نرم در مقایسه با حفاری تونل در زمین‌های سنگی مستلزم توجه بیشتری است.

۲-۵-۲ روش حفاری

به طور کلی در اجرای حفاری تونل از هر روشی که استفاده شود همیشه بین مرحله حفاری و نصب سیستم نگهداری تونل مدت زمانی تأخیر وجود دارد. البته اگر از سپرها برای حفاری تونل استفاده شود، چون همزمان با عملیات حفاری تونل، سیستم نگهداری تونل نصب می‌شود لذا این زمان تأخیر خیلی کم می‌شود. صرف نظر از این که حفاری تونل چقدر خوب و دقیق برنامه ریزی و اجرا شود، احتمال بسیار زیادی وجود دارد که حین اجرای عملیات حفاری، خود عملیات حفاری به زمین مدت زمانی فرصت برای ایجاد نشست بدهد هر چند سایر پارامترها مناسب باشند. به هر حال، در شرایط حساس مقدار نشست ایجاد شده حین عملیات حفاری معمولاً کم اهمیت می‌باشد. در مواردی که حفاری تونل در زمین نرم است و ریزش قابل توجهی در سقف تونل صورت می‌گیرد، گسترش خرابی در سنگ‌های بالای تونل تا سطح زمین ممکن است سبب ایجاد نشست قابل توجهی در سطح زمین شود.

۲-۵-۳ ابعاد تونل

یکی از مهمترین عوامل مؤثر در ایجاد و وقوع نشست در سطح زمین در یک پروژه حفر تونل زیر سطحی، ابعاد تونل مورد نظر است. هر چه عرض تونل حفاری شده بیشتر باشد، زمان خود ایستایی تونل کوتاه‌تر خواهد بود. با افزایش ابعاد تونل میزان همگرایی سنگ‌های اطراف تونل به داخل آن بیشتر خواهد بود و کنترل این همگرایی مشکل‌تر خواهد شد. در حین اجرای عملیات حفاری تأثیر سیستم نگهداری موقت در جلوگیری از ریزش سنگ‌های اطراف تونل به داخل آن با افزایش ابعاد تونل کاهش می‌یابد و به سیستم نگهداری موقت قوی‌تری نیازمند است.

۲-۵-۴ عمق تونل

از عوامل مؤثر در وقوع نشست در سطح زمین حین حفاری یک تونل، عمقی است که تونل در آن عمق احداث می‌شود. بدیهی است که اگر تونل در عمق زیادی حفر شده باشد گسترش خرابی در سنگ‌های بالای تونل قبل از رسیدن به سطح زمین متوقف می‌شود لذا نشست در سطح زمین مشاهده نمی‌شود. حداقل عمقی که اگر تونل در اعماق بیشتری از آن حفر شود، هیچ مقدار نشست در سطح زمین مشاهده نمی‌شود به ابعاد تونل بستگی دارد. به طوری که هرچه ابعاد تونل بیشتر باشد این حداقل عمق کمتر خواهد بود.

۲-۵-۵ حالت میدان تنش برجا

از پارامترهایی که می‌تواند در انجام وقوع نشست پس از حفر تونل در محل مؤثر باشد، حالت تنش بر جای موجود در محل است. در بحث نشست از بین مؤلفه‌های تنش برجا، غالباً مؤلفه تنش قائم از اهمیت بالایی برخوردار است. در بیشتر موارد، حالت تنش بر جای موجود در محل، عمدتاً به مقدار بار روباره تونل و شرایط آب زیرزمینی محل بستگی دارد. البته در بعضی موارد خاص، به علت شرایط خاص تکتونیکی محل، تنش جانبی به مقدار زیادی افزایش می‌یابد که این مسئله سبب افزایش پایداری تونل در میدان تنش موجود می‌شود. این افزایش پایداری تونل به علت افزایش مقاومت سنگ‌های در برگیرنده تونل در اثر افزایش تنش جانبی است. البته در تونل‌های کم عمق در اثر افزایش تنش جانبی ممکن است سنگ‌های بالای تونل شکسته و پدیده نشست در سطح زمین مشاهده شود (منصوری بروجنی، ۱۳۸۱).

۲-۶ منابع حرکات زمین

به طور کلی تونل‌سازی در زمین‌های نرم یک فرآیند پیچیده است که اجرای آن نیازمند تدابیری به منظور پایدارسازی جبهه کار تونل و جلوگیری از نشست سطح زمین در نواحی شهری، می‌باشد. چون عمده تونل‌های شهری در زمین‌های خاکی حفر می‌شود لذا برای حفاری آن‌ها لازم است از ماشین‌های حفاری استفاده شود.

در حین اجرای یک تونل تغییر شکل خاک اجتناب ناپذیر است. عوامل مؤثر در خاک عبارتند از (Romo Miguel, 1997):

- تغییر سطح تنش در نزدیکی سطح سینه کار
- تنش‌های برشی در خاک اطراف تونل هنگام هل دادن سپر به جلو
- تغییر شکل شعاعی، به سمت خارج یا داخل تونل در حین نصب سیستم نگهداری
- افزایش تراکم‌پذیری یک حلقه خاک در حین اجرای عملیات تونل‌سازی
- تغییر شکل‌های ایجاد شده در جدار سیستم نگهداری، در اثر وزن مواد روباره
- تراکم زمین در اثر تراوش آب از لایه‌های خاک به داخل تونل، اگر سیستم نگهداری مورد استفاده نفوذپذیر باشد.

۲-۶-۱ تغییر سطح تنش در نزدیکی سطح سینه کار

اگر فشار خالص وارده بر سینه کار تونل کمتر از سطح میدان تنش بر جای اولیه باشد، در این صورت توده خاک به سمت داخل سینه کار هجوم می‌آورد. از طرف دیگر، اگر میدان تنش بر جای اولیه کمتر از فشار خالص وارده بر سینه کار تونل باشد، توده خاک در بالای سینه کار تونل به داخل

تونل نخواهد ریخت. حرکات افقی در جهت عمود و موازی محور تونل سبب ایجاد نشست در سطح زمین بالای تونل می‌شود (Maidl & Herrenkmecht, 1995).

۲-۶-۲ تنش‌های برشی در طول دیواره تونل

نیروهای برشی که در محل تماس خاک دیواره با بدنه سپر وجود دارد، سبب ایجاد تنش‌های برشی در خاک اطراف دیواره تونل می‌شود. ضخامت لایه خاکی در اطراف دیواره تونل به خصوصیات مقاومتی خاک بستگی دارد. تنش‌های برشی ایجاد شده سبب ایجاد کرنش‌های برشی در لایه خاک می‌شوند که این مسئله می‌تواند سبب تغییر شکل عمده‌ای در راستای موازی محور تونل شود.

۲-۶-۳ تغییر شکل شعاعی ایجاد شده در دیواره تونل

در حین نصب سیستم نگهداری اولیه در محل تونل یک فضای خالی بین سیستم نگهداری و دیواره تونل ایجاد می‌شود. خاک‌های دست خورده و سست شده دیواره تونل تمایل دارند که به سمت داخل تونل حرکت کنند. این تغییر شکل‌های شعاعی تا زمانی که سیستم نگهداری دائم نصب و پشت آن دوغاب‌کاری نشود ادامه خواهد داشت. در این صورت اگر فشار دوغاب تزریق شده بیشتر از بار تونل باشد، حرکت خاک‌ها به سمت خارج تونل خواهد بود. در این حالت تغییر شکل‌های ایجاد شده در جهت عمود بر محور تونل خواهد بود (Romo Miguel, 1997).

۲-۶-۴ تراکم خاک‌های دست خورده موجود

در اثر اجرای عملیات حفاری تونل و تغییر سطح تنش اعمال شده بر خاک و همچنین با پیشروی سپر در خاک، خاک موجود به هم ریخته در می‌آید که به آن خاک دست خورده می‌گویند.

به طور مشابه تغییرشکل‌های شعاعی صورت گرفته در خاک در حین سیستم نگهداری و دوغاب‌کاری سبب ایجاد به هم ریختگی در خاک می‌شود. بنابراین پس از حفاری تونل، یک حلقه خاک دست خورده اطراف تونل وجود دارد. ضخامت این حلقه خاک دست خورده به خصوصیات سختی خاک و میزان تغییرشکل‌های شعاعی تونل بستگی دارد. در اثر تراکم ایجاد شده در این لایه خاک دست خورده یک تغییرشکل‌های شعاعی عمود بر محور تونل ایجاد می‌شود.

۲-۶-۵ تغییرشکل در سیستم نگهداری

وقتی که تماس کامل بین خاک و سیستم نگهداری برقرار شد، بارهای وارده بر سیستم نگهداری افزایش می‌یابند، در نتیجه تغییرشکل‌های ایجاد شده نیز افزایش خواهند یافت. مقدار این افزایش تغییرشکل‌ها به خصوصیات خاک و سیستم نگهداری بستگی دارد. تغییرشکل‌های کوتاه مدت و بلند مدت ایجاد شده در سیستم نگهداری را می‌توان به دست آورد. اغلب با خارج ساختن آب از لایه‌های موجود در محل، تنش مؤثر افزایش یافته و لذا تغییرشکل ایجاد شده در سیستم نگهداری افزایش می‌یابد. تغییرشکل ایجاد شده در خاک در اثر تغییرشکل ایجاد شده در سیستم نگهداری عمدتاً عمود بر محور تونل می‌باشند (Maidl, Herrenkmecht, 1995).

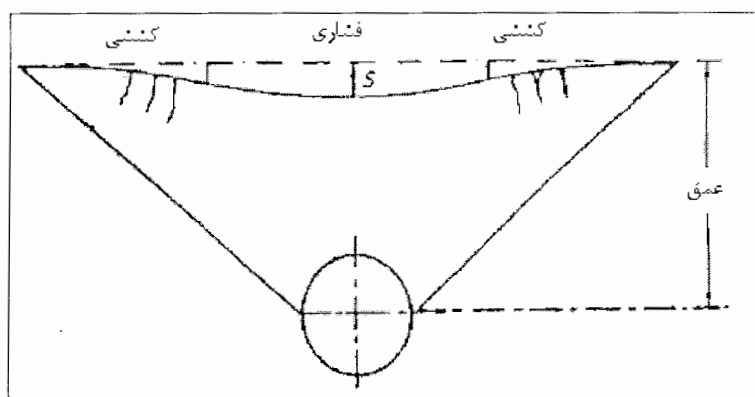
۲-۶-۶ تراکم زمین در اثر تراوش آب از تونل

اگر سیستم نگهداری مورد استفاده ضعیف باشد در این صورت ممکن است نفوذپذیری آن برابر یا حتی بیشتر از نفوذپذیری خاک اطراف دیواره تونل باشد. وقتی چنین شرایطی وجود داشته باشد، تونل به عنوان یک سیستم زهکش عمل کرده و آب زیرزمینی می‌تواند از طریق آن از زمین زهکشی شود. تراوش پایدار آب از داخل خاک سبب افزایش تنش مؤثر وارد بر دانه‌های خاک

می‌شود و در نتیجه یک تراکم در لایه خاک صورت می‌گیرد. جابجایی حاصله در اثر تراوش آب در جهت عمود بر محور تونل می‌باشد (Maidl & Herrenkmecht, 1995).

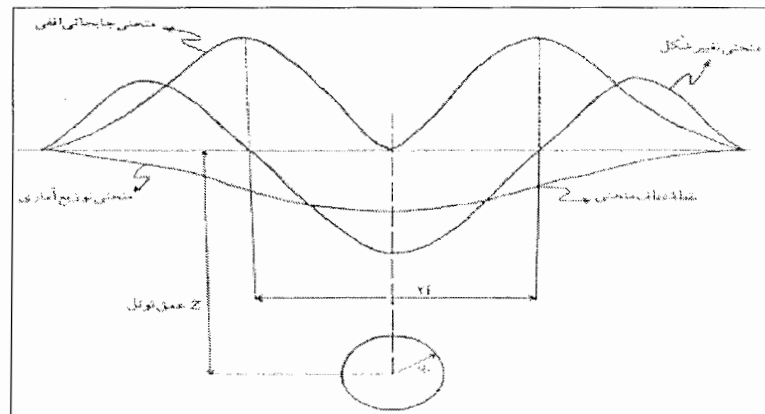
۷-۲ نشست و جابجایی

هنگام تشکیل گودی نشست در سطح زمین قسمت مرکزی به طور قائم نشست می‌کند اما بقیه قسمت‌ها علاوه بر حرکت قائم، به صورت افقی نیز جابجایی دارند. بر حسب این که نقطه داخلی از نقطه خارجی بیشتر حرکت کند، زمین تحت اثر کشش یا فشردگی افقی واقع می‌شود. به علت این که در قسمت مرکزی حرکت افقی وجود ندارد ولی نقاط اطراف آن به سمت داخل حرکت می‌کنند، بدین لحاظ قسمت مرکزی منحنی نشست متعاقباً تحت فشردگی قرار می‌گیرد. شکل ۲-۲ این وضعیت را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲- مناطق تحت کشش و فشردگی در نیم‌رخ نشست (O'Reilly & New, 1982)

همچنین منحنی‌های جابجایی، نشست و تغییر شکل نسبی بالای یک تونل در عمق Z و به شعاع R در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳- منحنی های جابجایی، نشست و تغییر شکل نسبی (O'Reilly & New, 1982)

با توجه به شکل ۲-۳ ملاحظه می‌شود که نقطه i از منحنی نشست، نقطه‌ای است که در آن جابجایی افقی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و از آن به بعد جابجایی افقی کم می‌شود و در انتهای دو طرف منحنی نشست، تقریباً به صفر می‌رسد. از طرفی نقطه i ، نقطه‌ای است که تغییر شکل نسبی فشاری به تغییر شکل نسبی کششی تبدیل می‌شود. خسارت ناشی از نشست، پاره‌ای به سبب مولفه قائم و پاره‌ای ناشی از مولفه افقی جابجایی سطح زمین است. مولفه قائم باعث پایین آمدن سطح زمین و نشست می‌شود. این نوع جابجایی‌ها زیاد خطرناک نبوده و می‌توان آن را به طریقی کنترل کرد که به سازه‌های سطح زمین آسیبی وارد نشود. ولی جابجایی‌های افقی که در سطح زمین تغییر شکل نسبی کششی یا فشاری ایجاد می‌کنند بیشترین خسارت را به ساختمان‌های سطحی وارد می‌آورند (O'Reilly & New, 1982).

۲-۸ شکل منحنی توزیع نشست

مسئله چگونگی توزیع عرضی نشست در سطح زمین، از جمله مسائلی است که مورد بررسی قرار گرفته و نمودار آن بر اساس قانون منحنی توزیع نرمال توسط Peck در سال ۱۹۶۹ ارائه شد. منحنی توزیع آماری، توسط تئوری Litviniszyan به شرح زیر توجیه می‌شود (Peck, 1969):

سایر پارامترهای مربوط به شکل ۲-۴ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

R: شعاع تونل

Z_0 : عمق مرکز تونل تا سطح زمین

در ارتباط با مشاهدات صحرایی Attewell در سال ۱۹۸۶ تحقیقات فراوانی را انجام داده و بین پارامتر i در منحنی توزیع عرضی نشست و عمق مرکز تونل تا سطح زمین (Z) و R شعاع تونل یک رابطه نیمه تجربی را به صورت زیر پیشنهاد کردند (Attewell & et al, 1986):

$$\frac{i}{R} = k \left(\frac{Z}{2R} \right)^n \quad 1-2$$

که در آن پارامترهای i و k به رفتار تنش کرنش خاک و روش ساخت تونل بستگی دارند. مقادیر مختلفی برای پارامترهای فوق توسط محققین ارائه شده است که در جدول ۲-۱ درج شده است.

جدول ۲-۱ روابط تجربی برای محاسبه پارامتر i

اساس روابط تجربی	مقدار i	ماخذ
مشاهدات محلی	$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{2R} \right)^n \quad n=0.8 - 1$	Peck(1969)
مشاهدات محلی در تونل‌های انگلستان	$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{2R} \right)$	Attewell & Farmer(1974)
مشاهدات محلی در تونل‌های انگلستان	$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{2R} \right)^{0.8}$	Clough & Schmidt(1981)
مشاهدات محلی در تونل‌های انگلستان	$i = 0.43Z_0 + 1.1m$ Cohesive soil $i = 0.28Z_0 - 0.1m$ Granular soil	O'Reilly & New(1982)
مشاهدات محلی و تست‌های آزمایشگاهی	$i = 0.25(Z_0 + R)$ Loose sand $i = 0.25(1.5Z_0 + 0.5R)$ Dense & Oc clay	Atkinson & Potts(1977)
جاهایی که اثرات تحکیم قابل توجه نیستند	$i = (0.45Z_0 + 0.57) \pm 1.01m$	Leach(1985)
مشاهدات محلی و تست‌های سانتریفوژ	$i = 0.5 Z_0$	Mail et al(1983)

از مجموعه مطالعات استنباط می‌شود پهنای گودی نشست در خاک‌های دانه‌ای کمتر از خاک‌های چسبنده بوده و در نتیجه احتمال جریان مصالح و ریزش‌های سقف تونل در خاک‌های دانه‌ای بیشتر می‌باشد. (شریعتمداری، فرزانه، ۱۳۸۰)

۹-۲ روش‌های پیش‌بینی نشست زمین بر اثر حفر تونل

با توجه به تغییرات و تنوع زیادی که در اثر عوامل مؤثر بر نشست سطحی از قبیل نوع لایه‌بندی خاک، عمق و ابعاد تونل و روش‌های حفر تونل وجود دارد، روابط متعددی توسط محققین در این زمینه ارائه شده که کاربرد هر یک همواره بستگی به میزان دقت در پارامترهای مؤثر در آن‌ها دارد. به عنوان مثال می‌توان روابط ارائه شده برای محاسبه نشست‌های سطحی ناشی از حفر تونل‌ها توسط Peck در سال ۱۹۶۹ نام برد.

همه تئوری‌های مربوط به محاسبه نشست‌های سطحی، بیانگر ارتباطی بین حجم خاکی که در اثر حفر تونل سست شده و حفره را پر می‌کند و حجم توده نشست یافته سطحی می‌باشد. با توجه به سست شدگی توده بالای تونل حتی اگر خلل و فرج بین ذرات خاک به طور کامل پر شوند، تغییرشکل‌های بعدی و نشست اجتناب ناپذیر خواهد بود. این سست شدگی و تغییر ایجاد شده در خاک هم‌زمان با ادامه حفاری هم چنان ادامه خواهد داشت و حتی با اقدامات بعدی از داخل تونل هم از بین نخواهد رفت. زیرا حذف این شرایط تنها هنگامی امکان‌پذیر است که بتوان تراکم خاک را به تراکم اولیه در حالت دست نخورده رسانید و نیز توده نشست یافته را به سطح اولیه باز گرداند. حفر تونل در خاک موجب تحول میدان تنش و تغییرشکل در اطراف آن می‌شود. تغییرشکل‌های زمین نزدیک به تونل به طرف سطح زمین گسترش یافته و به صورت فرو رفتگی در سطح ظاهر

می‌شود. با توجه به مسائل مربوطه، پیش‌بینی حرکات زمین در خاک‌های غیر چسبنده مشکل‌تر از خاک‌های چسبنده است. عموماً در طراحی تونل‌ها در مناطق شهری سه مسئله عمده مورد توجه می‌باشد:

۱- برآورد بارهای وارد بر پوشش موقت و دائم

۲- تحلیل پایداری زمین اطراف و جلوی تونل

۳- برآورد نشست‌ها و تغییر مکان‌های زمین و اثر آن بر ساختمان‌ها و تاسیسات مجاور

آزمایش‌های بسیاری روی نمونه‌های دست نخورده خاک نشان داده است که رفتار خاک در هر دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده، رفتاری غیر خطی و وابسته به تنش است. بنابراین فرض رفتار الاستیک خطی حتی در تغییر شکل‌های نسبی بسیار کوچک نیز صادق است و بررسی توزیع واقعی تنش‌ها در خاک مستلزم در نظر گرفتن رفتار واقعی آن است. انواع روش‌های پیش‌بینی نشست زمین بر اثر حفر تونل عبارتند از (طاهریان، ۱۳۸۱):

- روش‌های تجربی پیش‌بینی نشست
- روش‌های تحلیلی پیش‌بینی نشست
- روش‌های عددی^۱ پیش‌بینی نشست

۲-۹-۱ روش‌های تجربی برای پیش‌بینی نشست در بالای تونل

طی سی سال اخیر توصیه‌های Peck در گزارش خود به کنفرانس مکانیک خاک و پی‌سازی در مکزیکوسیتی سال ۱۹۶۹، اساس محاسبات مربوط به تونل‌ها در زمین‌های نرم بوده

^۱ Numerical method

است. نتایج او مبتنی بر تجزیه و تحلیل مشاهدات عملی بر تونل‌های ساخته شده بوده است. با این وجود در این مدت توصیه‌های وی با مشاهدات رفتار تونل‌های متعدد اجرا شده تصحیح و تکمیل گشته‌اند. علاوه بر آن مدل‌های آزمایشگاهی و عددی بسیاری در زمینه بررسی حرکات زمین اطراف تونل‌ها توسعه و گسترش یافته‌اند که بر دانش مهندسی، درباره مسائل مطرح شده افزوده است. در روش‌های تجربی معمولاً حرکات زمین در پیرامون تونل را با نشست‌های سطحی ارتباط می‌دهند و منابع نشست را جداگانه بررسی کرده و سپس اثرات آن‌ها را با یکدیگر جمع می‌کنند. توزیع عرضی نشست بنابر تجربیات بسیار روی تونل‌ها، شبیه منحنی توزیع نرمال می‌شود (Peck, 1969).

۲-۹-۲ روش‌های تحلیلی برای پیش‌بینی نشست در بالای تونل

در این روش برای محاسبه نشست زمین باید مدلی از توده سنگ پوششی و ابعاد استخراجی را شبیه سازی کرد. هنگام برآورد نشست زمین در این روش، حالت‌های مختلفی ممکن است فرض شود. از آنجا که تعیین خواص پوششی مشکل است، برای محاسبه مقدار نشست با کمک این روش لازم است از فرضیات ساده کننده‌ای استفاده شود لذا در طراحی‌ها نباید زیاد به این روش‌ها اعتماد کرد. این روش‌ها بیشتر برای کارهای تحقیقاتی به کار برده می‌شود و در عمل جواب‌های مناسبی نمی‌دهند (Bardy & Brown, 1993). در سال ۱۹۸۶ روشی تحلیلی برای آنالیز تغییر مکان‌های خاک اطراف یک حفره در یک نیم فضا توسط Sagaseta ارائه شده است. در این روش ضمن در نظر گرفتن معادلات کرنش، از معادلات تنش‌ها صرف نظر شده است. این تحلیل شامل در نظر گرفتن افت حجمی در محل تونل و توزیع آن در توده خاک در حالت مصالح تراکم ناپذیر (تغییر حجم نسبی صفر) می‌باشد. در این روش فرض می‌شود که افت حجم زمین (در سطح حفاری تونل)

معین بوده و یا می‌توان از روی نتایج ثبت شده آن را به دست آورد. اگر افت حجم زمین مشخص بوده و تنها تغییر مکان‌های خاک مجهول باشند، مسئله با کرنش کنترل شده خواهد بود (Sagaseta, 1986).

۲-۹-۳ روش‌های عددی برای پیش‌بینی نشست در بالای تونل

اغلب حفاری‌های زیرمینی، از شکل نامنظمی برخوردار بوده لذا این گروه از حفاری‌ها می‌توانند مجموعه پیچیده‌ای از اشکال سه بعدی را فراهم آورند. به علاوه، به خاطر حضور مشخصات زمین‌شناسی نظیر گسل‌ها و توده‌های نفوذی، خواص ژئوتکنیکی سنگ‌ها، در حجم معینی از آن، به ندرت یکنواخت می‌باشد. خوشبختانه، در چند دهه گذشته شماری از روش‌های عددی به صورت برنامه کامپیوتری گسترش یافته‌اند (طاهریان، ۱۳۸۱). Sagaseta & Oteo در سال ۱۹۹۶ بر مبنای تجارب به دست آمده در ساخت متروی مادرید و کاراکاس مدل‌هایی به روش اجزاء محدود در پیش‌بینی نشست‌های زمین روی تونل ارائه کردند که با موفقیت به کار گرفته شده‌اند. در این مدل‌ها که با فرض کرنش مسطح و رفتار ارتجاعی-خطی خاک تنظیم شده‌اند، تونل بدون جدار معرفی شده و اثر جدار و اجرا به صورت ضریبی در کل میدان تغییر مکان معرفی می‌شود (Sagaseta & Oteo, 1996).

۲-۱۰ انواع مطالعات در زمینه نشست

براساس بررسی اجمالی کارهای انجام شده در رابطه با پدیده نشست، سه دسته مطالعه قابل

تفکیک هستند، این مطالعات عبارتند از:

الف - مطالعات نظری

ب - مطالعات بر روی مدل‌های آزمایشگاهی

ج - مطالعات و اندازه‌گیری‌ها در تونل‌های واقعی

۲-۱۰-۱ مطالعات نظری

این مطالعات به پژوهش‌هایی اطلاق می‌شود که در جهت یافتن و توسعه یک بنیان تئوری برای حل مسئله نشست، انجام گرفته به طوری که جابجایی‌های شعاعی در تاج تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد. از سال ۱۹۶۹ به بعد پیشرفت‌های مهمی در حل نظری مسئله نشست زمین حاصل شده است. در ابتدا از یک سری فرضیات بسیار ساده کننده برای مسئله نشست استفاده شد. به طوری که در رابطه با موضوع ریزش در مواد غیر چسبنده زهکشی شده، Peck به نتایج زیر رسیده است (سعیدی کاخکی، ۱۳۷۸):

الف- شکل گود نشست ممکن است به صورت یک منحنی توزیع آماری نمایش داده شود، بنابراین نقطه i که حداکثر شیب منحنی در آنجا می‌باشد از رابطه ۲-۲ به دست می‌آید:

$$S_i = 0.606 S_{\max} \quad 2-2$$

S_i : نشست در نقطه عطف

$S_{\max}$: نشست ماکزیمم

ب- برای هر نوع زمین، رابطه‌ای بین نسبت $\frac{i}{R}$ و $\frac{Z}{2R}$ وجود دارد (سعیدی کاخکی، ۱۳۷۸).

تمرکز مطالعات نظری، بررسی جابجائی‌های شعاعی در تاج تونل می‌باشد. در ذیل به روش‌های ارائه شده در این زمینه پرداخته شده است:

• راه حل الاستیکی

در مباحث ژئوتکنیک از خاک‌های سفت مانند رس‌های فوق تحکیم متورم شونده به عنوان یک خاک الاستیک ایده‌آل بحث می‌شود. همچنین برای حالتی که تونل در اعماق زمین و در خاک‌های صلب مورد بررسی قرار گیرد، برای به دست آوردن جابجائی شعاعی، راه حل الاستیک کافی خواهد بود. در تحلیل الاستیک موارد زیر پیش‌بینی می‌شود:

الف- حرکت قائم به طرف پایین در بالای تونل با یک حرکت مساوی در نزدیک تونل و به طرف بالا برابر است.

ب- تغییر قطر افقی تونل توسط تنش‌های موضعی پدیدار می‌شود. برای حالتی که تنش افقی موضعی بزرگتر از تنش عمودی باشد، قطر افقی کم می‌شود و برعکس، اگر تنش افقی کوچک‌تر باشد، قطر افقی بزرگتر می‌شود.

ج- امتداد تغییر شکل زمین باید در امتداد خطوط مستقیمی که نسبت به محور تونل مایل هستند، باشد.

د- پس از آن که سپر از زیر نقطه مورد نظر بگذرد، تغییر شکل اتفاق می‌افتد و با این فرض تغییر شکل در جبهه تونل باید صفر باشد.

در یک محیط الاستیک اگر محافظ به اندازه قطر تونل یا بیشتر، عقب‌تر از جبهه نصب شود، هیچ‌گونه باری به محافظ اعمال نمی‌شود و همه تغییر شکل‌ها قبل از این که محافظ نصب شود، تکمیل می‌شوند، از این رو محافظ بدون تغییر شکل قابل ملاحظه باقی می‌ماند. جابجایی شعاعی

براساس راه‌حل الاستیک با U_i نشان داده می‌شود که برابر است با (طاهریان، ۱۳۸۱):

$$U_i = \frac{1+\nu}{2E} \cdot a \cdot P_z \cdot ((1+k_o) + (1-k_o)(3-4\nu)) \quad 3-2$$

در این رابطه:

a : شعاع دهانه حفاری شده

P_z : تنش قائم کل در کناره تونل

K_0 : نسبت تنش اولیه افقی به قائم

ν : نسبت پواسون

E : مدول الاستیسیته

برای شرایط زهکشی نشده، $\nu = 0.5$ و جابجایی تاج تونل مستقل از k_0 می‌باشد. در این حالت رابطه

3-2 به صورت زیر به دست می‌آید (طاهریان، ۱۳۸۱):

$$U_i = \frac{1+\nu_u}{E_u} a P_z \quad 4-2$$

محققین نشان داده‌اند که برای $\frac{Z}{a} \geq 3$ (Z عمق تونل)، شرایط تنش اطراف دهانه، به مانند تونل

عمیق می‌باشد و معادلات بالا قابل استفاده‌اند.

به طور مشابه، جابجایی شعاعی U_r در هر شعاع r (به طور مثال برای نشست بالای تاج تونل) از

رابطه 5-2 به دست می‌آید:

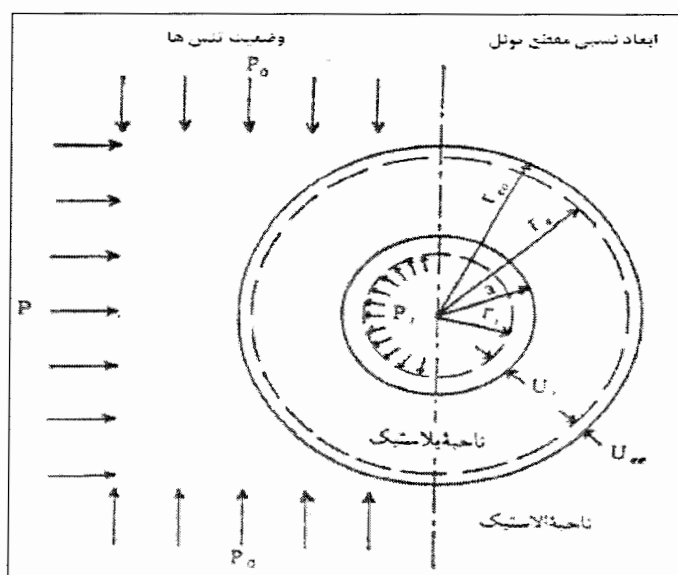
$$\frac{U_r}{a} = \frac{1+\nu}{2E} \cdot P_z \cdot \frac{a}{r} \left((3-k_0) + (k_0-1) \left(\frac{a^2}{r^2} \right) \right) \quad 5-2$$

• تحلیل تنش‌ها و جابجائی‌ها در ناحیه پلاستیک زهکشی نشده اطراف تونل

در رس‌های نرم، یک منطقه پلاستیک به علت توزیع مجدد تنش در رابطه با تغییر شکل

اولیه، در محیط حفره پدیدار می‌شود. در این مورد یک راه‌حل تقریبی برای وضعیت تنش‌های اولیه

هیدرواستاتیک پیشنهاد شده است. تصویر این موضوع در شکل (۵-۲)، نشان داده شده است. فرض بر این است که دهانه دایره‌ای در یک محیط نسبتاً نامحدود با تنش‌های اولیه هیدرواستاتیک ($P_0 = P_z$) ایجاد شده است. عمل حفاری، تنش‌های مرزی اطراف تونل را تغییر می‌دهد که این پدیده تابع مراحل کاهش تدریجی فشار داخلی تونل است.



شکل ۵-۲- وضعیت تنش‌ها و ابعاد نسبی مقطع یک تونل (طاهریان، ۱۳۸۱)

همانطور که در شکل ۵-۲ ملاحظه می‌شود تونل اولیه دارای شعاع a می‌باشد و فشار P_i نگهدارنده فضای تونل است. در اثر جابجائی شعاعی U_i ، شعاع تونل به مقدار r_i می‌رسد. در حد فاصل بین منطقه پلاستیک و الاستیک، یک جابجائی در منطقه الاستیک اتفاق می‌افتد (U_{eo})، به تبع آن شعاع منطقه پلاستیک کاهش یافته و شعاع r_{eo} به r_e تبدیل می‌شود. راه‌حل نهایی برای تحلیل موضوع فوق به شرح زیر است:

الف- فشار بحرانی:

فشار بحرانی $P_{i,cr}$ ، فشار داخلی در زیر محلی است که جریان پلاستیک اطراف تونل اتفاق می‌افتد که از روابط ذیل به دست می‌آید (طاهریان، ۱۳۸۱):

$$P_{i,cr} = P_0 - C_u \quad ۶-۲$$

$$P_{i,cr} = \gamma H - C_u \quad ۷-۲$$

$$N = \frac{H}{C_u} \quad ۸-۲$$

$$\frac{P_{i,cr}}{P_0} = \frac{N-1}{N} \quad ۹-۲$$

در این روابط:

γ : وزن واحد حجم کلی رس

H : عمق تونل

C_u : مقاومت برشی زهکشی نشده رس

N : عدد پایداری

P_0 : تنش اولیه

با این فرضیات، برای تونل در یک عمق معین، انتقال از حالت الاستیک به حالت الاستوپلاستیک تابع وضعیت خاک می‌باشد (N, C_u). تحت شرایط مناسب می‌توان با استفاده از فشار هوا، فشار بحرانی را کاهش داد که نقش این فشار عملکرد یک فشار داخلی (P_i) را دارد بنابراین (طاهریان، ۱۳۸۱):

$$P_{i,cr} = P_0 - P_i - C_u \quad ۱۰-۲$$

ب- شعاع منطقه پلاستیک:

با استفاده از رابطه زیر می‌توان شعاع منطقه پلاستیک را به دست آورد (طاهریان، ۱۳۸۱):

$$\frac{r_e}{r_i} = \exp\left(\frac{P_0 - P_i - C_u}{2C_u}\right) \quad ۱۱-۲$$

در این رابطه:

r_e : شعاع منطقه پلاستیک

r_i : شعاع مقطع تونل حفر شده منهای مقدار جابجائی U_i (برای مقادیر کوچک U_i ، r_i ممکن

است برابر با a فرض شود).

ج- جابجائی شعاعی U_i :

جابجائی شعاعی در حالت الاستوپلاستیک از رابطه زیر به دست می‌آید (طاهریان، ۱۳۸۱):

$$\frac{U_i}{a} = 1 - \left(\frac{1}{1 + \frac{2(1+\nu_u)C_u}{E_u} \left(\frac{r_e}{r_i}\right)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad ۱۲-۲$$

در این رابطه، مقدار $\frac{r_e}{r_i}$ از رابطه قبلی به دست می‌آید و جایگزین می‌شود. برای به دست آوردن

فشار بحرانی ($P_{i,c}$) و شعاع منطقه پلاستیک، نمودارهایی از این دو در مقابل عدد پایداری N رسم

شده است که از آن‌ها نیز می‌توان استفاده نمود (طاهریان، ۱۳۸۱).

۲-۱۰-۲ مطالعات بر روی مدل‌های آزمایشگاهی

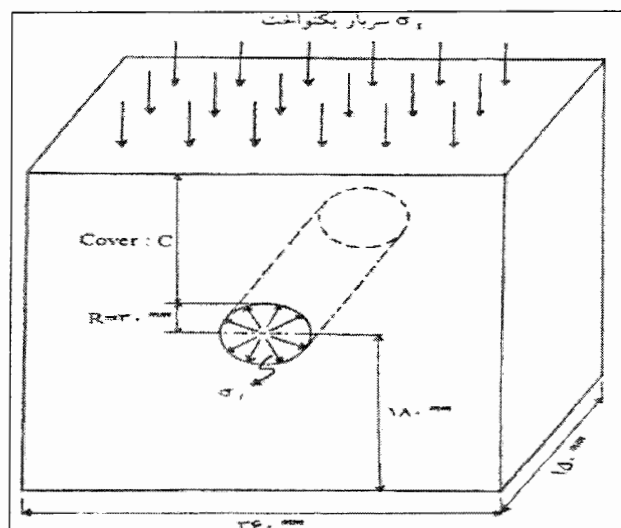
بررسی تونل‌های کم‌عمق در آزمایشگاه در مقیاس کوچک انجام می‌گیرد و سعی می‌شود که

در آزمایشگاه شرایط زمین با مقیاس کوچکتری پیاده شود، به این حالت آزمایش تونل مدل گفته

می‌شود. آزمایش‌های مدل برای توضیح چگونگی تغییرات خاک اطراف یک فضای دایره‌ای شکل می‌باشند. تونل مدل دارای یک مقدار فشار داخلی (σ_i) است که با کاهش σ_r تونل به مرحله ریزش می‌رسد و در حین کاهش σ_r جابجائی خاک اطراف تونل در طول آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. به منظور یافتن یک تصویر کلی از جابجایی دانه‌ها و تغییر شکل خاک در بخش زیر سطحی زمین و تجزیه و تحلیل نتایج آن‌ها، لازم است که ویژگی‌های زمین مورد مطالعه، تا حد امکان در آزمایشگاه‌ها شبیه سازی شود تا با استفاده از نتایج مشاهدات روی مدل آزمایشگاهی به توان نشست زمین را پیش‌بینی کرد.

• شرایط آزمایش مدل

شکل ۶-۲ شرایط مرزی و ابعاد تونل مدل را در حالت تیپیک نشان می‌دهد:



شکل ۶-۲ شرایط مرزی و ابعاد تونل مدل را در حالت تیپیک (سعیدی کاخکی، ۱۳۷۸)

همانطور که در شکل ۶-۲ ملاحظه می‌شود، نمونه خاک در یک جعبه قرار داده می‌شود. صفحات جلو و عقب جعبه به حالت عمودی نسبت به محور تونل قرار دارند، از این نظر یک حالت کرنش

صفحه‌ای در آزمایش به وجود می‌آید. در اطراف و کف جعبه فشارسنج‌هایی برای اندازه‌گیری تنش عمودی و برشی نصب می‌شوند و در سطح خاک یک سربرار یکنواخت به صورت کنترل شده قرار می‌دهند (σ_s)، ارتفاع خاک بر روی تاج تونل با C نشان داده شده و مقدار C در آزمایش‌های مختلف، متفاوت است. از آن جایی که بحث در ارتباط با رفتار یک تونل کم‌عمق می‌باشد، نسبت $\frac{C}{D}$ به مقدار کمتر از $\frac{2}{5}$ محدود می‌شود. سربرار یکنواخت سطحی، توسط فشار مایعات بر روی یک غشاء لاستیکی واقع در سطح خاک اعمال می‌شود. همچنین تونل در هنگام حفر دارای یک غشاء لاستیکی است که در داخل این غشاء لاستیکی یک فشار داخلی از مایع (σ_l) وجود دارد. در خلال آزمایش، فشار داخلی را به آرامی کم می‌کنند تا تونل به مرز ریزش برسد. البته ریزش تونل می‌تواند در اثر افزایش σ_s هم اتفاق بیافتد. در صورتی که تونل مدل دارای محافظ فلزی نازک باشد، با استفاده از کرنش‌سنج‌های نصب شده در داخل و خارج سطوح پوشش، مقدار تنش‌های خمشی و احاطه کننده در پوشش فلزی را می‌توان به دست آورد.

باید توجه داشت که ابزارهای مورد نیاز برای آزمایش‌های تونل مدل در ماسه با ابزارهای مورد نیاز برای آزمایش‌های تونل مدل در رس متفاوت است. به عنوان مثال جعبه مدل برای خاک‌های ماسه‌ای و رسی با هم فرق می‌کنند به طوری که برای خاک‌های دانه‌ای غیر چسبنده خشک در حالت متراکم از جعبه‌های با ارتفاع زیادتر که دارای عرض کمتری هستند استفاده می‌شود. ارتفاع زیادتر مدل موجب می‌شود که تا حد بحرانی، C (پوشش روی تونل) قابل بررسی باشد و اگر C از آن مقدار زیادتر شود جابجائی خاک به سطح زمین نمی‌رسد. عرض کمتر در این مدل موجب می‌شود که حجم کمتری از خاک برای آزمایش مصرف شود و از طرف دیگر گسترش

عرضی در این خاک‌ها زیاد نبوده و عرض مدل مورد نظر کافی می‌باشد. برای خاک‌های رسی از جعبه با عرض زیادتر استفاده می‌شود. در خاک‌های رسی سفت تا نرم در رابطه با جابجائی خاک، گسترش عرضی نشست سطح زمین نسبت به خاک‌های دانه‌ای زیادتر است و هر چه عمق تونل زیادتر شود عرض نشست سطحی زیادتر خواهد شد. برای ایجاد تونل مدل از لوله‌های پولیکا استفاده می‌شود، پس از کامل شدن نمونه در داخل جعبه، جهت حفر تونل، این لوله‌ها به آرامی از جای خود درآورده می‌شوند. به تدریج که اقدام به خارج کردن لوله‌ها از داخل خاک می‌شود نشست سطح زمین ظاهر می‌شود. متغیرهایی که در حین آزمایش مدل می‌توانند مدنظر باشند عبارتند از:

الف-وزن واحد حجم خاک (γ)

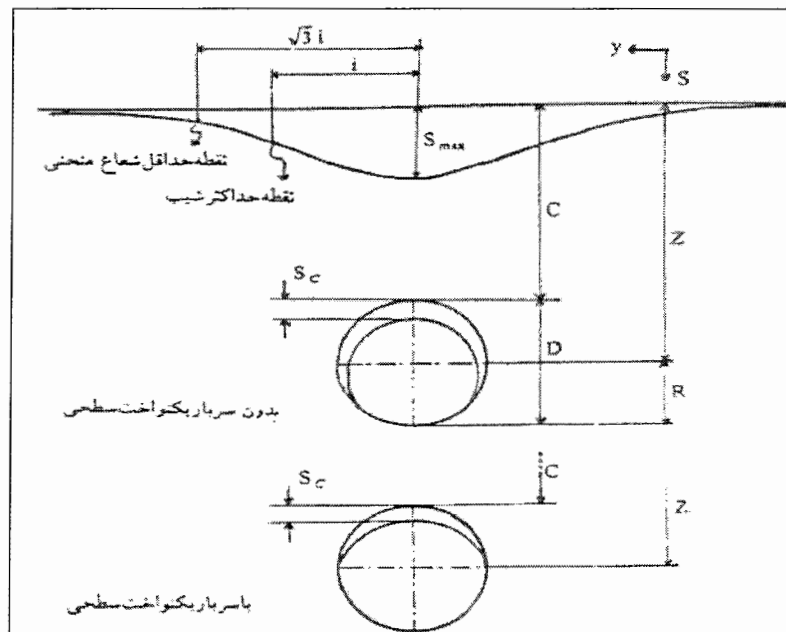
ب-رطوبت خاک (w)

ج-چگونگی تراکم یا سستی خاک‌های دانه‌ای

د-نسبت $\frac{C}{D}$

• تفسیر نتایج به دست آمده از آزمایشات مدل

آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که اولین جابجائی‌ها درست در بالای تونل و دقیقاً قبل از این که تونل ریزش کند، اتفاق می‌افتد. این جابجائی‌ها ابتدا به یک منطقه خیلی کوچک محدود می‌شود که به تدریج این منطقه به سمت بالا گسترش می‌یابد. به تدریج که تغییر شکل تونل می‌یابد، تغییر شکل سطحی ظاهر می‌شود. شکل این گودال ممکن است به صورت یک منحنی توزیع آماری باشد که این منحنی توسط پارامترهای z و $S_{\max}$ تعریف می‌شود. پروفیل جابجائی‌های مشاهده شده در ارتباط با عمق تونل در شکل (۷-۲) نشان داده شده است.



شکل ۷-۲ ارتباط عمق نسبی تونل و تغییر شکل‌های مشاهده شده در نزدیکی تونل

به طوری که از شکل (۷-۲)، مشخص می‌شود در حالتی که $\sigma_s = 0$ باشد، تغییر شکل‌های تونل به صورت جابجائی شعاعی یکنواخت است و در حالتی که $\sigma_s > 0$ و تونل در عمق کم، مدل شده باشد از دگرشکلی زیر سطح محور تونل صرفه‌نظر، و فقط جابجائی‌های بالای سطح در نظر گرفته می‌شود. در هر دو حالت نشست تاج تونل با S_c نشان داده شده است. برای بررسی احتمالی نشست زیر ساختمان‌ها و تأسیسات، باید حداکثر شیب زمین یا حداقل شعاع منحنی نشست سطحی را به دست آورد. این فاکتورها ممکن است از نشست حداکثر مهم‌تر باشند (سعیدی کاخکی، ۱۳۷۸):

$$\begin{aligned} \text{در } y = \pm i \quad & \text{حداکثر شیب زمین} = 0.606 \frac{S_{\max}}{i} \\ \text{در } y = 0 \quad & \text{حداقل شعاع منحنی} = -\frac{i^2}{S_{\max}} \\ \text{در } y = \pm \sqrt{3}i \quad & \text{حداقل شعاع منحنی} = \frac{2.24i^2}{S_{\max}} \end{aligned}$$

برای تونل‌های مدل کم‌عمق که $\frac{C}{D} < 1$ است و دارای سربار می‌باشند پروفیل‌های نشست مشاهده

شده، نشان می‌دهد که در $y > 2i$ ، حالت منحنی‌های توزیع آماری برقرار نیست.

از آنجایی که مقدار i و نسبت $\frac{S_{max}}{S_c}$ در یک تونل مدل به فاکتورهایی از این قبیل عمق محور تونل، نوع خاک اطراف تونل و وجود سربار بستگی دارد، می‌توان نتیجه گرفت که با یک عمق ثابت تونل، مقدار $\frac{S_{max}}{S_c}$ بستگی به میزان تغییرات حجم خاک در اطراف و بالای تونل دارد. اگر خاک منبسط شود هر مقدار کاهش در حجم تونل ممکن است توسط انبساط خاک برابر، و شرایط تعادل ایجاد شود. در نتیجه در یک عمق زیاد تونل، ممکن است قبل از اینکه در سطح زمین نشست ظاهر شود، تونل ریزش کند و مقدار $S_{max} = 0$ شود.

مسئله ایجاد تراکم یا انبساط در خاک بستگی به طبیعت خاک دارد، در حالتی که تونل‌ها در ماسه سست یا رس‌های خیلی نرم حفر شوند، احتمالاً تراکم در خاک ایجاد می‌شود. ماسه متراکم تحت تنش‌های کم، به مقدار زیادی منبسط می‌شود. تغییرات حجم در ماسه‌ها، اگر متراکم یا سست باشند به حد زیادی تحت تأثیر تغییرات تنش برشی می‌باشد و کمتر تحت تأثیر تنش عمودی است. ولی تغییر حجم در رس‌ها، به مقدار زیادی تحت تأثیر تنش عمودی متوسط می‌باشد و رس‌ها ممکن است متراکم یا منبسط شوند. در رس‌های فوق تحکیمی تغییرات حجم نسبتاً کم خواهد بود. با توجه به تغییرات تنش اطراف یک تونل و خواص خاک‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، درجات نسبی انبساط در خاک اطراف تونل ممکن است به دست آید (سعیدی کاخکی، ۱۳۷۸).

• ارتباط حجم گود نشست در سطح زمین با حجم افت در تاج تونل

هنگامی که تونل حفر می‌شود، اگر انبساط حجمی در توده خاک بالای تاج تونل اتفاق بیافتد، موجب می‌شود که حجم گود نشست در سطح زمین از حجم افت زمین در تونل کمتر باشد و اگر حجم توده خاک بالای تونل فشرده شود، این قضیه برعکس خواهد بود و حجم گود نشست سطح

زمین از حجم افت زمین در تونل زیادتر می‌شود. تفاوت بین حجم افت زمین در تونل و حجم گود نشست در سطح زمین مربوط به افزایش یا کاهش حجم در توده خاک بالای تاج تونل است. چنان چه حجم گود نشست با V_S و حجم افت زمین در تونل با V_I نشان داده شود، نسبت $\frac{V_S}{V_I}$ از مقدار یک (برای تونل فرضی مماس بر سطح زمین) تا صفر (برای تونل در عمق بسیار زیاد) متغیر خواهد بود. حجم V_S تا حد زیادی با حجم V_I مطابقت دارد. بین حجم‌های V_I و V_S رابطه‌ای وجود دارد که عبارت است از (سعیدی کاخکی، ۱۳۷۸):

$$V_S = V_I + V_C \quad ۱۳-۲$$

که V_C تغییر حجمی است که بالای تونل اتفاق می‌افتد.

شرایط زمین و روش ساخت تونل، حجم زمین از دست رفته به خاطر نشست در اثر حفر تونل را تعیین می‌کند. به منظور نرمال کردن حجم زمین از دست رفته نسبت به ابعاد تونل، حجم گودی نشست در سطح V_S به عنوان درصدی از حجم تونل حفاری شده V_{exc} بیان می‌شود. حجم زمین از دست رفته به شرایط زمین بستگی دارد. در خاک رس سخت لندن و در تونل با عرض چهار متری راه‌آهن، حجم زمین از دست رفته در محدوده ۱ تا ۲٪ می‌باشد. در تونل‌های کوچک‌تر زمین آسیب بیشتری می‌بیند و در مناطق حفاری شده و مجموعه‌های ایستگاهی با ورودی‌های بزرگ چندگانه این آسیب دو برابر می‌شود. در خاک‌های رسی V_C مربوط به تغییرات فشار آب منفذی اطراف تونل در ضمن حفاری می‌باشد که مقدار آن قابل محاسبه است (در این گونه خاک‌ها، تونل به صورت یک زهکش

عمل می‌کند)، در خاک‌های دانه‌ای مثل ماسه‌ها، مسئله به شکل دیگری مطرح است و V_c عمدتاً مربوط به انبساط خاک در بالای تونل می‌باشد.

۳-۱۰-۲ مطالعات و اندازه‌گیری‌ها در تونل‌های واقعی

از نیمه دوم قرن بیستم تعداد تونل‌های حفر شده در زمین‌های نرم رو به افزایش بوده است. در این رابطه پیشرفت‌های چشمگیری در فن تونل‌سازی و ماشین‌های تونل‌زنی ایجاد شده است. البته روش‌های ماشینی برای همه نوع خاک‌های نرم قابل استفاده نیست و از این نظر هنوز نیاز به گسترش روش‌های تونل‌زنی می‌باشد.

موضوع دیگر، تعیین ظرفیت پایداری یک تونل در زمان استفاده از آن می‌باشد. در این مورد لازم است که فشار عمودی وارد بر پوشش دائمی تونل تعیین شود و بر اساس همین فشار، پوشش دائمی تونل طراحی شود. لازم به ذکر است که بعضی مواقع تونل در زمینی حفر می‌شود که خود خاک پایدار بوده و نیازی به پوشش ندارد و جبهه کار هم پایدار است. این خاک‌ها معمولاً محکم بوده و دارای چسبندگی می‌باشند، به طور مثال رس‌های محکم و خاک‌های دانه‌ای چسبیده یا سیمانته شده دارای چنین خاصیتی بوده و حفر تونل در آن‌ها موجب ریزش خاک نمی‌شود. از طرف دیگر، خاک‌هایی هستند که به آن‌ها اصطلاحاً خاک‌های سست گفته می‌شود، پس از حفر تونل در این خاک‌ها، دیر یا زود از جبهه و اطراف دیواره تونل خاک ریزش می‌کند، در این حالت خاک ناپایدار است و بلافاصله پس از حفر تونل باید اقدام به نصب پوشش موقت شود. نصب پوشش موقت باید قبل از این که سست‌شدگی خاک گسترش یابد، انجام شود. خاک‌های این دسته شامل ماسه‌های کمی چسبنده، سیلت و ماسه‌های دانه‌ریز می‌باشند که دارای مقاومت کمی هستند.

مطالعات و پژوهش‌هایی که روی تونل‌های واقعی در مقیاس بزرگ ناحیه‌ای انجام گرفته است منجر به نوعی طبقه‌بندی و نیز مشاهداتی شده است که راه‌گشای سایر پروژه‌ها در این زمینه است. اگر چه مقدار نشست و بعضی رفتارهای ریزشی خاک تابع روش و جزییات عملیات اجرایی ساختمان تونل است، ولی فاکتور اصلی برای ریزش غالباً بستگی به طبیعت خاک اطراف تونل و شرایط آب زیرزمینی دارد. نشست معمولاً نسبت به محور عمودی تونل یک حالت قرینه دارد. این نشست در سطح زمین به صورت یک گودی می‌باشد و شکل آن تقریباً شبیه منحنی توزیع آماری است. حداکثر نشست در هر مقطع عرضی، درست در بالای محور تونل می‌باشد و با S_{max} نشان داده می‌شود. در طول یک تونل، مقدار S_{max} در هر مقطعی فرق دارد، اگر شرایط خاک و روش تونل‌زنی تغییر نکند، مقدار S_{max} دارای یک نوسان متعادل خواهد بود و تغییرات آن زیاد نیست. برای اندازه‌گیری جابجایی‌های افقی و قائم خاک و تعیین تغییرشکل زمین، اقدام به نصب دستگاه‌های اندازه‌گیری در امتداد سه راستا می‌شود. ابزارهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری نشست عبارتند از:

- شیب سنج: که برای اندازه‌گیری تغییرشکل‌های جانبی نصب می‌شود.
- انبساط سنج: که برای سنجش جابجایی قائم خاک می‌باشد. این وسیله در بالا و اطراف تونل نصب می‌شود.
- پیژومتر: که برای اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی می‌باشد.
- کرنش سنج: که برای ارزیابی بارهای وارده روی پوشش تونل می‌باشد.

این ابزارها در سه امتداد مختلف نصب می‌شوند. همچنین بایستی توجه داشت که وجود آب زیرزمینی استعداد ریزش را افزایش می‌دهد. علاوه بر ابزارهای گفته شده برای تعیین نشست، در

مقاطع مختلف اقدام به نقشه‌برداری سطحی (ترازیابی) می‌شود. همچنین انتخاب وسایل اندازه‌گیری بستگی به درجه اهمیت صحت اطلاعات دارد.

۲-۱۰-۳ نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌ها

نتایج مشاهدات متعدد نشان می‌دهد که بخش بزرگی از جابجائی خاک در ضمن حفر تونل ایجاد می‌شود و اگر تغییرات ثانوی تنش و فشار آب منفذی در زمین وجود نداشته باشد، تغییر شکل زمین پس از نصب پوشش خیلی کم خواهد بود، تنها در دو حالت است که تغییرات ثانویه مهم هستند:

الف- وقتی تونل پوشش دارد ولی به صورت یک زهکش عمل می‌کند.

ب- وقتی که فشار هوای مورد استفاده برای ساختمان تونل، پس از تکمیل حفاری کاهش یابد. در این دو حالت ذکر شده، فشار آب منفذی در یک محدوده وسیعی از زمین اطراف تونل تغییر می‌کند و این تغییرات می‌تواند موجب تغییر شکل بعدی زمین شده و احتمالاً گود نشست در سطح زمین گسترده‌تر شود. در عمل مشکل اصلی مربوط به زمین اطراف تونل می‌باشد که این مسئله مشخص کننده چگونگی پیشروی حفاری و نصب محافظ موقت یا دائم در پروژه موردنظر است. بررسی این مسئله از طریق بررسی در تونل‌های در مقیاس واقعی به راحتی انجام می‌شود ولی از روش مطالعات مدلی به راحتی نمی‌توان بررسی کرد.

گزارش‌های مختلف از مشاهدات در محل نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از تغییر شکل کل، در قسمت بالای جبهه تونل اتفاق می‌افتد. این مطالعات نشان می‌دهد که جابجائی در نزدیکی تونل، از فاصله‌ای حدود D (قطر تونل) بالای تاج تونل به طور عمودی به طرف پایین می‌باشد و

مسیر آن به طرف تونل است. در قسمت پایین تونل تغییر شکل‌های اندکی به طرف بالا یا پایین وجود دارد. جابجائی‌های نزدیک اطراف تونل که در حال پیشروی است به صورت یک طرح سه بعدی در بالای جبهه تونل گسترش می‌یابد. اگر بتوان رابطه‌ای بین V_t (حجم افت زمین در تونل) و V_s (حجم گود نشست در سطح) در ضمن حفر تونل به دست آورد، بسیار مفید خواهد بود، ولی اندازه‌گیری V_t در محل مشکل است. تغییرات حجم را می‌توان از طریق تغییرات تنش در اطراف و بالای تونل به دست آورد. به طور کلی اگر کاهشی در تنش عمودی پیدا شود این کاهش موجب انبساط می‌شود و اگر افزایشی در تنش برشی وجود داشته باشد، این افزایش ممکن است بر حسب نوع زمین موجب انبساط یا تراکم حجم بشود. در نتیجه، یک خط تونل می‌تواند به طور نسبی افزایش حجمی کوچک یا بزرگ را ایجاد کند یا می‌تواند موجب پیدایش یک فشردگی کوچک در حجم خاک شود، همه این‌ها بستگی به خواص خاک و مقدار نسبی تغییرات در تنش عمودی و برشی در زمین مابین تونل و سطح زمین دارد.

معمولاً نشست سطحی در خاک‌های رسی به جز رس‌های نرم و سیلتی و آلی مسئله مورد توجهی نمی‌باشد. اگر چه نوع رس‌ها متفاوت است و دارای مقاومت برشی زهکشی نشده مختلفی می‌باشند، ولی نسبت پایداری و تغییر شکل شعاعی اندازه‌گیری شده، با سرعت پیشروی در تونل عمدتاً مشابه است. از آن جایی که محدوده گسترش نشست توسط منحنی توزیع نرمال تعیین می‌شود، گسترش کل نشست در هر طرف مرکز تونل برابر $\frac{3Z}{2}$ می‌باشد (شریعتمداری، ۱۳۸۰).

۲-۱۰-۴ ضرورت توجه به روش‌های سه گانه مطالعه

در بررسی‌های تئوری، شرایط ساده‌ای برای محیط فرض می‌شود و نیز تحلیل مسئله برای محیطی است که یکنواخت، همگن و ایزوتروپ باشد. مزیت این روش‌ها در این است که احتمالاً ممکن است حد بالایی و پایینی تغییرشکل یا تنش را نشان دهند. بررسی‌های ناحیه‌ای و اندازه‌گیری عینی در تونل‌هایی با مقیاس واقعی، نتایج مطمئنی را ارائه می‌دهند ولی هنوز کارایی لازم را در تعیین میزان تأثیر خواص مختلف خاک در چگونگی و مقدار نشست محیط اطراف تونل نداشته‌اند. از طرفی چون مشخصات زمین از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است نتایج بررسی‌ها در یک مورد معین را باید با احتیاط کامل در موارد دیگر به کار برد. به موازات مطالعه بر روی تونل‌های واقعی در مقیاس بزرگ، مطالعات دقیق آزمایشگاهی روی مدل‌های ساده احساس شده و در این زمینه پژوهش‌گران متعددی به بررسی پرداخته‌اند. مطالعات مدلی این مزیت را دارد که خواص خاک مورد آزمایش کاملاً مشخص، قابل تغییر و قابل انتخاب است و تأثیر یک پارامتر را به خوبی می‌تواند نشان دهد و نیز اندازه‌گیری جابجایی‌ها، نشست‌ها، کرنش‌ها و تنش‌ها در هر صفحه و در هر مرحله‌ای از شرایط حفر تونل و پیشروی آن با دقت میسر است. با تلفیق این مطالعات، نتایج زیر حاصل خواهد شد (شریعتمداری، ۱۳۸۰):

- امتحان کردن تئوری‌ها و محاسبات تحلیلی و عددی موجود و یافتن انحراف نتایج تئوری نسبت به نتایج تجربی
- یافتن تحلیل جدید و یا تئوری محاسباتی جامع‌تر

۲-۱۱ روش پیش‌بینی نشست ناشی از حفر یک تونل

همان‌طور که اشاره شد، اطلاعات تجربی نشان می‌دهد که مقطع عرضی گود نشست بر روی یک تونل منفرد را می‌توان به وسیله تابع آماری توزیع نرمال نشان داد که رابطه ریاضی آن به صورت زیر است (Peck, 1969).

$$S = S_{\max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad ۲-۱۴$$

x : فاصله عرضی از خط مرکزی تونل

S : نشست سطح زمین در فاصله عرضی از خط مرکزی تونل

$S_{\max}$: نشست حداکثر در سطح زمین ($x = 0$)

i : فاصله نقطه عطف منحنی نشست تا نقطه‌ای که در سطح زمین قرار دارد.

شکل تغییر یافته سطح زمین در بالای جبهه کار تونل را اصطلاحاً گود نشست^۱ نامیده می‌شود. که با تعیین مقدار i و مقدار نشست حداکثر ($S_{\max}$)، حجم گود نشست (V_s) در واحد

پیشرفت کار به وسیله رابطه ۲-۱۲ به دست می‌آید (Maidl & Herrenknecht, 1995):

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} S dx = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) dx = \sqrt{2\pi} i S_{\max} = 2.5i S_{\max} \quad ۲-۱۵$$

فاصله نقطه حداکثر انحنا از منحنی نشست (نقطه تقعر حداکثر) تا خط مرکزی تونل برابر

$\sqrt{3}i$ بوده و خط مماس در نقطه عطف، سطح زمین را به فاصله $\pm 2i$ از خط مرکزی تونل قطع

می‌کند. هر چه عمق تونل بیشتر باشد، دامنه گسترش نشست در سطح زمین وسیع‌تر، ولی قدر

مطلق نشست‌ها کوچک‌تر خواهد بود. همچنین ماکزیمم نشست سطح زمین را می‌توان با حجم تلف

^۱ Subsidence Trough

شده (V_l) و V_s سطح مقطع بالای منحنی نشست در طول عملیات تونل‌سازی توسط روابط زیر به دست آورد (Maidl & Herrenknecht, 1995):

$$S_{\max} = \frac{3.13 V_l D^2}{i} \quad (cm) \quad ۱۶-۲$$

$$V_s = AK = 2.5iS_{\max} \quad ۱۷-۲$$

K ضریب دقت بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۳.

A: سطح مقطع تونل

D: قطر تونل

$S_{\max}$: ماکزیمم نشست در سطح زمین (بر حسب میلی‌متر)

V_s : سطح مقطع بالای منحنی نشست

برای طبقه بندی جابجائی های افقی و قائم O'Reilly and New در سال ۱۹۸۲ فرض کردند

که همه ذرات حرکت کننده در خاک در مسیرهای شعاعی به طرف تونل جابجا می‌شوند که در این حالت، وضعیت کرنش صفحه ای به کار برده می شود. در این وضعیت حرکات زمین به صورت خطی با عمق افزایش پیدا می‌کند. روابط زیر این حالت را نشان می‌دهد:

$$i_z = KZ \quad ۱۸-۲$$

$$H_{(x,z)} = \frac{x}{Z} S_{(x,z)} \quad ۱۹-۲$$

که در این روابط i_z : انحراف استاندارد منحنی نشست در ارتفاع z بالای محور تونل، K یک ثابت تجربی و x فاصله از مرکز تونل می‌باشد. K برای خاک‌های چسبنده ۰/۵ و برای خاک‌های دانه دانه ۰/۲۵ می‌باشد. بررسی بیشتر نشان می‌دهد که K برای خاک‌های رس بین ۰/۴ تا ۰/۷ تغییر می‌کند.

برای مواد دانه دانه K بین 0.2 تا 0.3 تغییر می‌کند. $H_{(x,z)}$ و $S_{(x,z)}$ به ترتیب اجزاء افقی و قائم جابجائی خاک در فاصله افقی x و فاصله قائم z از محور تونل می‌باشند.

جابجائی‌ها با معادلات زیر تعمیم داده می‌شود:

$$S_{(x,z)} = S_{(\max,x,z)} \exp \frac{-x^2}{2i_z^2} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi KZ}} \exp \frac{-x^2}{2(KZ)^2} \quad 20-2$$

$$H_{(x,z)} = \frac{x}{z} S_{(\max,x,z)} \exp \frac{-x^2}{2i_z^2} = \frac{V_s x}{\sqrt{2\pi KZ^2}} \exp \frac{-x^2}{2(KZ)^2} \quad 21-2$$

اگر کرنش‌های قائم و افقی زمین را به ترتیب با ε_H و ε_V نشان می‌دهیم، مقدار آنها عبارتند از:

$$\varepsilon_V = \frac{dS_{(x,z)}}{dz} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi KZ^2}} \exp \frac{-x^2}{2(KZ)^2} \left[\frac{x^2}{(KZ)^2} - 1 \right] \quad 22-2$$

$$\varepsilon_H = \frac{dH_{(x,z)}}{dx} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi KZ^2}} \exp \frac{-x^2}{2(KZ)^2} \left[1 - \frac{x^2}{(KZ)^2} \right] \quad 23-2$$

(توجه داشته باشید که $\varepsilon_V = -\varepsilon_H$ شرایط کرنش صفحه‌ای حجم تغییر شکل یافته را برقرار

می‌کند). این معادلات در منطقه نزدیک تونل، یعنی در اطراف سطح بیرونی، قابل استفاده نیست،

این روابط صرفاً به خاطر ساده شدن مفروضات به دست آمده‌اند. همچنین این روابط برای خاک‌های

چسبنده تقریباً قابل قبول هستند (O'Reilly & New, 1982).

۲-۱۲- خسارت ناشی از نشست

خسارت ناشی از نشست، پاره‌ای به سبب مؤلفه قائم و پاره‌ای ناشی از مؤلفه افقی جابجایی

سطح زمین است. مؤلفه قائم باعث پائین آمدن سطح زمین و نشست می‌شود. این نوع جابجایی‌ها

زیاد خطرناک نبوده و می‌توان آن را به طریقی کنترل کرد که به سازه‌های سطح زمین آسیبی وارد

نشود. ولی جابجایی‌های افقی که در سطح زمین، ایجاد تغییر شکل نسبی کششی یا فشاری می‌کنند، بیشترین خسارت را به ساختمان‌های سطحی وارد می‌آورند.

۲-۱۲-۱ راه حل‌هایی برای کنترل نشست

- جلوگیری از نفوذ آب و سست شدن توده خاک
 - به حداقل رساندن حفره‌های موجود بین اطراف پوشش تونل و ناحیه حفاری شده
 - تزریق کافی و حتی المقدور سریع در خاک
 - انجام مهاربندی محکم، کافی و یکپارچه در سینه کار و دیواره‌های تونل
 - افزایش سرعت احداث تونل
- مهندس برای پیش‌بینی درست در مورد تغییر شکل زمین و بر حسب شرایط خاص یکی از موارد زیر را انتخاب کند:

- ۱- تغییر محل تونل با توجه به حساس بودن ساختمان‌ها یا خدمات
- ۲- تونل طولانی‌تر در مسیر بهتر
- ۳- استحکام شیمیایی یا ثابت ماندن زمین سست در مسیر صاف‌تر
- ۴- پی بندی کردن ساختمان‌های موجود و تغییر محل لوله‌های آب و گاز

۲-۱۳ نشست در اثر حفر تونل‌های دوقلو

در سال ۱۹۶۹ Peak و همکاران و در سال ۱۹۸۲ توسط O'Reilly & New تعدادی فرمول نیمه تجربی برای پیش‌بینی جابجایی‌ها در بالای تونل‌ها پیشنهاد شده است که سابقه تاریخی زیادی برای محاسبه نشست دارند. همچنین دقت زیادی برای به دست آوردن جابجایی افقی و قائم

زمین دارند. این فرمول‌ها در سال ۱۹۹۱ توسط O'Reilly & New گسترش داده شده و برای پیش‌بینی نشست در بالای تونل‌های دوقلو به کار برده شد. این معادلات بر این مبنا هستند که برای هر تونل پروفیل نشست منحصر به فردی با توجه به معادلات یک تونل ترسیم شده و منحنی نشست نهایی از مجموع هر دو پروفیل به دست می‌آید. اگر چه در استفاده از این معادلات پیش‌بینی جابجایی‌ها در بالای تونل‌های دوقلو، این امکان وجود دارد که نتایج آن‌ها با نتایج واقعی تفاوت داشته باشد. از این رو برای نزدیک شدن تخمین به اعداد واقعی باید معادلات را برای تونل‌های دوقلو گسترش داد. با توجه به تغییرات و تنوع زیاد عوامل موثر بر نشست، روش‌های تجربی و عددی متعددی توسط محققین در این زمینه ارائه شده که کاربرد هر یک همواره بستگی به میزان دقت در پارامترهای موثر در آن‌ها دارد. روش‌های تجربی برای مناطق خاص اجرا شده اند و نتایج آن برای همان مناطق قابل قبول می باشد و روش مناسبی برای پیش بینی نشست در اثر حفر تونل‌ها در مناطق دیگر نمی‌باشد اما به کارگیری روش‌های عددی روز به روز با استقبال بیشتری مواجه شده است (Chapman & et al, 2004).

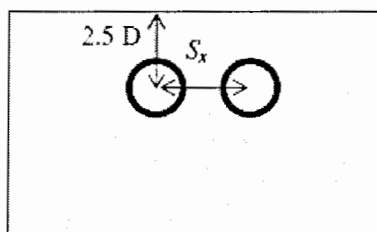
۲-۱۴ پیش‌بینی نشست در اثر حفر تونل‌های دوقلو

یک فرضیه ساده برای پیش‌بینی نشست در اثر حفر تونل‌های دوقلو این است که برای هر تونل پروفیل نشست را به دست آورده و منحنی مجموع را به دست آورد. اگر تونل‌ها مشابه باشند، جابجایی در هر تونل محاسبه کرده و برای هر کدام منحنی نشست را رسم می‌کنیم و در نهایت منحنی مجموع را به دست می‌آوریم. البته بسیاری از محققان معتقدند که این روش هنگامی که تأخیر در ساخت هر تونل به وجود آید روش دقیقی نمی‌باشد (Chapman & et al, 2003).

Shahrour و Chehade در سال ۲۰۰۷ برای سه حالت موقعیت تونل‌ها نسبت به هم، (آرایش افقی، آرایش قائم، آرایش شیب دار) از روش‌های عددی و مشاهدات واقعی درجا برای پیش‌بینی نشست استفاده کرده‌اند که به نتایج زیر رسیده‌اند.

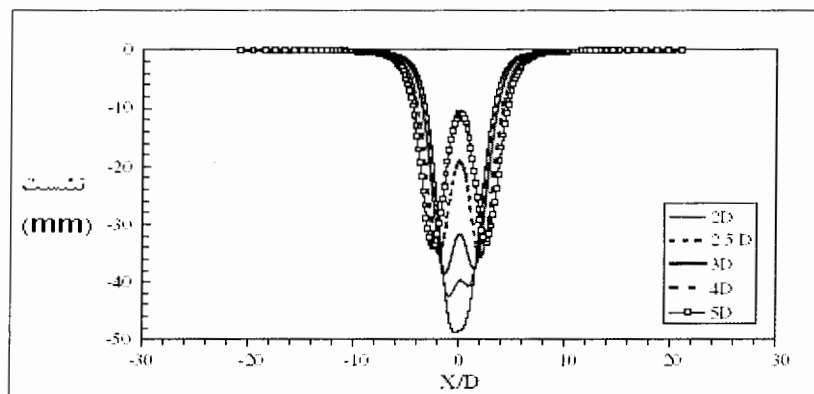
الف: تونل‌ها با آرایش افقی

برای این آنالیز فاصله افقی دو تونل (S_x) برای پنج حالت (۲، ۲/۵، ۳، ۴، ۵ برابر قطر) در نظر گرفته شده است. در شکل ۸-۲ حالت تونل‌ها با آرایش افقی نشان داده شده است.



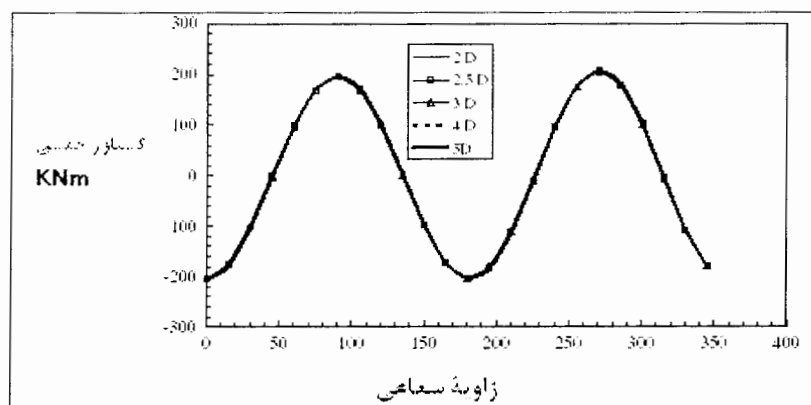
شکل ۸-۲ موقعیت تونل‌ها با آرایش افقی (Chehade, Shahrour, 2007)

شکل ۹-۲ میزان نشست در سطح زمین را برای این پنج حالت نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹-۲ در می‌یابیم که هم منحنی نشست و هم دامنه آن به فاصله تونل‌ها بستگی دارد.

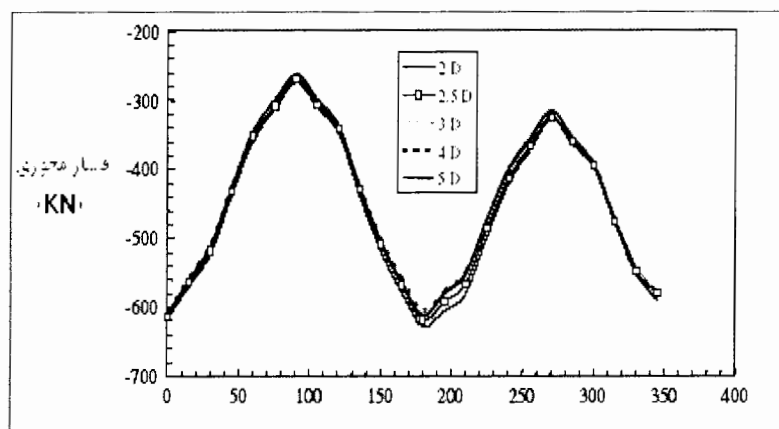


شکل ۹-۲ میزان نشست برای حالت‌های مختلف آرایش افقی (Chehade, Shahrour, 2007)

ماکزیمم نشست برای حالت $\frac{S_x}{D} = 2$ می‌باشد. و این میزان نشست حدود ۵۰ میلی‌متر در بین دو تونل اتفاق می‌افتد. با افزایش در فاصله دو تونل می‌بینیم که میزان نشست کاهش می‌یابد. در نتیجه منجر به تثبیت و متعادل کردن نشست در بالای هر تونل می‌شود. در فاصله‌های بیشتر از ۳D ساخت تونل اول تأثیری بر تونل دوم ندارد. در شکل‌های ۱۰-۲ و ۱۱-۲ به ترتیب منحنی توزیع گشتاور خمشی و منحنی فشار محوری در تونل سمت راست نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۲ میزان گشتاور خمشی در پوشش تونل برای حالت‌های مختلف افقی (Chehade, Shahrour, 2007)

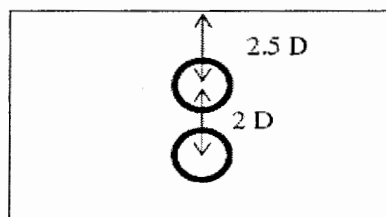


شکل ۱۱-۲ میزان فشار محوری برای حالت‌های مختلف افقی (Chehade, Shahrour, 2007)

با توجه به شکل‌های ۱۰-۲ و ۱۱-۲ در می‌یابیم که در حالت افقی هم فاصله تونل‌ها هم روش ساخت تونل‌ها تأثیری بر نیروهای داخلی ندارد.

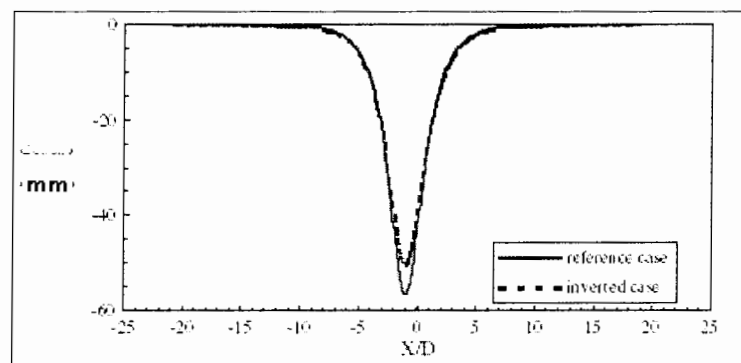
ب: تونل‌ها با آرایش قائم

شکل ۱۲-۲ موقعیت دو تونل را نشان می‌دهد.

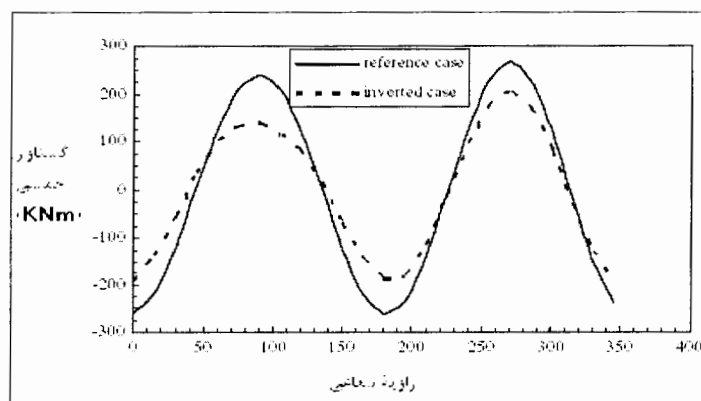


شکل ۱۲-۲ موقعیت تونل‌ها با آرایش قائم (Chehade, Shahrour, 2007)

تونل بالایی در فاصله $2/5D$ از سطح زمین قرار دارد. فاصله قائم بین تونل‌ها برابر با $2D$ می‌باشد. دو آنالیز انجام شده است. آنالیز اول این که، ابتدا تونل بالایی حفر شده (حالت مرجع) و آنالیز دوم این که ابتدا تونل پایینی حفر شده و سپس تونل بالایی حفر شده است (حالت معکوس). که نتایج آنالیزها در شکل‌های ۱۳-۲ و ۱۴-۲ و ۱۵-۲ به ترتیب منحنی نشست تونل‌های دوقلو، منحنی گشتاور خمشی در تونل پایینی و منحنی فشار محوری در تونل پایینی نشان داده شده است.

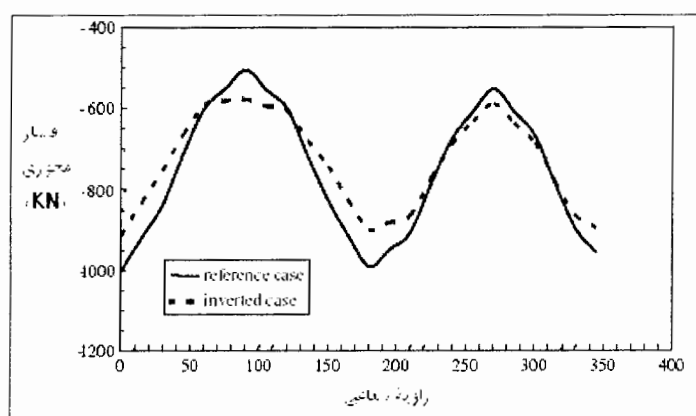


شکل ۱۳-۲ میزان نشست در سطح زمین برای حالت‌های قائم (Chehade, Shahrour, 2007)



شکل ۲-۱۴ میزان گشتاور خمشی در پوشش تونل پایینی برای حالت‌های مختلف قائم (Chehade, Shahrour, 2007)

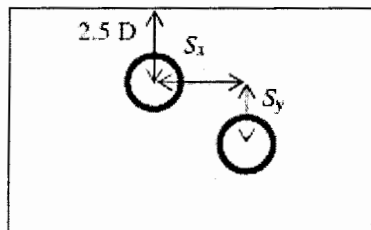
نتایج نشان می‌دهد که برای حالت مرجع یعنی حالتی که تونل بالایی ابتدا حفر می‌شود، میزان نشست، گشتاور خمشی و فشار محوری بیشتر می‌باشد. میزان نشست در حالت اول (مرجع) ۱۲ درصد بیشتر از حالت دوم (حالت معکوس) می‌باشد. میزان گشتاور خمشی در حالت اول ۲۳ درصد بیشتر از حالت معکوس است. همچنین فشار محوری در حالت مرجع ۱۰ درصد بیشتر از حالت معکوس می‌باشد (شکل ۲-۱۵).



شکل ۲-۱۵ میزان فشار محوری در تونل پایینی برای حالت‌های مختلف قائم (Chehade, Shahrour, 2007)

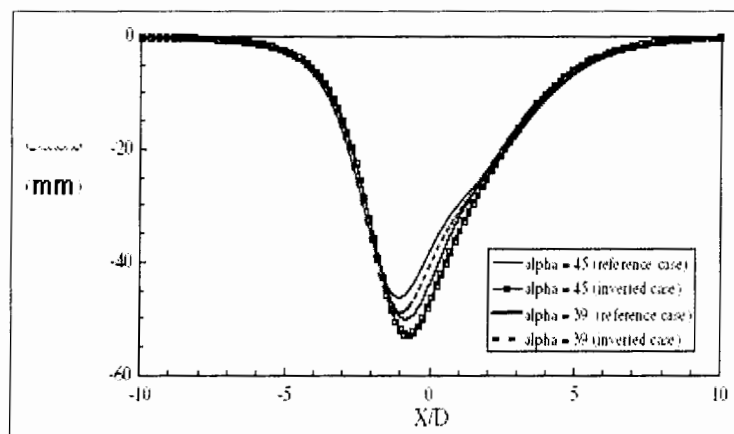
ج: تونل‌ها با آرایش شیب دار

شکل ۱۶-۲ موقعیت دو تونل را نشان می‌دهد.

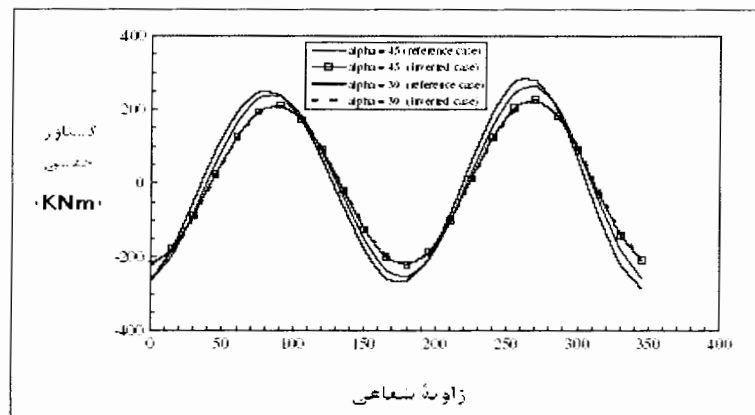


شکل ۱۶-۲ موقعیت تونل‌ها با آرایش شیب‌دار (Chehade, Shahrour, 2007)

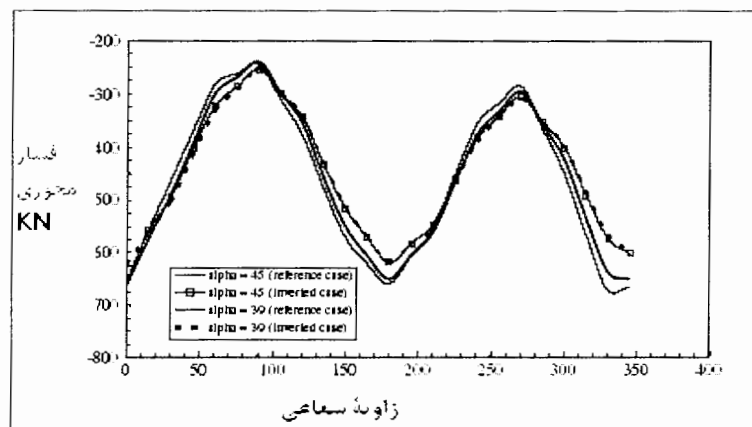
این آنالیز در دو حالت انجام شده است. حالت اول، فاصله قائم دو تونل $S_y = 2D$ و فاصله افقی دو تونل $S_x = 2D$ می‌باشد ($\alpha = 45^\circ$). حالت دوم فاصله افقی دو تونل $S_x = 2.5D$ و فاصله قائم دو تونل $S_y = 2D$ می‌باشد ($\alpha = 39^\circ$). شکل ۱۷-۲ و ۱۸-۲ و ۱۹-۲ تاثیر موقعیت تونل‌ها و روش ساخت آن‌ها را به ترتیب در میزان نشست، گشتاور خمشی و فشار محوری نشان می‌دهد.



شکل ۱۷-۲ میزان نشست در سطح زمین برای حالت‌های شیب‌دار (Chehade, Shahrour, 2007)

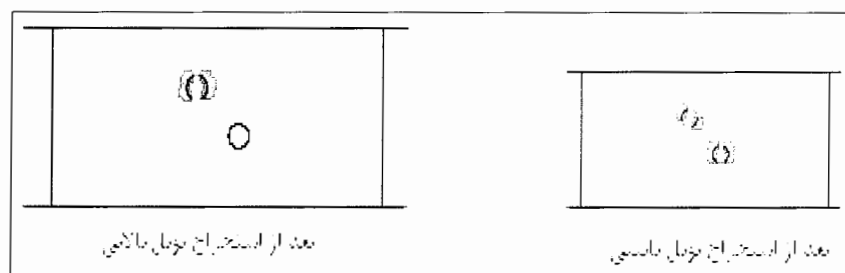


شکل ۱۸-۲ میزان گشتاور خمشی در پوشش تونل بالایی برای حالت‌های مختلف شیب دار (Chehade, Shahrour, 2007)

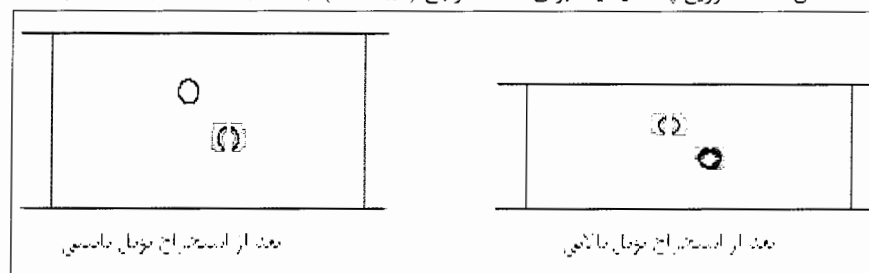


شکل ۱۹-۲ میزان فشار محوری در پوشش تونل بالایی برای حالت‌های مختلف شیب دار (Chehade, Shahrour, 2007)

اگر تونل پایینی ابتدا استخراج شود (حالت معکوس) میزان نشست از حالتی که تونل بالایی ابتدا حفر شود (حالت مرجع) بیشتر است. گشتاور خمشی و فشار محوری در تونل بالایی تأثیر متوسطی دارند. همچنین تأثیر ساخت تونل بر توزیع پلاستیسیته برای حالت $(\alpha = 45)$ در شکل‌های ۲۰-۲ و ۲۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۰ توزیع پلاستیسیته برای حالت مرجع ($\alpha = 45$) (Chehade, Shahrour, 2007)



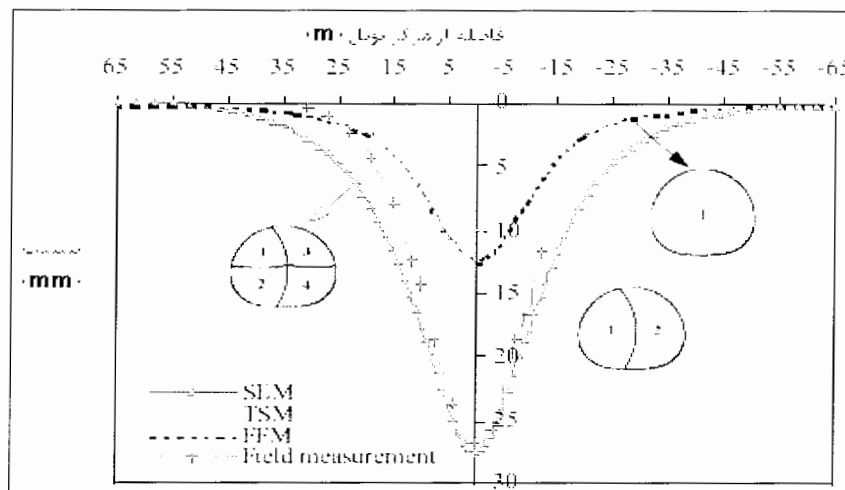
شکل ۲-۲۱ توزیع پلاستیسیته برای حالت معکوس ($\alpha = 45$) (Chehade, Shahrour, 2007)

همان طور که در شکل‌های ۲-۱۳ و ۲-۱۴ نشان داده شده در می‌یابیم که در حالتی که اگر تونل پایینی ابتدا استخراج شود (حالت معکوس) میزان پلاستیسیته بیشتری داریم. یک مطالعه مقایسه‌ای نشان می‌دهد که روش ساخت (برمبنایی که کدام تونل ابتدا حفر شود) بر نشست خاک و گشتاور خمشی تأثیر دارد. ایجاد تونل بالایی در ابتدا منجر به این می‌شود که میزان نشست خاک و گشتاور خمشی بیشتری داشته باشیم. در حالت قائم میزان نشست از حالت افقی بیشتر می‌باشد. ولی گسترش عرضی حالت افقی از حالت قائم بیشتر می‌باشد. در طراحی تونل‌های دوقلو باید به محدودیت‌های وابسته به محیط و تراکم زیرزمینی توجه کنیم.

د: تأثیر استخراج مرحله‌ای بر ماکزیمم نشست

- مقایسه نتایج استخراج مرحله‌ای در یک تونل

منحنی نشست عرضی حفاری چند مرحله‌ای^۱ (SEM) در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده است. همان طور که می‌بینیم نتایج SEM با نتایج واقعی هم خوانی دارد.



شکل ۲-۲۲ منحنی نشست عرضی در حالت‌های مختلف حفاری چند مرحله‌ای (Karakus, 2007)

ماکزیمم میزان نشست در SEM برابر ۲۷/۵ میلی‌متر، در حالی که ماکزیمم میزان نشست در حالت واقعی برابر ۲۶/۸ میلی‌متر می‌باشد که در این دو مقدار تفاوت چندانی وجود ندارد. بر عکس در حالت حفاری دو مرحله‌ای^۲ (TSM) و یا حفاری در یک مرحله^۳ (FFM) میزان نشست به ترتیب برابر ۹/۹ میلی‌متر و ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. که در این دو حالت میزان نشست از حالت واقعی خیلی کمتر است. از این آنالیزها در می‌یابیم که نحوه استخراج بر میزان نشست تأثیر زیادی دارد و حفاری چند مرحله‌ای بهترین نتایج را در تعیین میزان نشست بدست می‌آورد.

^۱ Sequential excavation model

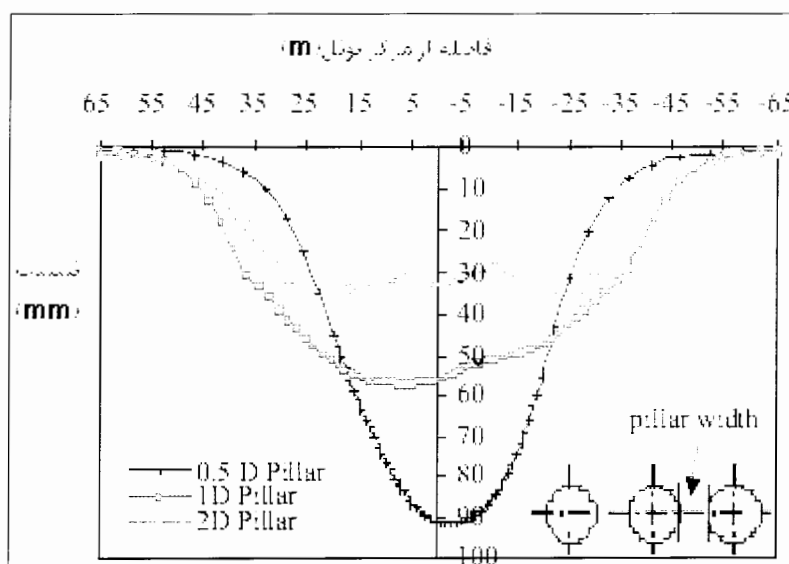
^۲ Two-stage excavation model

^۳ Full-face excavation model

• مقایسه نتایج استخراج مرحله‌ای در تونل‌های چند تایی

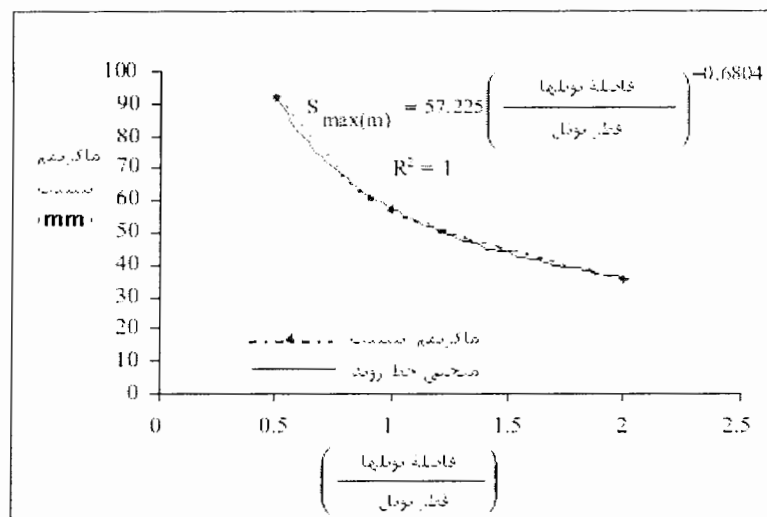
شکل ۲-۲۳ میزان نشست در سطح زمین برای تونل‌های چند تایی با فاصله متفاوت را

نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۳ میزان نشست در سطح زمین برای تونل‌های چند تایی با فاصله متفاوت (Karakus, 2007)

در نتایج استخراج مرحله‌ای در یک تونل مشاهده شد که هر چه مراحل استخراج بیشتر باشد، نتایج به دست آمده از روش‌های عددی در تعیین میزان نشست، با نتایج واقعی هم خوانی بیشتری دارد. این آنالیز در به دست آوردن میزان نشست در تونل‌های چندتایی از حفاری چهار مرحله‌ای استفاده شده است. این شبیه‌سازی شامل ۲۷ مرحله می‌باشد. در شکل ۲-۲۴ ارتباط بین ماکزیمم نشست و فاصله تونل‌ها نشان داده شده است. سه فاصله برای این آنالیز در نظر گرفته شده است (0.5D, D, 2D).



شکل ۲-۲۴ ارتباط بین ماکزیمم نشست و فاصله تونل‌های چند تایی (Karakus, 2007)

• ارزیابی نتایج در اثر حفر تونل‌های چندتایی

در شکل ۲-۲۳ میزان نشست در سطح زمین برای تونل‌های چند تایی با افزایش فاصله تونل‌ها کاهش می‌یابد. اگر فاصله تونل‌ها بیش از اندازه زیاد باشد (بیشتر از دو برابر قطر تونل) تأثیر هر تونل بر دیگری خیلی کمتر می‌شود تا این که متوقف می‌شود، و میزان نشست فقط در بالای مرکز هر تونل به وجود می‌آید. در فاصله 2D مقدار ماکزیمم نشست برابر ۳۵/۷ میلی‌متر می‌باشد. اگر چه در این مدل (حالت 2D) گود نشست کمتری نسبت به حالتی که فاصله دو تونل برابر D باشد ایجاد می‌شود. همچنین در حالتی که فاصله دو تونل برابر 0.5D باشد منحنی گستردگی کمتر از دو حالت قبلی دارد، ولی میزان نشست بیشتری نسبت به آن دو دارد. در شکل ۲-۲۴ رابطه‌ای بین ماکزیمم نشست و فاصله تونل‌ها نشان داده شده است. این رابطه می‌تواند به فرمول زیر تبدیل شود:

$$S_{\max} = 2S_{\max(s)} \left(\frac{W_p}{D} \right)^{-0.6804} \quad 2-24$$

W_p : فاصله تونل‌ها (بر حسب متر)

D : قطر تونل (بر حسب متر)

$S_{\max(s)}$: ماکزیمم نشست در یک تونل (بر حسب میلی‌متر)

$S_{\max}$: ماکزیمم نشست در سطح زمین (بر حسب میلی‌متر)

به جای ضریب ۵۷/۲۲۵ در رابطه ۲-۲۱ می‌توان $2S_{\max(s)}$ را جایگزین کرد (Karakus , 2007).

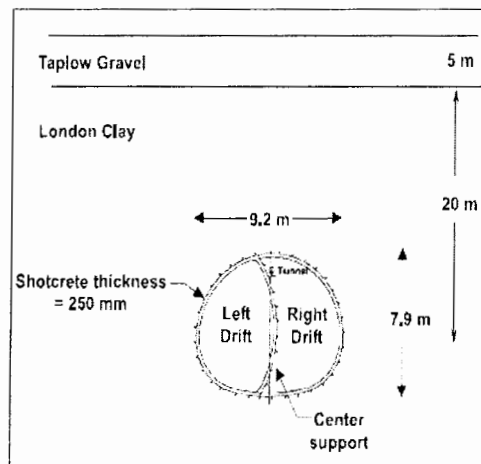
ه: بر هم کنش تونل‌های دوقلو با استفاده از روش‌های عددی سه بعدی

در این آنالیز، تأثیر فاصله تأخیر بین جبهه کار دو تونل (L_T) را روی بردارهای جابجایی ذرات خاک در جهت‌های افقی و قائم نشان داده شده است. همچنین تأثیر L_T بر میزان نشست و گشتاور خمشی در تونل‌های دوقلو بررسی شده است. ابتدا به شرح روش انجام آنالیز پرداخته و سپس تأثیر L_T را بر هر یک از پارامترهای مذکور بررسی می‌کنیم.

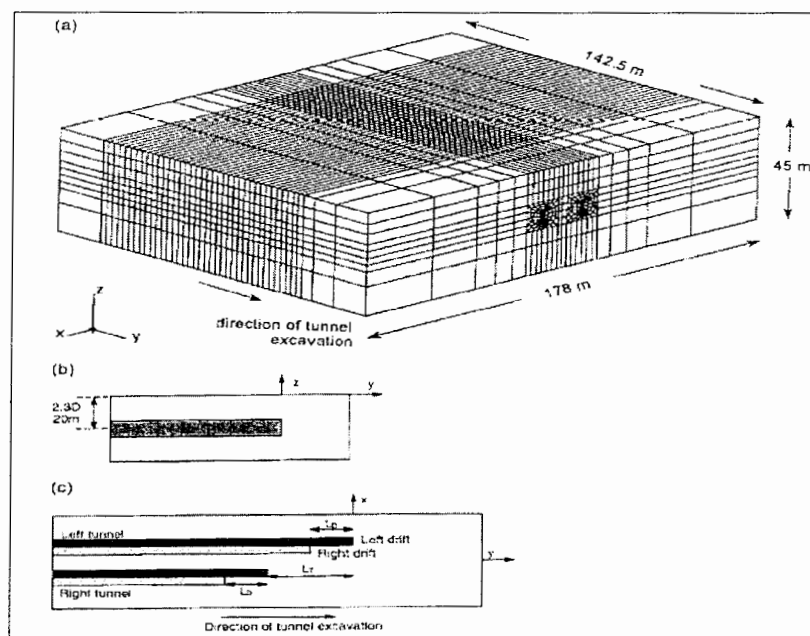
روش انجام آنالیز

مقطع عرضی تونل در شکل ۲-۲۵ و در شکل ۲-۲۶ مدل ساخته شده در نرم افزار $Flac^{3D}$

نشان داده شده است. نرم افزار $Flac^{3D}$ برای مدلسازی عددی در سه بعد کاربرد دارد.



شکل ۲-۲۵ مقطع عرضی تونل Heathrow (Lee, Tang, 2004)



شکل ۲-۲۶ مشاهده نمای سه بعدی مدل و پلان‌های مدل (Lee, Tang, 2004)

پس از ایجاد مدل در نرم افزار $Flac^{3D}$ ، توالی مراحل استخراج به صورت ایده‌آل به شرح زیر

می‌باشد:

۱. حفر قسمت سمت چپ تونل اول (تونل سمت راست)

۲. نصب شاتکریت در منطقه بدون پوشش و رها کردن پنج متر بدون نگهداری در پشت

جبهه کار تونل ($L_{II}=5$)

۳. حفر قسمت سمت راست تونل اول با فاصله ۲۰ متر تأخیر از قسمت اول

۴. نصب شاتکریت در منطقه بدون پوشش و رها کردن پنج متر بدون نگهداری در پشت

جبهه کار تونل ($L_{II}=5$)

۵. حفر قسمت سمت چپ تونل دوم (تونل سمت چپ)

۶. نصب شاتکریت در منطقه بدون پوشش و رها کردن پنج متر بدون نگهداری در پشت

جبهه کار تونل ($L_{II}=5$)

۷. حفر قسمت سمت راست تونل دوم با فاصله ۲۰ متر تأخیر از قسمت اول

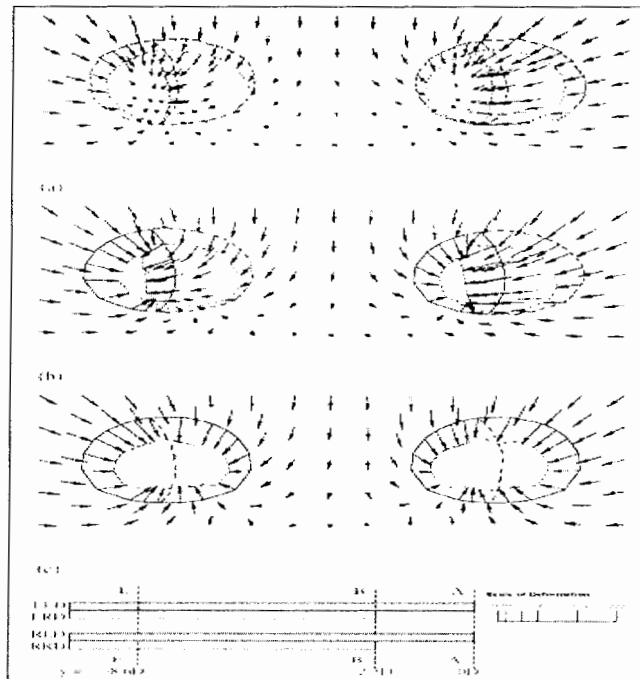
۸. نصب شاتکریت در منطقه بدون پوشش و رها کردن پنج متر بدون نگهداری در پشت

جبهه کار تونل ($L_{II}=5$)

۹. تکرار مراحل ۱ تا ۸

در شکل ۲-۲۷ بردارهای جابجایی در بین دو تونل موازی برای حالتی که $L_I = 0$ می‌باشد، نشان

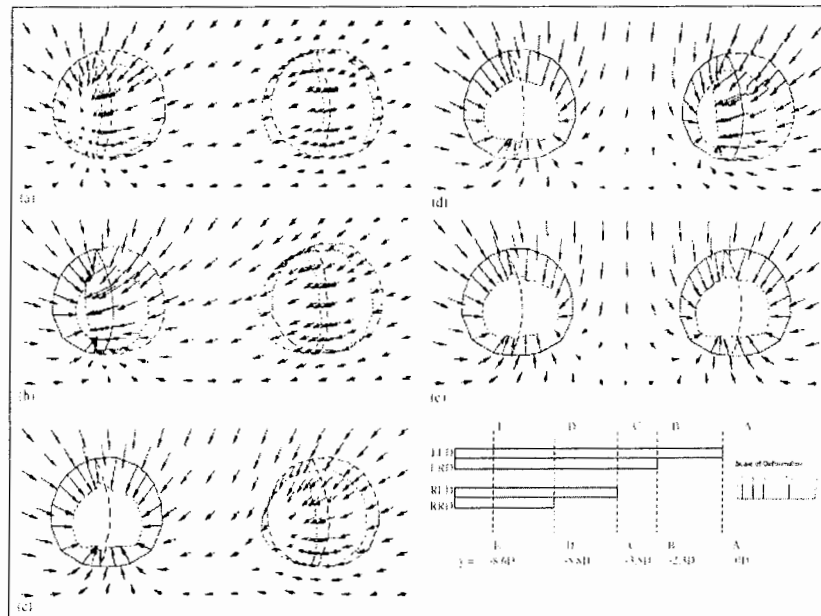
داده شده است.



شکل ۲۷-۲ بردارهای جابجایی اطراف تونل‌ها برای حالتی که $L_T = 0$ در مقاطع مختلف (Lee, Tang, 2004)

در شکل ۲۷-۲ a که $y = 0D$ می‌باشد، بردارهای جابجایی تقریباً حالت متقارن دارند. واضح است که ذرات خاک به سمت چپ هر تونل حرکت می‌کنند. این حالت به علت تغییرات تنش در اثر حفاری به وجود می‌آید. در قسمت بین دو تونل به خاطر برهم کنش تونل‌ها جهت بردارهای جابجایی به سمت پایین می‌باشد. این برهم کنش همچنین موجب می‌شود که در قسمت سمت چپ تونل اول حدود ۵۰ درصد جابجایی‌ها بیشتر از سمت چپ تونل دوم باشد. برعکس، جابجایی در سمت راست تونل دوم حدود دو برابر جابجایی در سمت راست تونل اول می‌باشد. در نتیجه در می‌یابیم که برهم کنش تونل‌ها باعث کاهش جابجایی در بین آن‌ها می‌شود. در شکل‌های ۲۷-۲ b و ۲۷-۲ c که در آن‌ها به ترتیب $y = 20$ و $y = 75$ می‌باشد جهت بردارهای جابجایی نشان داده شده است. در حالت c به مقدار $43/6$ میلی‌متر به عرض بین دو تونل اضافه می‌شود. در شکل ۲۸-۲

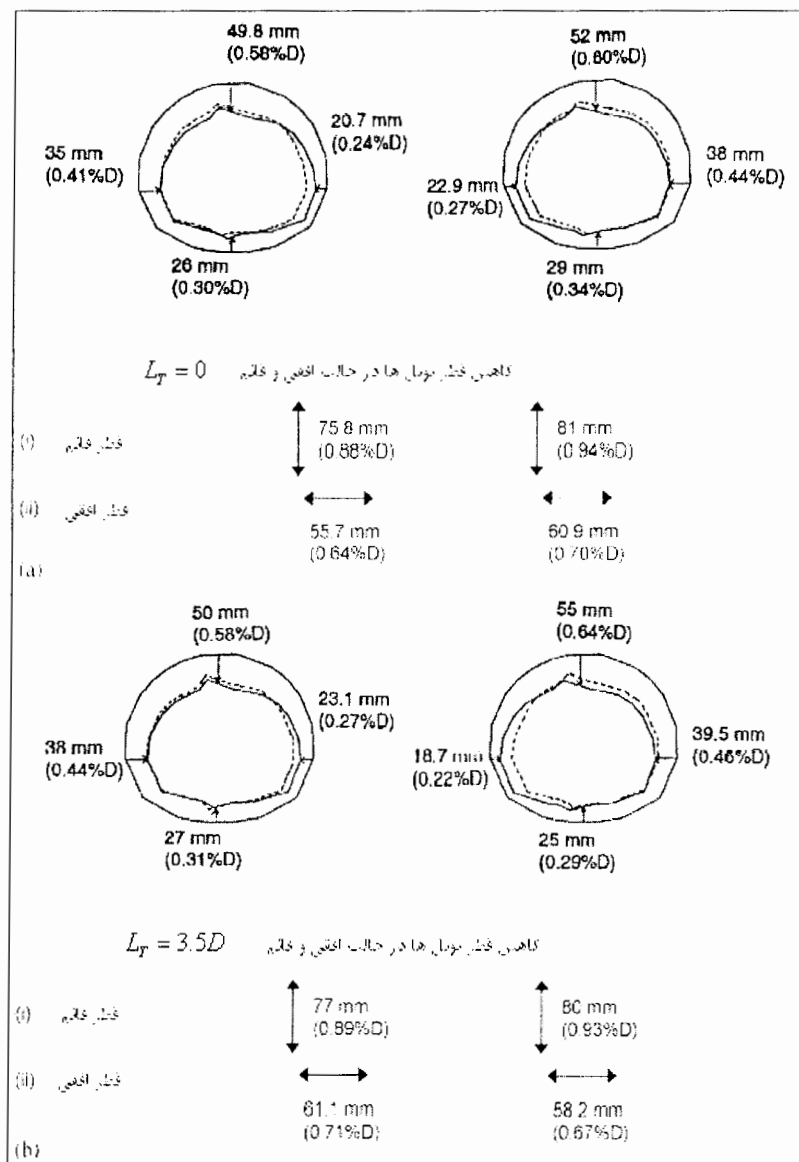
بردارهای جابجایی در بین دو تونل موازی برای حالتی که $L_T = 3.5D$ می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۸ بردارهای جابجایی اطراف تونل‌ها برای حالتی که $L_T = 3.5D$ در مقاطع مختلف (Lee, Tang, 2004)

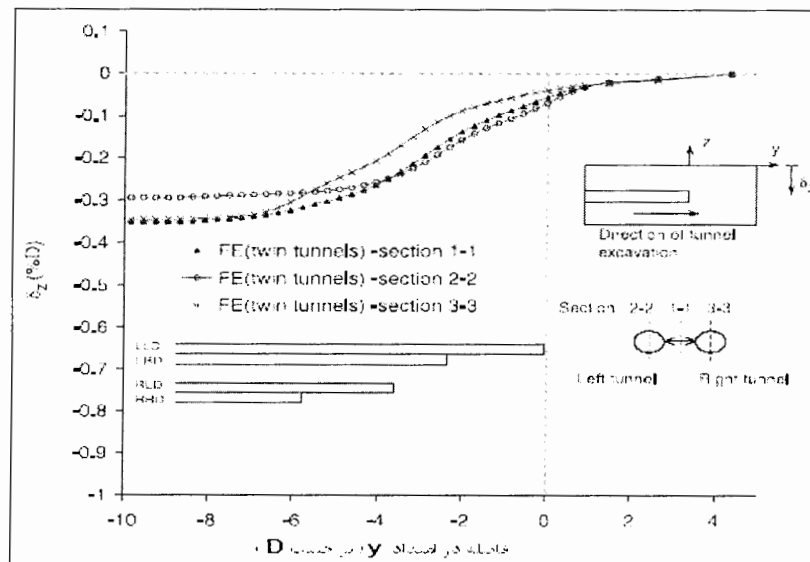
در حالت a در شکل ۲-۲۸ بردارها به سمت چپ تونل اول کشیده شده است. در این حالت L_T تأثیر بیشتری بر روی جابجایی‌های افقی دارد و تأثیر تنش افقی در جابجایی خاک اهمیت بیشتری نسبت به تنش قائم دارد یعنی اثر مهمی در کاهش قطر افقی تونل‌ها دارد. این تأثیرها در شکل ۲-۲۹ نشان داده شده است. در شکل ۲-۲۹ تغییر شکل اطراف تونل‌ها برای حالتی که $L_T = 0$ و $L_T = 3.5D$ باشد، نشان داده شده است. در قسمت سمت راست تونل اول برای حالت $L_T = 0$ ، جابجایی از ۲۰/۷ به ۲۳/۱ در حالت $L_T = 3.5D$ ، افزایش پیدا کرده است (۱۱/۵ درصد افزایش). در قسمت سمت چپ تونل دوم برای حالت $L_T = 0$ ، جابجایی از ۲۲/۹ به ۱۸/۷ در حالت

$L_T = 3.5D$ ، کاهش پیدا کرده است (۱۱/۵ درصد کاهش). همچنین میزان جابجایی‌های قائم و افقی در اثر افزایش مقدار L_T از ۰ به ۳۰ متر در تونل اول در هر دو حالت افزایش و در تونل دوم در هر دو حالت کاهش یافته است.



شکل ۲-۲۹ تغییر شکل اطراف تونل‌ها برای حالتی که $L_T = 0$ و $L_T = 3.5D$ (Lee, Tang, 2004)

در شکل ۲-۳۰ میزان نشست در حالت $L_T = 3.5D$ در مقاطع مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲-۳۰ پروفیل نشست در حالت $L_T = 3.5D$ در مقاطع مختلف طولی (Lee, Tang, 2004)

همان طور که در این شکل نشان داده شده است، میزان نشست در مقطع ۲-۲ (تونل سمت

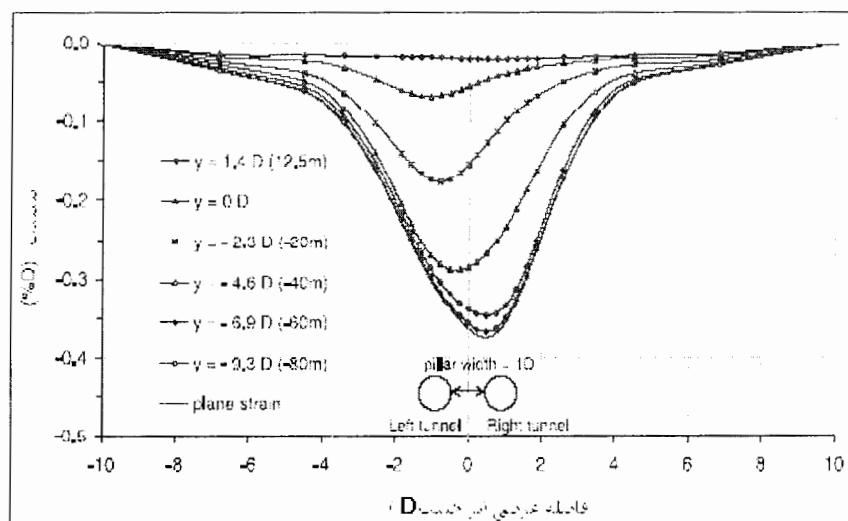
چپ) در فاصله $4D$ - برابر $0.29/25$ میلی‌متر) می‌باشد. در مقطع ۱-۱ (بین دو تونل) تا فاصله D

$3/5$ - شبیه منحنی نشست مقطع ۲-۲ می‌باشد. در مقطع ۳-۳ منحنی نشست تا فاصله $5/8D$ -

مقدار آن کمتر از دو مقطع قبلی می‌باشد ولی از این فاصله به بعد مقادیر نشست مشابه مقادیر

نشست در مقطع ۱-۱ (بین دو تونل) می‌باشد. همچنین در شکل ۲-۳۱ میزان نشست در حالت

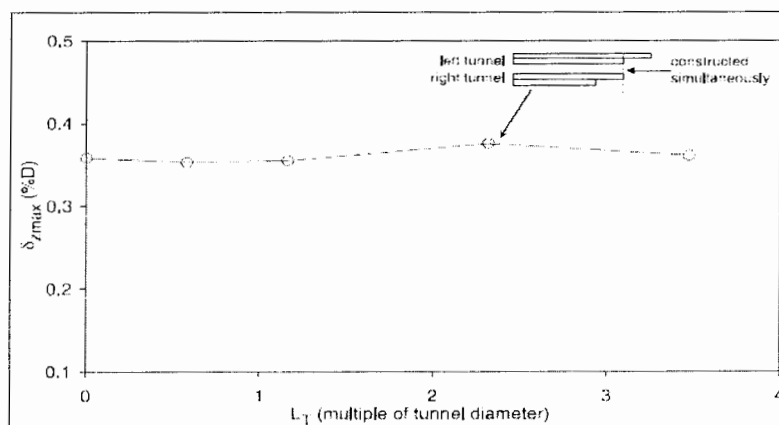
$L_T = 3.5D$ در مقاطع مختلف عرضی نشان داده شده است.



شکل ۳۱-۲ میزان نشست در حالت $L_T = 3.5D$ در مقاطع مختلف عرضی (Lee, Tang, 2004)

با توجه به شکل ۳۱-۲ و ۳۲-۲ در می‌یابیم که مقدار ماکزیمم نشست در L_T متفاوت تقریباً ثابت

می‌باشد و فقط منحنی نشست به سمت چپ یا سمت راست منتقل می‌شود.



شکل ۳۲-۲ میزان ماکزیمم نشست در L_T های متفاوت (Lee, Tang, 2004)

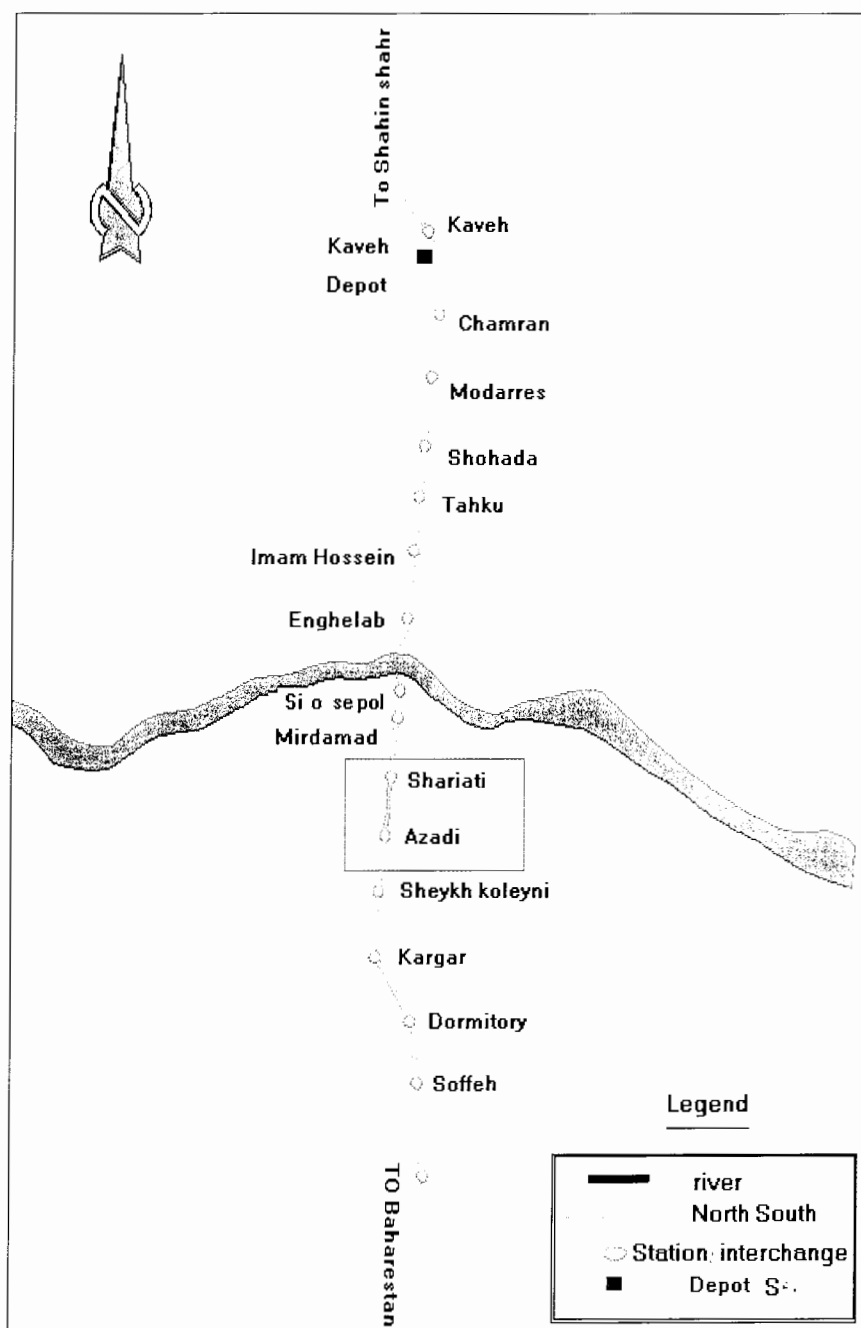
فصل سوم:

زمین‌شناسی منطقه

۳-۱ مقدمه

شهرستان اصفهان در بخش مرکزی ایران، در طول جغرافیایی 40° و 51° شرقی و عرض جغرافیایی 38° و 32° شمالی قرار داشته و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۵۷۵ متر است. رودخانه زاینده رود با طول تقریبی ۴۰۵ کیلومتر از کوه‌های زاگرس سرچشمه گرفته و از وسط این شهر عبور می‌کند. با توجه به موقعیت اقتصادی، تجاری، صنعتی و جاذبه گردش‌گری این شهر، توسعه سیستم حمل و نقل عمومی و بهبود وضعیت ترافیکی آن اجتناب ناپذیر می‌باشد. جمعیت جوان این شهر از یک سو و افزایش تعداد وسائل نقلیه، ترافیک شهری و آلودگی هوا از سویی دیگر باعث شده تا احداث خطوط مترو برای ساماندهی به وضعیت ترافیکی در دستور کار مسئولین قرار گیرد. بر اساس مطالعات صورت گرفته، در مجموع سیستم قطار شهری اصفهان شامل پنج خط می‌باشد که در مرحله اول خط شمالی - جنوبی احداث خواهد شد. این خط از ترمینال مسافربری کاوه شروع شده و به ترمینال مسافربری صوفه ختم می‌گردد. طول کل مسیر ۱۲/۵ کیلومتر است که حدود ۱۲ کیلومتر آن زیرزمینی بوده و در طول آن ۱۵ ایستگاه احداث خواهد شد (مهندسين مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

در شکل ۳-۱- مسیر خط شمال به جنوب اصفهان و ایستگاه‌های مربوطه نشان داده شده است. در حد فاصل ایستگاه شریعتی - ایستگاه آزادی، تونل‌ها به صورت دو قلو اجرا خواهند شد.



شکل ۳-۱- مسیر خط شمال به جنوب اصفهان و ایستگاه‌های مربوطه (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵)

۳-۲ زمین شناسی عمومی

به طور کلی توده سنگ میزبان تونل‌ها و مسیر مترو از لایه‌های شیلی و ماسه سنگی تشکیل شده است که در زمین شناسی ایران به نام سازند شمشک خوانده شده و دارای سن ژوراسیک می‌باشد. این شیل‌ها در اعماق مختلف خواص متفاوتی از خود نشان داده‌اند و توسط آبرفت‌های عهد حاضر پوشیده شده‌اند. ضخامت آبرفت در نقاط مختلف قطعه مورد بررسی متغیر می‌باشد به طوری که از شمال به جنوب ضخامت آن کاهش یافته و سنگ بستر شیلی به سطح زمین نزدیکتر می‌شود (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

۳-۲-۱ سنگ بستر

سنگ بستر در محدوده مورد مطالعه در سازند شمشک قرار گرفته است. این سازند کم و بیش در همه جای ایران جز زاگرس و مکران شناسایی شده و کم و بیش سنگ رخساره آن یک محیط رسوبی کم عمق کولابی - دریاکناری را مشخص می‌کند. به علت وجود لایه‌های زغال سنگی در سازند شمشک، این سازند مورد توجه ویژه‌ای قرار داشته است هر چند که گستردگی زغال سنگ سازند در محدوده مورد مطالعه چندان فراگیر نیست.

بر پایه ویژگی‌های فیزیکی لایه‌ها (رنگ، ضخامت و تغییرات جانبی لیتولوژی)، چیره بودن شیل‌ها یا ماسه سنگ‌ها و همچنین تناوب این دو نوع سنگ در سازند شمشک یک ناحیه، می‌توان بخش‌های مختلفی از این سازند را جدا کرد. جنس شیل‌ها و ماسه سنگ‌ها نیز در همه جا یکسان نیست و تغییراتی در آن‌ها وجود دارد که از دیدگاه مهندسی و کارهای اجرایی سازه‌ها در خور اهمیت‌اند. در طول مسیر عبور قطار در قطعه مورد بررسی، لیتولوژی از نظر میزان ماسه سنگ و

شیل متفاوت است بطوری که سازند شمشک در میدان آزادی به طور کلی شیلی است و لایه‌های ماسه سنگی آن کمتر از ۳۰ درصد واحد را در بردارد به نحوی که عملاً جداسازی آن‌ها غیرممکن بوده است. شیل‌های سنگ بستر در دو نوع تیره و روشن مشاهده شده اند. شیل‌های روشن خاکستری روشن مایل به سبز یا کرم-قهوه ای که بسیار نازک لایه بوده و در سطح زمین دچار هوازدگی شدیدی شده اند (Shl) و شیل‌های تیره رنگ تا سیاه که مانند شیل‌های روشن بسیار نازک لایه می‌باشد و حالت گرافیتی نیز در آن‌ها دیده شده است (Shd). تفاوت رنگ این واحدها به دلیل اختلاف در مقدار مواد آلی و کانی‌های فلدسپات و یا کوارتز می‌باشد. علاوه بر رنگ، دو واحد فوق از نظر مقاومت نیز با هم متفاوتند، به طوری که شیل‌های تیره رنگ به دلیل کمتر بودن درصد ماسه، سست‌تر می‌باشند (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

بررسی آزمایش‌های انجام شده در سنگ‌های شیلی قطعه آزادی - ترمینال صفه

مطابق گزارش "زمین شناسی قطعه آزادی - ترمینال صفه" پارامترهای ژئومکانیکی برآورد شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد پارامترهای منظور شده برای توده سنگ بستر در قطعه میدان آزادی - شریعتی، دارای اعتبار کافی است و در محدوده نتایج توده سنگ‌های مشابه قرار دارد. این پارامترها مبنای محاسبات پایداری و طراحی سیستم نگهداری بوده و ضریب ایمنی مناسبی برای طراحی‌ها دربرخواهد داشت، لذا بر اساس این بررسی‌ها می‌توان با اطمینان کافی مقادیر پیشنهادی زیر را به عنوان پارامترهای طراحی در بخش سنگی به کار گرفت (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

جدول ۳-۱- جمع بندی پارامترهای ژئوتکنیکی برای محاسبات بخش سنگی (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵)

پیشنهاد مشارکت	گروه	بررسی قسمت های حفر شده	شرکت آزمون فولاد	شرکت زمین فن	پارامتر
۱۱۰		۱۰۰	۱۴۰	۸۰	C (KPa)
۴۰		۴۵	۲۶	۴۷	ϕ (deg)
۱/۲۵		۱/۲۳	۱/۱۹	۱/۳۲	Em (GPa)
۲/۶		۲/۶	۲/۶	۲/۶	γ_t (gr/cm ³)
۰/۳		۰/۳	۰/۳	۰/۳	ν

۳-۲-۲ رسوبات آبرفتی

آبرفت‌های این منطقه از رسوبات آبرفتی دامنه‌ای تشکیل شده است. این آبرفت‌ها حاصل فرسایش ارتفاعات جنوبی شهر اصفهان و جابجائی مواد فرسایش یافته به وسیله آب و در نهایت ته نشینی آن‌ها در دامنه‌های ارتفاعات می‌باشد که حدوداً بعد از ایستگاه سی و سه پل، به سمت جنوب، در زیر رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای آشکار می‌شود. این رسوبات، در جهت جنوب، به تدریج به سطح زمین نزدیک شده، در حوالی ایستگاه شریعتی به طور بین انگشتی جایگزین رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای می‌شود. ساخت‌گاه ایستگاه شریعتی در این رسوبات قرار دارد و به علاوه نیمه بالایی تونل در حد فاصل ایستگاه‌های شریعتی و میدان آزادی، در این رسوبات حفر خواهد شد (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵). رسوبات آبرفتی دامنه‌ای که در منطقه اصفهان به "خاک سرخه" موسوم است، از اجزای درشت دانه (شن و ماسه)، اغلب نیمه زاویه‌دار و از ماسه سنگ تشکیل شده که در زمینه‌ای از رسوبات ریزدانه (لای و رس) قرار گرفته است. این رسوبات به صورت متراکم و یا کمی سیمانی می‌باشند. ضخامت رسوبات آبرفتی دامنه‌ای در محدوده ایستگاه شریعتی - ایستگاه آزادی بسیار متفاوت بوده و از حداقل ۱/۵ متر در گمانه شماره ۴ تا حداکثر ۱۲/۵ متر تغییر می‌نماید.

۳-۲-۳-۱ خاک‌های دستی

خاک دستی در شهر اصفهان اغلب از خاک‌های ریزدانه تشکیل یافته است ولی در برخی مقاطع و عمق‌ها به صورت درشت دانه ظاهر می‌شود. وجود نخاله‌های ساختمانی و نیز موادی مانند سفال شکسته، از مشخصه‌های خاک دستی در محدوده طرح می‌باشد.

بطور کلی پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک در وهله اول ابتدا توسط آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. نکته قابل توجه در این آزمایش‌ها این است که علاوه بر خطاهای هنگام آزمایش، نمونه‌هایی که بر روی آن‌ها آزمایش انجام می‌شود محدود و کوچک بوده و تنها معرف بخش بسیار کوچکی از توده خاک مورد بررسی خواهند بود. نمونه‌گیری بصورت دست خورده انجام می‌گیرد که نتایج حاصل از آن نمی‌تواند معرف خواص واقعی خاک برجا باشد. در این مواقع می‌توان با استفاده از شواهد موجود و استفاده از آزمایش‌های انجام گرفته در محدوده پروژه خواص ژئوتکنیکی و مقاومتی توده خاک محدوده مورد مطالعه را بررسی نمود.

جدول‌های ۲-۳ و ۳-۳ نتایج حاصل از بررسی‌های فوق را به منظور مقایسه و انتخاب مناسب‌ترین پارامترهای مقاومتی خاک دستی و آبرفت موجود در محدوده اجرای پروژه قطعه میانی متروی اصفهان، نشان می‌دهد. در این جدول علاوه بر ارائه نتایج فوق، دو ستون به ترتیب شامل پیشنهاد‌های شرکت مهندسی مشاور سازین پژوه مندرج در اسناد مرحله مناقصه پروژه و در ستون آخر نیز پیشنهاد گروه مشارکت در مورد پارامترهای ژئوتکنیکی خاک موجود در محدوده مورد مطالعه، به عنوان جمع بندی ارائه شده است (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

جدول ۳-۲- پارامترهای ژئوتکنیکی خاک دستی در محدوده طرح (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵)

پارامتر	زمین فن آوران	آزمونه فولاد	سازبن پژوه	حداقل محتمل (آنالیز معکوس)	پیشنهاد گروه مشارکت
C (kg/cm ²)	۰/۱-۰/۲	۰/۱	۰/۱۵	-	۰/۱۵
ϕ (deg)	۲۲-۲۴	۲۷	۲۳	-	۲۵
Em (kg/cm ²)	۷۳-۳۵۰	۲۳۵	۱۵۰	-	۲۰۰
γ_t (gr/cm ³)	۲/۱۵	۲/۱	۱/۸	-	۲/۰
ν	۰/۲۵-۰/۳	۰/۳	۰/۳۵	-	۰/۳

جدول ۳-۳- پارامترهای ژئوتکنیکی خاک آبرفت در محدوده طرح (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵)

پارامتر	زمین فن آوران	آزمونه فولاد	سازبن پژوه	حداقل محتمل (آنالیز معکوس)	پیشنهاد گروه مشارکت
C (kg/cm ²)	۰/۳-۰/۷	-	۰/۵	>۰/۶	۰/۵
ϕ (deg)	۳۰-۴۰	-	۳۵	>۳۱-۳۲/۵	۳۵
Em (kg/cm ²)	۴۰۰-۱۰۰۰	-	۸۰۰	>۴۲۰	۶۵۰
γ_t (gr/cm ³)	۲/۱۵	۲/۱	۲/۱۵	-	۲/۱
γ	۰/۳-۰/۲۵	۰/۳	۰/۳	-	۰/۳

۳-۳ زمین شناسی ساختمانی

ساخترهای زمین شناسی شامل گسل، درزه، لایه بندی و چین خوردگی می باشد که در این

بخش بطور اجمالی به آن ها پرداخته می شود.

۳-۳-۱ گسل ها

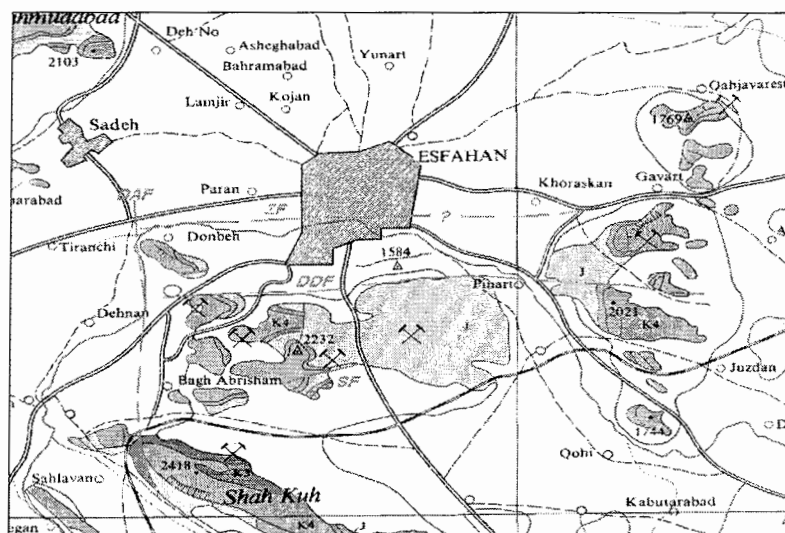
بر پایه بررسی های سطحی پیرامون شهر اصفهان، دو روند مشخص گسلی در مورد ساختار

زمین شناسی وجود دارد که در شکل ۳-۲ نشان داده شده، عبارتند از:

- گسل های شرقی - غربی به نام گسل های صفه، دنبه، دستگرد و زاینده رود (روند EW)

- گسل شمالی - جنوبی به عنوان دهنان - آتشفگاه که رودخانه زاینده رود در راستای آن از جنوب به شمال و بعد به سمت شرق در راستای گسل‌های شرقی - غربی ادامه یافته است (روند NS).

با توجه به اینکه قطعه A-SH (آزادی - شریعتی) در فاصله میان گسل‌های با روند EW می‌باشد، بنابراین در صورت مشخص شدن و احتمال وجود گسل، می‌توان آنرا از نوع روندهای EW به شمار آورد که گسل‌های عادی می‌باشند.



شکل ۳-۲- وضعیت قرارگیری گسل‌ها و روند آن‌ها بر روی نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ اصفهان (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵)

در شکل ۳-۲ گسل‌های اصلی به شرح زیر می‌باشد:

- DDF : گسل دنبله - دستگرد (روند شرقی - غربی)
- SF : گسل صفه (روند شرقی - غربی)
- ZF : گسل زاینده رود (روند شرقی - غربی)

• DAF : گسل دهنان - آتشگاه (روند شمالی - جنوبی)

با توجه به این که گسل‌های شرقی - غربی درصد بیشتری از گسل‌های منطقه را تشکیل می‌دهند لذا ساختار زمین‌شناسی در قطعه آزادی - شریعتی قطار شهری اصفهان به طور کلی روند شرقی - غربی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به پوشیده بودن سطح زمین، هیچ گسلی در مسیر مورد نظر و مکان‌هایی که حفاری صورت گرفته است، قابل تشخیص نبوده است (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

۳-۳-۲ درزه‌ها و لایه بندی

شیب و جهت شیب لایه‌ها (به طور میانگین) به صورت 020/65 مشخص شده است که در واقع بسوی شمال (ایستگاه شریعتی) شیب دارند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که رسوبات آبرفتی، فاقد ناپیوستگی مشخصی است در حالی که بستر سنگی شامل سه دسته درزه می‌باشد. فاصله‌داری درزه‌ها در شیل‌ها در حد خیلی پائین (کمتر از ۶ سانتی متر) و دهانه درزه‌ها بصورت بسته می‌باشد. درزه‌ها اغلب فاقد پرکننده، سطح آن‌ها معمولاً دارای زنگ‌زدگی و به صورت هموار تا زبر می‌باشد.

۳-۳-۳ چین خوردگی

رسوبات آبرفتی گستره طرح فاقد چین خوردگی است درحالی که لایه‌های سنگ بستر چین خورده می‌باشند. منطقه مورد بررسی در یال ناودیس واقع شده که با محور شرقی - غربی که در نزدیکی رودخانه زاینده‌رود قرار دارد. شیب و جهت شیب لایه بندی در این یال ۲۰/۶۵ بوده و با نزدیک شدن به محور ناودیس اندازه شیب کاهش می‌یابد.

۳-۴ زمین شناسی مهندسی

۳-۴-۱ لیتولوژی کلی توده سنگ

واحد اصلی لیتولوژی در محل ساخت‌گاه از شیل‌های خاکستری روشن و شیل‌های تیره تا سیاه رنگ سازند شمشک تشکیل شده است. از دیدگاه زمین شناسی مهندسی می‌توان این دو واحد را به عنوان یک واحد تک لیتولوژی (Monolithic type) به شمار آورد و ماسه سنگ‌های آن را که طبق مطالعات پیشین حدود ۱۵ درصد است نادیده انگاشت. این دو واحد با نشانه Shd و Shl به ترتیب برای شیل‌های روشن رنگ و تیره رنگ مشخص شده است.

۳-۴-۲ ویژگی‌های زمین شناسی مهندسی واحد شیلی (حد فاصل آزادی - شریعتی)

در بررسی‌های انجام شده در رخنمون‌ها و پی‌کنی در میدان آزادی و همچنین در گمانه‌های حفر شده، ویژگی‌های زمین شناسی مهندسی بر پایه توصیه‌های IAEG و ISRM مشخص شده است که به شرح زیر است (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵):

- ۱- **اندازه بلوک^۱:** جدایش و ریزش بلوک در توده سنگ به طور کلی و در حالت طبیعی به ناپیوستگی‌های آن بستگی دارد. در فضاهای زیرزمینی نیز کم و بیش می‌توان آن را مانند روی زمین مورد توجه قرار داد. تکه سنگ‌های فرو ریخته از این واحد خیلی کوچک اند.
- ۲- **مقاومت سنگ^۲:** مقاومت فشاری سنگ‌های سازند مذکور عبارتند از شیل‌های حاوی حدود ۱۵ درصد ماسه که مقاومت فشاری آن‌ها ۱۵ مگاپاسکال برآورد شده است.

^۱ Block size^۲ Rock Strength

- ۳- نفوذ پذیری^۱: نفوذپذیری توده سنگ به علت وجود شیل‌ها در عمل بسیار ناچیز است و می‌توان آن را نفوذناپذیر تا با نفوذپذیری بسیار کم در نظر گرفت.
- ۴- هوازدگی^۲: توده سنگ در برونزدها گاهی به شدت هوازده است و شیل‌های آن خاکواره می‌شوند اما شواهد نشان می‌دهد، در زیرزمین کیفیت توده سنگ بهتر می‌شود.
- ۵- فاصله شکستگی‌ها^۳: سه دسته درزه و لایه بندی در سازند شمشک شناخته شده است.
- ۶- ضخامت لایه‌ها^۴: به طور کلی نازک لایه است و ضخامت تک لایه‌ها از چند سانتیمتر تا چند دسی‌متر تغییر می‌کند که می‌توان مقدار میانگین آن را حدود ۰/۱۵ متر در نظر گرفت.

۳-۵ هیدروژئولوژی

آب‌های زیرزمینی یکی از مسایل مهم در احداث سازه‌های زیرزمینی از جمله تونل به شمار می‌روند. ممکن است با احداث تونل، بر دیواره‌ها و حتی تاسیسات داخل تونل به روش‌های مختلفی تاثیر گذاشته و موجب تخریب دیواره یا تاسیسات شود. شدت تاثیر آب زیرزمینی در هر سازه بستگی به حجم و کیفیت آب زیرزمینی و مدت تماس آن با سازه دارد.

آب زیرزمینی در هر نقطه از منطقه اشباع، فشاری در جهت کاهش وزن لایه‌ها اعمال می‌کند که این فشار معادل با بار ارتفاع سطح ایستابی از آن نقطه مورد نظر می‌باشد. بنابراین تغییرات سطح ایستابی در برخی نقاط ضعیف ممکن است موجب ناپایداری لایه‌های زمین شناسی شده و باعث بروز لغزش یا فرو ریزش لایه‌ها شود.

¹ Permeability

² Weathering

³ Fracture intercept

⁴ Thickness of layers

با توجه به این که آب زیرزمینی از طریق درزه و شکاف سنگ‌ها یا خلل و فرج بین دانه‌ای در خاک جریان می‌یابد، بنابراین در صورتی که تمام یا بخشی از تونل در زیر سطح ایستابی حفر شود، می‌توان آن را به صورت زهکش بزرگ آب زیرزمینی در آبخوان مربوطه تصور نمود که آب زیرزمینی در اطراف آن به سمت تونل جریان می‌یابد. در این مواقع، آب زیرزمینی به طور پیوسته از طریق درزه و شکاف دیواره وارد تونل شده و تاسیسات داخل آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

۳-۵-۱ هیدرولوژی محدوده مطالعاتی

با توجه به این که محدوده مطالعاتی جزء نواحی شهری به حساب می‌آید، لذا تأثیر پارامترهای هواشناسی از جمله باد، تبخیر، رواناب و... بر آب‌های زیرزمینی جزئی بوده و قابل صرف نظر هستند. نفوذپذیری سطحی و حجم آب آبیاری در پارک‌ها و گلخانه‌های طبیعی، چاه‌های بهره برداری و یا نشت آب‌های استخرها، خطوط انتقال آب شهری و دفع فاضلاب در این مناطق از اهمیت والایی برخوردار بوده و بر حجم آب زیرزمینی تأثیر گذار خواهند بود. حجم آب ورودی به تونل قطعه مورد مطالعه در مسیر طرح احداث تونل مترو، جزء مناطق شهری بوده و به دلیل عدم تعیین دقیق ابعاد آبخوان، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، روابط هیدرولیکی آبخوان‌ها و محیط‌های آزاد سطحی، مقادیر نشتی تاسیسات آب بر، ورودی و خروجی به آبخوان از طریق چاههای خانگی، دسترسی به معادله دقیق بیلان آب زیرزمینی این قطعه مشکل می‌باشد.

با توجه به اینکه تونل مترو قطعه A-SH تقریباً در زیر سطح ایستابی و در بخشی از آبخوان عظیم آبرفتی احداث می‌شود، لذا آب زیرزمینی به عنوان فاکتوری مزاحم در احداث تونل محسوب شده و باید جهت جلوگیری از وقفه کاری نسبت به کنترل ورود آن به تونل اقدام نمود. مطابق طرح اولیه تونل‌های مذکور، پس از حفاری، شاتکریت شده و از نفوذ آب زیرزمینی به تونل و ریزش‌های احتمالی مسیر تونل جلوگیری می‌شود. بنابراین آب زیرزمینی، تنها از سینه کار یا مقطع تونل و بخشی جزئی از دیواره‌های آزاد قابل نفوذ به داخل تونل می‌باشد.

با توجه به سطح جانبی دیواره‌های آزاد تونل، شرایط بحرانی آب ورودی به تونل در دو آبخوان آبرفتی و شیلی - ماسه سنگی با فرض موارد زیر خواهد بود.

۳-۵-۲ آبخوان آبرفتی

برای تعیین حداکثر مقدار آب ورودی از آبخوان آبرفتی به تونل، باید شرایط ویژه ای در نظر گرفته شود. بدین منظور آبخوان آبرفتی را به وسعت نامحدود فرض نموده و سطح ایستابی بالاتر از تاج تونل در نظر گرفته شده است. ضریب هدایت هیدرولیکی واحد آبرفتی در قطعه A-SH از حداقل $10^{-5} \times 0.1$ سانتی متر بر ثانیه تا حداکثر $10^{-5} \times 8/2$ سانتی متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. با توجه به این که نفوذپذیری نسبت مستقیم با دبی آب ورودی به تونل دارد، مقادیر حداکثر نفوذپذیری مشاهده شده در این آبخوان معادل $10^{-5} \times 8/2$ متر در ثانیه برای پیش بینی مقادیر آب ورودی به تونل در نظر گرفته شده است تا با نصب تاسیسات مناسب نسبت به کنترل آب زیرزمینی محل حفاری اقدام گردد.

شیب هیدرولیکی سطح ایستابی در قطعه A-SH تونل مترو بین ۰/۰۰۰۵ تا ۰/۰۳۶ بوده و با توجه به تاثیر مثبت شیب سطح ایستابی در دبی آب ورودی به تونل می توان شیب ماکزیمم را معادل ۰/۰۳۶ برای حالت بحرانی در نظر گرفت. دبی آب ورودی به هر تونل با توجه به موارد یاد شده، برابر خواهد بود با:

$$Q = 0/33 \text{ lit/sec} \quad \text{or} \quad Q = 28/734 \text{ m}^3/\text{day}$$

۳-۵-۳ آبخوان شیلی - ماسه سنگی

شرایط فرض شده برای آبخوان آبرفتی، برای آبخوان شیلی - ماسه سنگی نیز در نظر گرفته شده است، با این تفاوت که حداکثر مقادیر نفوذپذیری گزارش شده برای این آبخوان معادل ۷۱ سانتی متر در روز می باشد (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

حداکثر دبی آب ورودی به هر تونل برابر است با:

$$Q = 2.00 \text{ lit/min} \quad \text{or} \quad Q = ۲/۸۸ \text{ m}^3/\text{day}$$

۳-۶ روش حفاری

با پیشرفت علم و پیشرفت در ساخت ماشین های حفاری، استفاده وسیع ماشین آلات حفاری به جای عملیات آتشباری برای حفاریات زیرزمینی کاربرد وسیعی پیدا کرده است. در حفاری مکانیزه از ابزار و ماشین آلات برای حفر فضاهای زیر زمینی استفاده می شود و هدف اصلی آن رسیدن به سرعت بالا در احداث و حفر این فضاها می باشد. عملیات حفاری یکی از پرهزینه ترین عملیات اجرای در حفاریات زیرزمینی می باشد. از طرفی در انتخاب دستگاه حفاری محدودیت زیادی وجود دارد و یا به بیان دیگر در انتخاب دستگاه حفاری انعطاف پذیری وجود ندارد یعنی در یک پروژه

استفاده از چندین ماشین حفاری، به دلیل بحث اقتصادی و هزینه بالایی ماشین آلات حفاری کمتر استفاده می شود. بنابراین باید قبل از انجام عملیات، نوع دستگاه و ماشین آلات حفاری مشخص شده باشد. برای حفر تونل های دوقلوئی متروی اصفهان از دستگاه حفاری رودهدر استفاده شده است. این نوع ماشین ها دارای بازو هایی برای حفاری انتخابی هستند. بازوها به شکل های مختلفی به ماشین های حفر متصل می شوند. عملیات حفر توسط این ماشین به صورت خراشیدن سینه کار می باشد. به طوری که بازوها در جهت های مختلف حرکت می کنند و سینه کار را می خراشند. در توان مؤثر این ماشین ها به وزن آن ها بستگی دارد. به طوری که اعمال نیروی فشاری برای حفر به وسیله نیروی متقابل ناشی از وزن ماشین تأمین می شود.

ماشین های تونل سازی بازوئی عموماً برای سنگ های با مقاومت متوسط مناسب هستند. آن ها شامل یک بازوی حفاری هستند، که بر روی یک شاسی خود پیشرونده نصب می شوند. هیچ گونه ارتباط مستقیمی بین ماشین و شکل تونلی که حفر می شود وجود ندارد. سطح مقطع تونلی که با این ماشین ها حفر می شود می تواند متغیر و متفاوت باشد. سینه کار تونل در هر زمانی به طور مستقیم در دسترس است. حفر تونل های دوقلوئی متروی اصفهان به صورت حفاری مرحله ای می باشد. به این صورت که ابتدا قسمت بالای تونل اول حفر و سپس قسمت بالای تونل دوم حفر می شود. بعد از این مراحل قسمت پایین تونل اول و سپس قسمت پایین تونل دوم حفاری شده است (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

فصل چهارم:

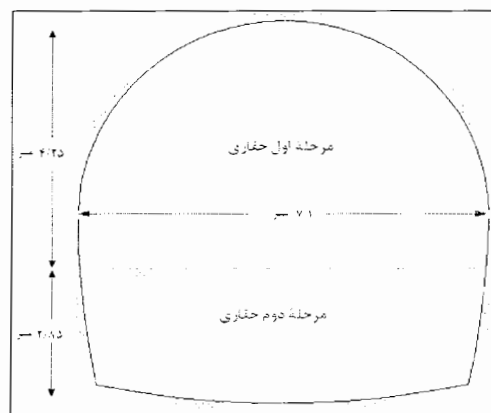
**پیش‌بینی نشست در اثر حفر
تونل‌های دوقلوی مترو اصفهان**

۴-۱ مقدمه

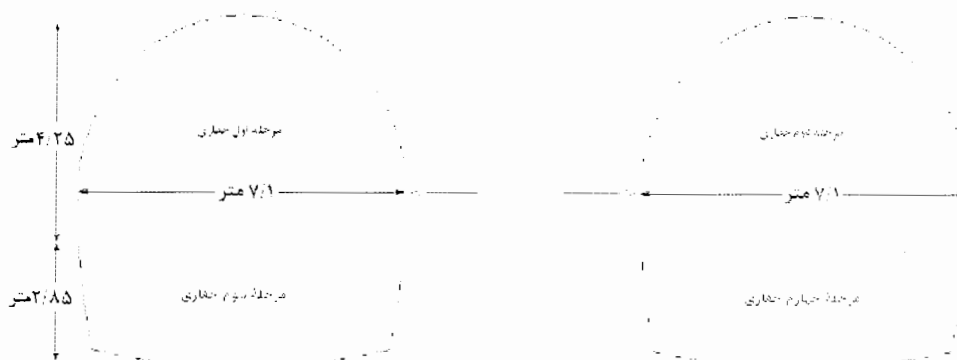
بر خلاف سنگ‌های مستحکم که مسائل ناپایداری و گسیختگی آن‌ها از طریق مشخصات ساختاری کنترل می‌شود، موارد بسیاری نیز وجود دارد که در آن‌ها تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی در توده سنگ‌هایی اجراء می‌شوند که به علت درزه‌داری بسیار شدید و یا به خاطر ضعیف بودن سنگ بکر، از مقاومت پائینی برخوردار می‌باشند. از جمله مسائل مهم در طراحی و اجراء تونل‌ها در زمین‌هایی با مشخصات ژئومکانیکی پائین، تنش‌زدائی و گسترش بیش از حد ناحیه پلاستیک در بخش فوقانی فضای حفاری شده می‌باشد که ممکن است موجب ریزش و پر شدن قسمت حفاری شده و در نتیجه منجر به نشست در سطح زمین شود. از این‌رو تعیین میزان پیشروی، زمان اجرای حفاری و نصب پوشش اولیه مناسب از جمله موارد مهم در طراحی این قبیل سازه‌ها می‌باشد که با اجراء و طراحی مناسب می‌توان از بروز حوادث و مشکلات مذکور جلوگیری کرد. هنگام ساخت فضای زیرزمینی حتی اگر تنش‌های برجا در حد متوسط خود باشند احتمال بروز گسیختگی ناشی از القاء تنش در توده سنگ‌های ضعیف دربرگیرنده وجود دارد. گسیختگی از این نوع که بیشتر در توده سنگ‌های ضعیف دربرگیرنده یک سازه زیرزمینی رخ می‌دهد، مشکلاتی را از لحاظ طراحی

به وجود می‌آورند، به طوری که هم‌اکنون نه تنها هیچ گونه مدل ساده عددی برای آن وجود ندارد، بلکه محاسبات دقیق ضریب ایمنی که در طی آن بتوان محدوده مجاز و قابل قبول این گونه فرآیندهای گسیختگی را تعریف کند نیز در دسترس نمی‌باشد (میکایل، ۱۳۸۶). در این تحقیق سعی خواهد شد با استفاده از مدل سازی عددی میزان نشست در اثر حفر تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان پیش بینی و نتایج حاصل با مقادیر واقعی مقایسه شود.

تونل های دوقلوی متروی اصفهان واقع در قطعه خط شمالی - جنوبی با طول و مقطعی معادل با ۱۲/۵ کیلومتر و ۳۴/۲۶ متر مربع، یکی از تونل‌های دوقلوی در حال اجراء در کشور می‌باشد. با توجه به سطح مقطع تونل‌ها و سستی ساختگاه تونل، حفاری در چند مرحله و با دستگاه رودهدر انجام می‌شود. شکل‌های ۱-۴ و ۲-۴ مشخصات هندسی به همراه مراحل مختلف حفاری به ترتیب برای یک تونل و دو تونل نشان می‌دهد. مشخصات هندسی هر تونل یکسان بوده و تونل‌ها در تراز ارتفاعی یکسان نسبت به هم قرار گرفته‌اند.



شکل ۱-۴- مشخصات هندسی به همراه مراحل مختلف حفاری برای یک تونل



شکل ۴-۲- مشخصات هندسی به همراه مراحل مختلف حفاری برای دو تونل

۴-۲ روش‌های پیش‌بینی نشست در اثر حفر تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان

در این پروژه برای مقایسه نتایج نشست در سطح زمین در اثر حفر تونل‌های دوقلوی متروی

اصفهان، از سه روش استفاده شده است که عبارتند از:

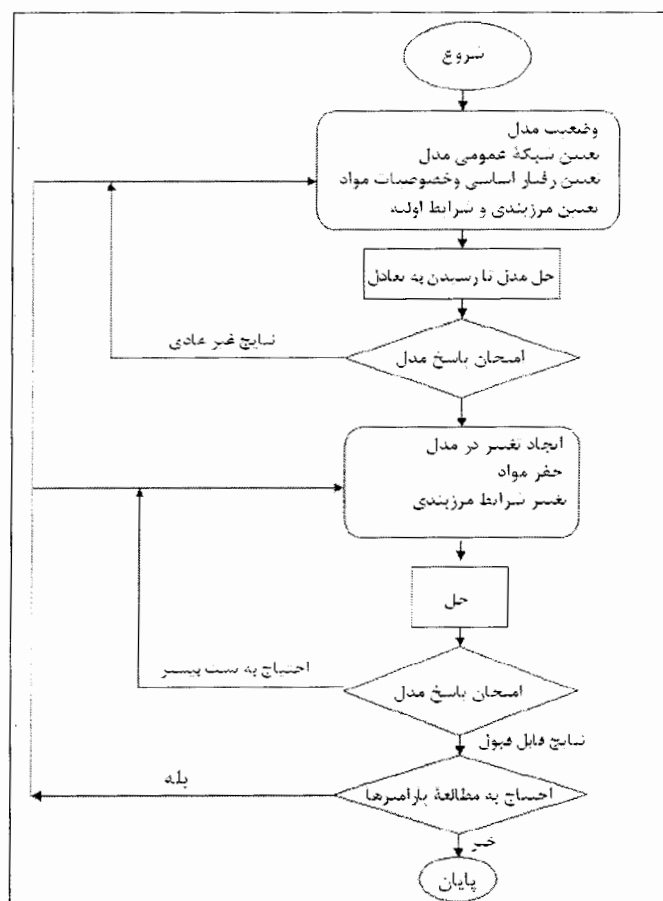
- روش‌های عددی
- روش‌های تجربی
- روش رفتارنگاری و ابزار دقیق

۴-۲-۱ روش‌های عددی

در روش‌های عددی معادله دیفرانسیل حاکم بر محیط توده سنگ اطراف فضای استخراج شده با توجه به شرایط مرزی موجود حل شده و میزان جابجائی عمودی و افقی نقاط مختلف سطح بالای فضای خالی شده، مشخص می‌شود. مشخصه اصلی روش‌های عددی این است که یک سازه بزرگ به المان‌های نسبتاً کوچکی تقسیم می‌شود. سپس، معادلات مشخصه المان‌های منفرد و اندرکنش آن‌ها برقرار می‌شود. سرانجام این معادلات که از لحاظ عدد و رقم،

بزرگ می‌باشند به طور همزمان با استفاده از کامپیوترها، حل می‌شوند. تعدادی از روش‌های عددی در طی چند دهه گذشته توسعه یافته‌اند و این روش‌ها قادر به حل تقریبی این‌گونه مسائل می‌باشند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش تفاضل محدود اشاره کرد. در این بخش برای تعیین میزان نشست در سطح زمین در اثر حفر تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان از روش عددی تفاضل محدود با کمک نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ استفاده شده است.

در شکل ۳-۴ روند کلی شبیه سازی در $FLAC^{2D}$ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ روند کلی شبیه سازی در $FLAC^{2D}$ (Itasca 1992)

با توجه به شکل ۴-۳ و اصول مدل‌سازی عددی و همچنین ترتیب عملیات اجرایی، مراحل مدل‌سازی با برنامه $FLAC^{2D}$ به ترتیب زیر صورت گرفته است:

- ۱- انتخاب محدوده مناسبی از توده سنگ اطراف تونل
 - ۲- انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن
 - ۳- ترسیم هندسه تونل (شامل هندسه مقطع تونل و بخش‌های مختلف حفاری)
 - ۴- حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از حفاری
 - ۵- حفاری بخش‌های مختلف تونل و تعیین میزان جابجایی
- واژه $FLAC$ از عبارت Fast Lagrangian Analysis of Continua که به معنی تحلیل سری لاگرانژی محیط می‌باشد گرفته شده است. این برنامه را دکتر Peter Cundall در سال ۱۹۸۶ جهت انجام تحلیل‌های مهندسی با میکروکامپیوترها، توسعه داد. $FLAC$ یک نرم‌افزار تفاضل محدود صریح^۱ می‌باشد که توانایی مدل کردن رفتار خاک، سنگ یا دیگر مصالحی که ممکن است وقتی به حد تسلیم برسند جریان پلاستیک پیدا کنند را دار می‌باشد. مصالح به‌وسیله المان‌ها یا زون‌هایی که یک شبکه را تشکیل می‌دهند نمایش داده می‌شوند که نهایتاً کاربر با استفاده از این شبکه، شکل سازه مورد نظر را که می‌بایست مدل شود ایجاد می‌نماید. هر المان مطابق قانون تنش-کرنش خطی یا غیرخطی از قبل تعریف شده، در عکس‌العمل با بارها یا مرزهای گیردار، رفتار می‌کند. اگر تنش‌ها یا گرادین تنش به قدر کافی زیاد باشد به‌طوری که باعث تسلیم و جاری شدن مصالح شود، شبکه می‌تواند در حالت کرنش بزرگ^۲، تغییر شکل پیدا کند و با مصالح تشکیل شده حرکت نماید. $FLAC$ بر پایه روند محاسباتی لاگرانژی بنا نهاده شده است که جهت مدل کردن تغییر شکل‌های بزرگ، به‌خوبی مناسب

^۱- Explicit Finite Difference

^۲- Large- Strain Mode

می‌باشد. همچنین نرم‌افزار FLAC دارای چندین مدل رفتاری داخلی^۱ است که امکان شبیه‌سازی مصالح خطی را نیز میسر می‌سازد.

مدل‌های رفتاری در برنامه FLAC عبارتند از:

- ۱- مدل الاستیک، ایزوتروپ^۲
- ۲- مدل الاستیک، ایزوتروپ- صفحه ای^۳
- ۳- مدل پلاستیک موهر- کلمب^۴
- ۴- مدل درزه‌دار^۵
- ۵- مدل سخت شوندگی و نرم شوندگی^۶
- ۶- مدل تسلیم مجدد^۷

مراحل محاسباتی برنامه FLAC^{2D} بدین صورت است که ابتدا با استفاده از معادلات حرکت، سرعت‌ها و جابه‌جایی‌های ناشی از نیروها و تنش‌ها به دست می‌آیند. سپس نرخ‌های کرنش از سرعت‌ها و تنش‌های جدید از نرخ‌های کرنش محاسبه می‌شوند و این یک پله زمانی^۸ برای هر سیکل می‌باشد و در هر مرحله تمام مقادیر قبلی با مقادیر جدید جایگزین می‌شوند (Itasca 1992).

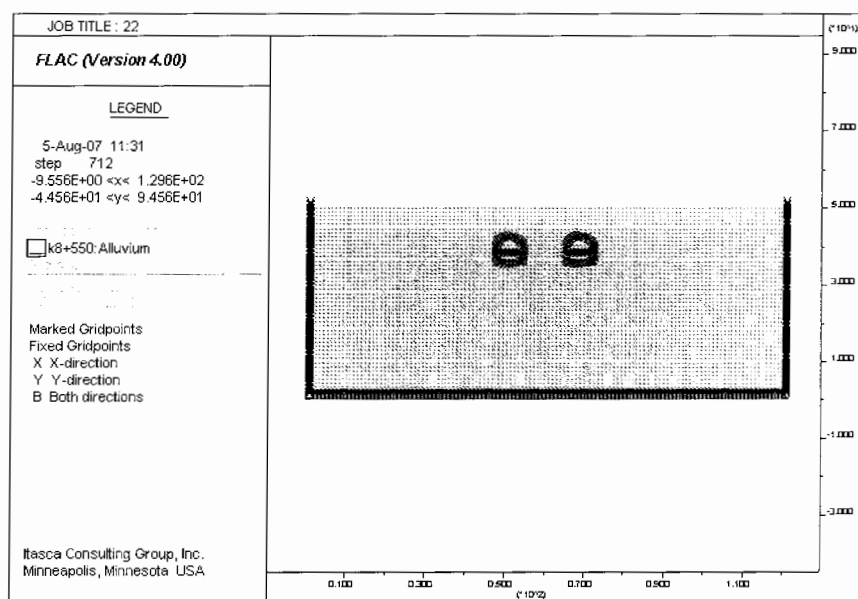
برای رسم منحنی مشخصه زمین از نرم‌افزار FLAC^{2D} استفاده شده است. در مدل‌سازی ابعاد

مدل به اندازه‌ای در نظر گرفته شده است که محدوده تونل تحت اثر ناشی از مرزها قرار نگیرد.

¹- Built-In Constitutive Models
²- Elastic Isotropic
³- Elastic Transversely Isotropic
⁴- Mohr-Coulomb Plasticity
⁵- Ubiquitous Joint
⁶- Strain Hardening/Softening
⁷- Double-Yield (Experimental)
⁸- Time Step

۴-۲-۱- انتخاب محدوده مناسبی از توده سنگ اطراف تونل

ایده اولیه در این زمینه مربوط به حل دقیق ریاضی در محیط‌های الاستیک می‌باشد که حداکثر زون تأثیر یک حفره زیرزمینی تا سه برابر قطر آن برآورد شده است. بدین ترتیب در صورتی که توده سنگ به صورت الاستیک رفتار کند، در فاصله سه برابر قطر تونل، تنش‌ها به وضعیت اولیه خود می‌رسند (میکائیل، ۱۳۸۶). این مطلب در راهنمای برنامه $FLAC^{2D}$ مورد بررسی قرار گرفته شده است (Itasca 1999). نتایج حاصل از هندسه مدل با شرایط متفاوت به این صورت بوده است که در صورتی که ابعاد مدل حدود ۸ تا ۱۰ برابر ابعاد حفره باشد تحت شرایط مرزی متفاوت درصد خطاها به حداقل ممکن (حدود ۰/۵ درصد) کاهش خواهد یافت. باتوجه به این که هدف از این تحقیق، تحلیل نشست تونلی به شکل تقریباً نعل اسبی با عرض و ارتفاع حدود ۷ متر می‌باشد، اندازه طول مدل ۱۲۰ متر انتخاب شده است. شکل ۴-۴ ابعاد مدل ساخته شده برای حالت آبرفت را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴ ابعاد مدل ایجاد شده در نرم‌افزار برای حالت آبرفت (رسم شده توسط نرم‌افزار $FLAC^{2D}$)

۲-۱-۲-۴ انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

همان‌طور که ذکر شد، چندین مدل رفتاری در برنامه $FLAC^{2D}$ موجود می‌باشد که بسته به شرایط مسئله می‌توان از یک یا چند نوع آن استفاده کرد. یکی از این مدل‌های رفتاری، مدل پلاستیک موهر-کلمب می‌باشد. این مدل نمایانگر موادی است که تنها در اثر برش به حد تسلیم می‌رسند. این مدل رفتاری در مکانیک سنگ و خاک برای حالت پلاستیک، مدل مرسوم می‌باشد (Itasca 2001). در این تحقیق برای تحلیل رفتار پلاستیک مدل از مدل موهر-کلمب استفاده شده است.

پارامترهای مورد نیاز در مدل پلاستیک موهر-کلمب عبارتند از:

- ۱- جرم حجمی^۱
- ۲- مدول حجمی^۲
- ۳- مدول برشی^۳
- ۴- چسبندگی^۴
- ۵- زاویه اصطکاک^۵
- ۶- زاویه اتساع^۶
- ۷- مقاومت کششی^۷

1 - Density
2 - Bulk Modulus
3 - Shear Modulus
4 - Cohesion
5 - Friction Angle
6 - Dilation Angle
7 - Tensile Strength

چنانچه هر یک از پارامترهای فوق تعریف نشوند، برنامه مقدار صفر را برای آن منظور می‌کند. از جمله پارامترهای مورد نیاز در شبیه‌سازی رفتار بعد از شکست در مدل پلاستیک موهر- کلمب زاویه اتساع می‌باشد. مقدار آن عموماً از طریق آزمایش سه محوری یا آزمایش برش تعیین می‌شود. برای خاک‌ها، سنگ‌ها و بتن مقدار زاویه اتساع عموماً کمتر از زاویه اصطکاک می‌باشد (Itasca 1992).

۴-۲-۱-۳ میزان فشار وارد به تونل‌ها ناشی از بار خیابان

طراحی فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری دارای حساسیت‌های خاصی برای جلوگیری از ایجاد گسیختگی و به وجود آمدن خسارات مالی و جانی می‌باشد و معمولاً، ابتدا ایمنی را ملاک عمل قرار می‌دهند و بررسی‌های اقتصادی در درجه دوم اهمیت قرار می‌دهند. تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان که در عمق کم و نزدیکی سطح خیابان حفر می‌شوند، علاوه بر تنش‌های ایجاد شده از وزن طبقات بالایی باید فشار وارد به تونل‌ها ناشی از بار خیابان را نیز در نظر گرفت. بر اساس نتایج تحقیقات به عمل آمده بیشترین میزان فشار ۲ تن بر متر مربع محاسبه شده است. این فشار به صورت بار گسترده یکنواخت، در طراحی مدل‌ها در نظر گرفته شده است (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

۴-۲-۱-۴ نسبت تنش افقی به عمودی (K)

اندازه‌گیری تنش‌های افقی در کارگاه‌های اجرایی مهندسی عمران و معدن، در اقصی نقاط جهان، حاکی از آن است که اصولاً، نسبت K در عمق‌های کم به سمت مقادیر بالا سوق پیدا کرده

در حالی که با افزایش عمق، از مقدار آن کاسته می‌شود. می‌توان نسبت تنش افقی به عمودی K را در هر نقطه با استفاده از رابطه ۴-۱ محاسبه کرد (طاهریان، ۱۳۸۱).

$$K = 0.25 + 7 E_h \left(0.001 + \frac{1}{Z} \right) \quad ۴-۱$$

که در آن Z (m) عمق از سطح زمین و E_h (GPa) نیز میانگین مدول تغییر شکل پذیری بخش بالایی پوسته زمین می‌باشد که در جهت افقی اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری به ویژه در سنگ‌های رسوبی لایه لایه که در آن مدول تغییر شکل پذیری می‌تواند به طور قابل توجهی در جهت‌های مختلف، مقدار معینی داشته باشد، مهم و ارزشمند است. نسبت تنش افقی به قائم در محیط سنگی $K = 1/0.5$ می‌باشد (طاهریان، ۱۳۸۱). مقدار K در محیط آبرفتی با استفاده از رابطه ۴-۲، برابر 0.42 است.

$$k = 1 - \sin \varphi \quad ۴-۲$$

لازم به ذکر است باتوجه به بررسی‌ها و تحلیل‌های انجام شده، و عمق کم تونل‌ها و شرایط زمین‌شناسی منطقه، نسبت تنش افقی به عمودی به کار برده شده در تحلیل‌ها برابر با ۱ در نظر گرفته شده است (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

۴-۲-۲ روش‌های تجربی

روش‌های تجربی بر اساس مشاهدات و اندازه‌گیری‌های انجام شده در یک ناحیه، نمودار یا رابطه‌ای مشخص بدست می‌آید، که با استفاده از این نمودارها و روابط می‌توان نشست در هر نقطه را تعیین کرد. در این روش به منظور پیش‌بینی منحنی نشست در اثر حفر

تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان، از روش تجربی Peck و برای پیش‌بینی ماکزیمم نشست، از روش تجربی Karakus & Fowell استفاده خواهد شد.

۳-۲-۴ روش رفتارنگاری و ابزار دقیق

با توجه به نقش و وظیفه دانش نقشه‌برداری به خصوص در هدایت، پیشروی و کنترل مسیر و بخش‌های مختلف تونل‌ها، در پروژه حاضر نیز برای تعیین میزان نشست سطحی ناشی از حفر تونل‌های دوقلوی مترو اصفهان از این روش استفاده شده است. با توجه به دقت مورد نیاز اندازه‌گیری‌ها، به منظور ترازیبی دقیق^۱، شبکه نقاط برداشت متشکل از ۲۰ ایستگاه^۲ در روی محور تونل و طرفین محور تونل و تا فاصله‌ای در حدود ۵۰ متر از محور تونل تعبیه شد. به منظور نصب نشانه‌ها، با توجه به دقت زیاد اندازه‌گیری‌ها تعدادی میله‌های مخصوص، از جنس فولاد ضدزنگ تهیه و طبق نمونه‌های استاندارد، به گونه‌ای که در هنگام استقرار میر روی آن‌ها تنها یک نقطه اتصال وجود داشته باشد تراش لازم داده شد. ترازیبی به وسیله دوربین تئودولیت انجام شده است. روش نقشه‌برداری به این صورت است که، ابتدا یک نقطه مبنا در فاصله‌ای که تونل‌ها تأثیری بر آن نداشته باشند، انتخاب شده است و سپس ارتفاع این نقطه (z_1) را یادداشت می‌کنند. بعد از این مرحله، ارتفاع هر ایستگاه نقشه‌برداری (z_2) را نسبت به ایستگاه مبنا، برای زمان‌های مختلف، به فاصله زمانی یک ماه به دست می‌آورند. اختلاف ارتفاع دو ایستگاه، میزان جابجایی‌های قائم را نشان می‌دهد. پس از استقرار شبکه ترازیبی، اولین منطقه برداشت نقاط در اواخر سال ۱۳۸۴ در شرایطی که حفاری مرحله فوقانی دو تونل در فاصله حدود ۱۰۰ متر از ابتدای منطقه برداشت قرار داشت،

^۱ - Precise leveling

^۲ - Station

انجام شد و به عنوان مبنای اندازه‌گیری‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. طبق برنامه‌ریزی به عمل آمده، اندازه‌گیری‌ها، بیانگر تغییر مکان‌های ناشی از مراحل حفاری اول و دوم است (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

۳-۴ پیش‌بینی نشست در اثر حفر تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان

با توجه به شرایط زمین‌شناسی منطقه، برای تعیین میزان نشست در اثر حفر تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان سه مقطع در نظر گرفته شده، که در هر مقطع یک مدل ایجاد می‌شود:

۱- پیش‌بینی نشست در مقطعی که تونل‌ها کاملاً در آبرفت حفر شود (Km 8+550)

۲- پیش‌بینی نشست در مقطعی که تونل‌ها کاملاً در سنگ حفر شود (Km 8+920)

۳- پیش‌بینی نشست در مقطعی که تونل‌ها کاملاً در سنگ و آبرفت حفر شود (Km 8+694)

قابل ذکر است که با تغییر شرایط زمین‌شناسی منطقه، فاصله تونل‌ها و ارتفاع تاج تونل از سطح زمین متفاوت بوده ولی ابعاد تونل‌ها تغییر نمی‌کند. میزان نشست در اثر حفر تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان در هر مدل با برنامه $FLAC^{2D}$ محاسبه شده و در نهایت با نتایج تجربی و نتایج واقعی (نتایج ابزار دقیق) مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۳-۴ پیش‌بینی نشست در مقطعی که تونل‌ها کاملاً در آبرفت حفر شود

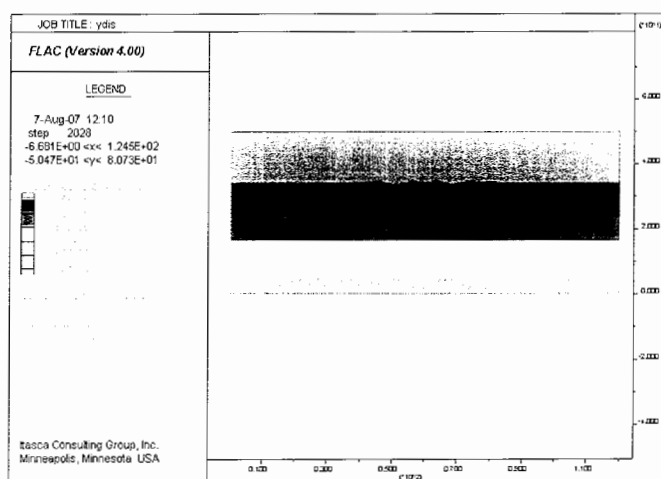
این مقطع در کیلومتر ۸+۵۵۰ واقع شده است. با توجه به مشخصات زمین‌شناسی منطقه در محیط آبرفتی، انتظار می‌رود که در این مقطع میزان جابجایی‌های خاک بیشتر از سایر مقاطع باشد، لذا در چنین محیطی باید تمهیدات خاصی برای طراحی تونل‌ها در نظر گرفته شود.

۱-۳-۴-۱ پیش‌بینی نشست با استفاده از مدلسازی عددی

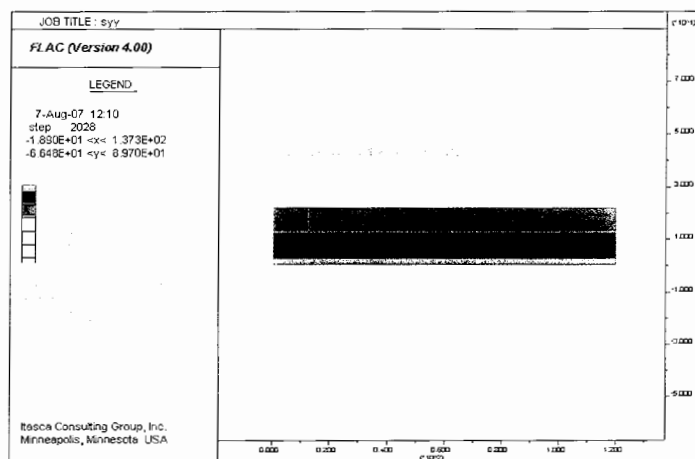
به منظور پیش‌بینی نشست با استفاده از مدلسازی عددی، هندسه تونل‌ها در برنامه $FLAC^{2D}$ رسم و به حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از حفاری پرداخته شده است.

الف: حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از حفاری

در این بخش با الگو گرفتن از آنچه در طبیعت رخ می‌دهد، سعی شده است تا شرایط مدل هرچه بیش‌تر به واقعیت نزدیک‌تر شود. از آنجایی‌که قبل از حفاری تونل، زمین در تعادل قرار دارد و حفر تونل باعث ایجاد اغتشاش در وضعیت تنش‌ها و جابه‌جائی‌ها می‌شود، لازم است تا قبل از حفاری، مدل را با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی، شرایط مرزی و تنش‌های برجای تعریف شده حل کرده و پس از به تعادل رساندن مدل، جابه‌جائی‌ها در گره‌ها صفر شود. شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ به ترتیب کنتورهای تنش عمودی و جابه‌جائی قائم را قبل از حفر تونل، برای مقطع آبرفتی در شرایط طبیعی متعادل نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵- کنتورهای جابه‌جائی عمودی قبل از حفاری تونل (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



شکل ۴-۶- کنتورهای تنش عمودی قبل از حفاری تونل (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)

ب: حفاری تونل و نصب سیستم نگهداری اولیه در نرم افزار $FLAC^{2D}$

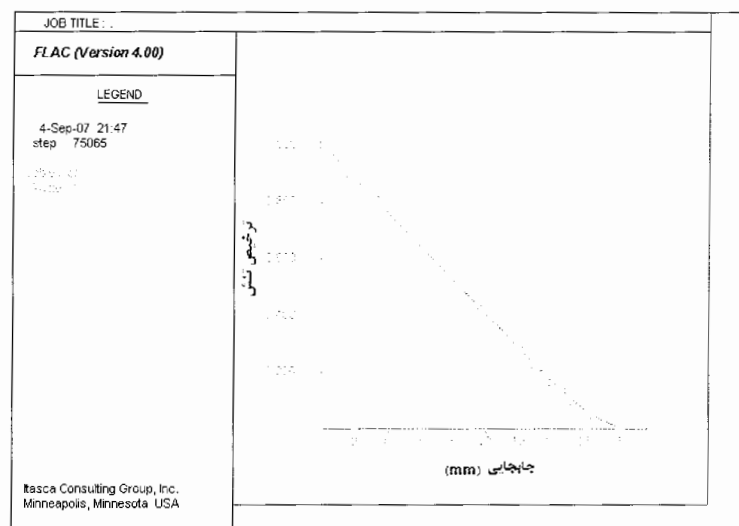
تخمین نگهداری اولیه مورد نیاز برای پایداری تونل یکی از مسائل مهم در طراحی است. رسم منحنی مشخصه زمین با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، تعیین میزان نرخ ناهمجواری از روی نمودار پانه^۱ و اعمال ترخیص تنش معادل با همگرایی ایجاد شده تا قبل از استقرار پوشش اولیه در مدل عددی، می‌تواند مسئله بعد سوم که همان تأثیر گام پیشروی و فاصله جبهه کار از پوشش اولیه است را در مسائل دو بعدی حل کند. برای تعیین پوشش اولیه مناسب به منظور حفظ پایداری فضای حفاری شده و کمک به ایجاد تعادل جدید در زمین از روش همگرایی-همجواری و رسم منحنی مشخصه زمین با کمک نرم افزار $FLAC^{2D}$ استفاده شده است. مراحل تعیین میزان نشست برای بخش نخست حفاری (قسمت بالای تونل سمت چپ) به ترتیب شامل مراحل زیر می‌باشد:

۱- انتخاب گام پیشروی و فاصله جبهه کار از پوشش

در این طرح با توجه به شرایط اجرایی، میزان گام پیشروی و فاصله جبهه کار از تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان از پوشش ۱/۵ متر در حالت آبرفتی انتخاب شده است.

۲- رسم منحنی مشخصه زمین

منحنی مشخصه زمین را می‌توان از حل الاستوپلاستیک در معرض تنش‌های یکنواخت درجا و فشار داخلی یکنواخت به دست آورد. در این بخش با استفاده از نرم افزار $FLAC^{2D}$ منحنی مشخصه زمین برای بخش نخست حفاری (شکل ۴-۷) رسم شد.



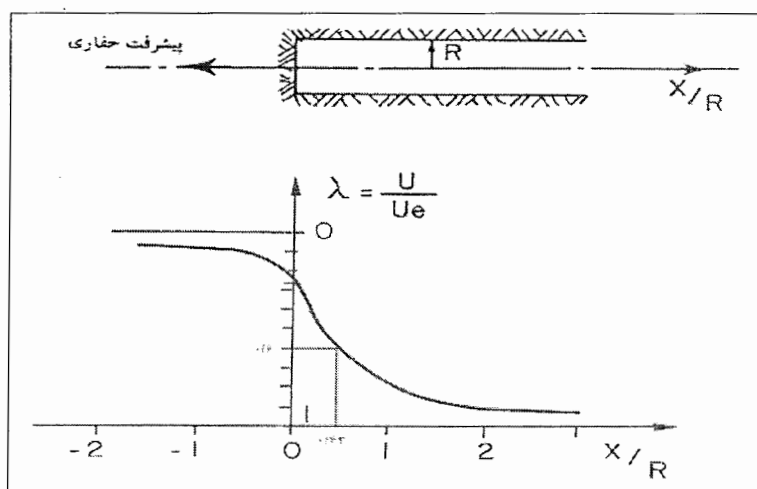
شکل ۴-۷- منحنی مشخصه زمین برای مقطع آبرفت (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)

۳- اعمال ترخیص تنش معادل با همگرایی به وجود آمده تا لحظه استقرار پوشش

برای محاسبه ترخیص تنش معادل با همگرایی به وجود آمده تا لحظه استقرار پوشش گام‌های محاسباتی به ترتیب زیر انجام شده است:

گام ۱- تعیین همگرایی و نرخ ناهمجواری بر حسب فاصله تا جبهه کار

با تعیین همگرایی بر حسب فاصله تونل تا جبهه کار، می‌توان وضع نسبی بارها و جابه‌جائی به دست آمده از پیشروی جبهه کار را مشخص کرد. چشم‌پوشی از سهم همگرایی که تا لحظه استقرار پوشش به وجود می‌آید، نه تنها منجر به زیاد به حساب آوردن نیروی پوشش می‌شود، بلکه زمین و تعادل نهایی آن را هم آن طوری که باید منظور نمی‌کند. رفتار همگرایی تونل بر حسب فاصله جبهه کار را می‌توان در حالت دو بعدی و با کمک نمودار پانه (شکل ۸-۴) به دست آورد. این منحنی نرخ ناهمجواری (نرخ ناهمجواری U/U_e معادل است با نسبت جابه‌جائی به وجود آمده تا لحظه استقرار پوشش به جابه‌جائی ماکزیمم در اثر اعمال ترخیص تنش کامل) را بر حسب فاصله تا جبهه حفاری نشان می‌دهد. مقدار نرخ ناهمجواری برای بخش نخست حفاری از روی نمودار پانه و با توجه به نسبت فاصله جبهه کار از پوشش، برابر با $0/6$ محاسبه شده است.

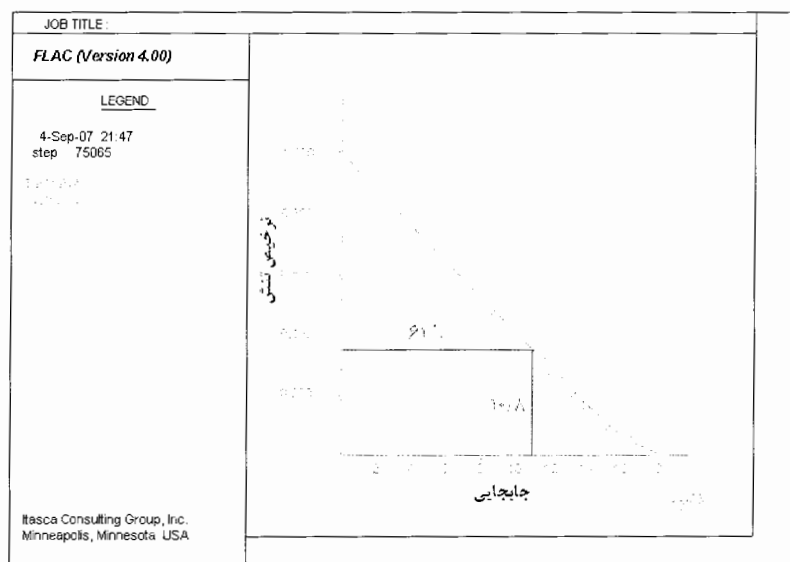


شکل ۸-۴- تغییرات نرخ ناهمجواری بر حسب فاصله از جبهه کار (پهنیا، ۱۳۷۳)

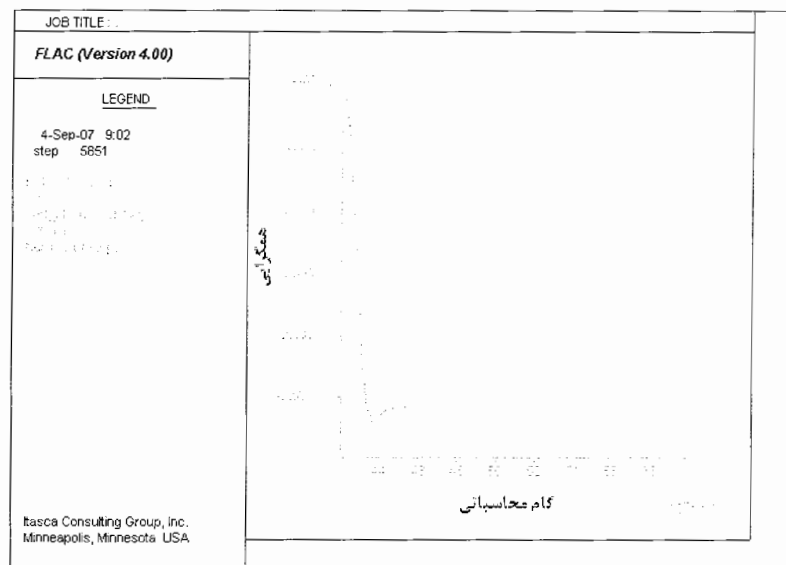
با توجه به مقادیر ماکزیمم جابه‌جائی به‌وجود آمده در طاق تونل در اثر ترخیص کامل تنش، مقدار جابه‌جائی به‌وجود آمده در اثر پیشروی جبهه‌کار (U) با توجه به نرخ ناهمجواری برای مقطع آبرفت برابر ۱۸/۱ میلی‌متر تعیین شد.

گام ۲- تعیین مقدار ترخیص تنش

با توجه به شکل ۹-۴ و بررسی‌های انجام شده میزان ترخیص تنش اعمالی به مدل برای مقطع آبرفتی (معادل با ۱۰/۸ میلی‌متر جابه‌جائی)، ۶۲ درصد محاسبه شد. شکل ۴-۱۰ میزان همگرایی به وجود آمده در بخش نخست حفاری در نتیجه ترخیص تنش ۶۲ درصد برای مقطع آبرفتی را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۴- تعیین میزان ترخیص تنش از روی نمودار GRC برای مقطع آبرفتی (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



شکل ۴-۱۰- همگرایی در بخش نخست حفاری برای مقطع آبرفتی (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)

گام ۳- اعمال ترخیص تنش و بررسی پایداری فضای حفاری

در این مرحله با اعمال ترخیص تنش‌های محاسبه شده در مرحله قبل به مدل، به بررسی پایداری فضای حفاری شده پرداخته می‌شود. شکل ۴-۱۱ کرنش‌های برشی به وجود آمده در اطراف تونل را برای مقطع آبرفتی در اثر اعمال ترخیص تنش نشان می‌دهد. برای ارزیابی پایداری فضای حفاری از رابطه ۴-۳ که توسط ساکورایی^۱ در سال ۱۹۸۶ ارائه شد، استفاده شده است.

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad (۴-۳)$$

این رابطه کرنش بحرانی در حالت فشاری محصور نشده در اطراف تونل (ε_c) را برحسب مدول الاستیسیته محیط (E) بیان می‌کند. از آنجا که توده آبرفتی تحت تنش سه‌محوره قرار دارد، استفاده از ماکزیمم کرنش برشی برای ارزیابی پایداری تونل منطقی‌تر به نظر می‌رسد. ساکورایی و همکارانش در

1- Sakurai

سال ۱۹۹۴ رابطه ۴-۴ را برای محاسبه کرنش برشی بحرانی در حالت سه محوری (γ_c) با استفاده از کرنش بحرانی در حالت فشاری محصور نشده و نسبت پواسون (ν) پیشنهاد کردند (Sakurai, 1997):

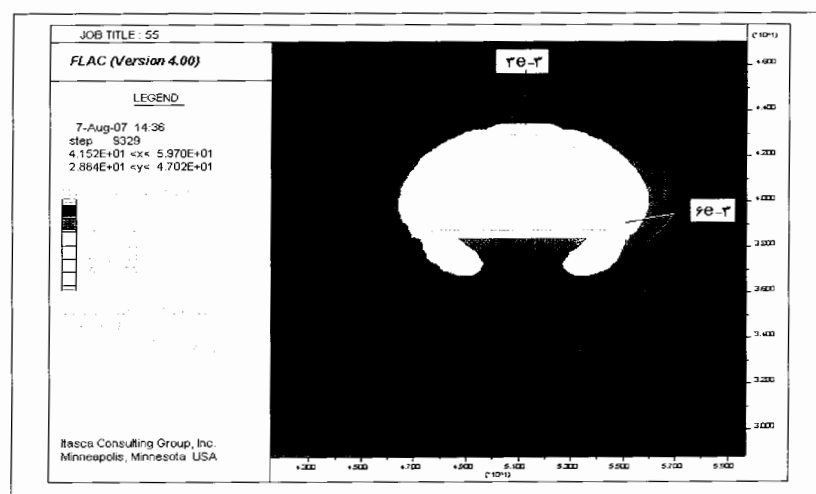
$$\gamma_c = (1 + \nu)\varepsilon_c \quad (4-4)$$

با جای‌گذاری مقادیر مدول الاستیسیته و نسبت پواسون در رابطه‌های ارائه شده می‌توان مقادیر کرنش برشی بحرانی در حالت سه محوری و کرنش بحرانی در حالت فشاری محصور نشده را محاسبه کرد:

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \Rightarrow \varepsilon_c = 6.75e-3$$

$$\gamma_c = (1 + \nu)\varepsilon_c \Rightarrow \gamma_c = 8.78e-3$$

با توجه به شکل ۴-۱۱ حداکثر کرنش‌های برشی به‌وجود آمده در اطراف فضای حفاری برای مقطع آبرفتی برابر با 6×10^{-3} محاسبه شد که به دلیل کم‌تر بودن مقادیر کرنش برشی به‌وجود آمده در اطراف تونل نسبت به مقادیر محاسبه شده از رابطه ۳-۴ و ۴-۴، می‌توان چنین استنباط کرد که فضای حفاری تحت تأثیر ترخیص تنش اعمالی، پایدار می‌باشد.



شکل ۴-۱۱- کرنش برشی در اطراف تونل برای مقطع آبرفتی (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)

۴- نصب نگهداری و تعیین سطح مقطع و گشتاور دوم در پوشش اولیه تونل

با توجه به تحلیل‌های انجام شده پوشش اولیه مناسب برای مقطع آبرفتی ۲۵ سانتی‌متر شاتکریت به همراه Lattic Girder 25 و مش ($\phi = 5$) در فواصل ۱/۵ متری به کار برده شده است. مشخصات سیستم نگهداری اولیه در مراحل مختلف حفاری در جدول ۴-۱ درج شده است.

جدول ۴-۱- مشخصات سیستم نگهداری اولیه در مراحل مختلف حفاری در مقطع آبرفت

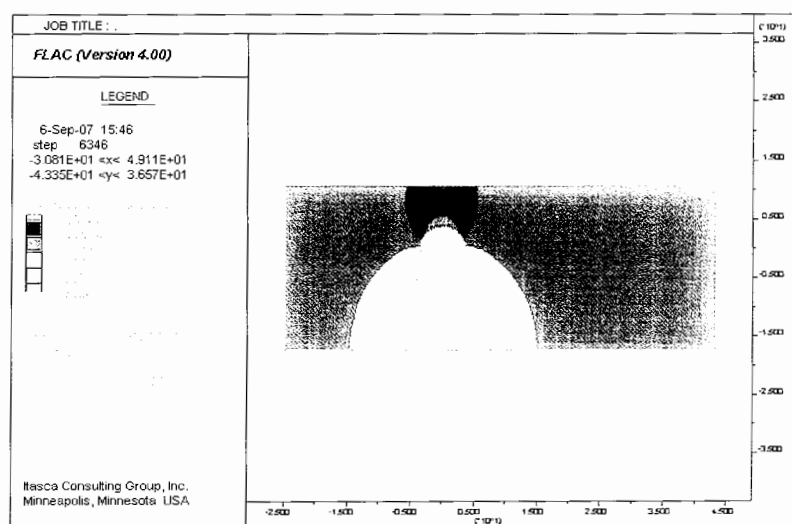
مراحل حفاری	مشخصات سیستم نگهداری اولیه	$I (m^4)$	$A(m^2)$	$E(Pa)$
مرحله اول حفاری	۲۵ سانتی‌متر شاتکریت تر + مش + Lattic Girder 25 در فواصل ۱/۵ متر	۰/۰۲۰۸۳	۰/۲۷۴۸۳	۲/۱۰۱
مرحله دوم حفاری	۲۵ سانتی‌متر شاتکریت تر + مش + Lattic Girder 25 در فواصل ۱/۵ متر	۰/۰۲۰۸۳	۰/۲۷۴۸۳	۲/۱۰۱
مرحله سوم حفاری	۲۵ سانتی‌متر شاتکریت تر + مش + Lattic Girder 25 در فواصل ۱/۵ متر	۰/۰۲۰۸۳	۰/۲۷۴۸۳	۲/۱۰۱
مرحله چهارم حفاری	۲۵ سانتی‌متر شاتکریت تر + مش + Lattic Girder 25 در فواصل ۱/۵ متر	۰/۰۲۰۸۳	۰/۲۷۴۸۳	۲/۱۰۱

ج- تعیین جابجایی‌های قائم در تونل‌ها در مراحل مختلف حفاری

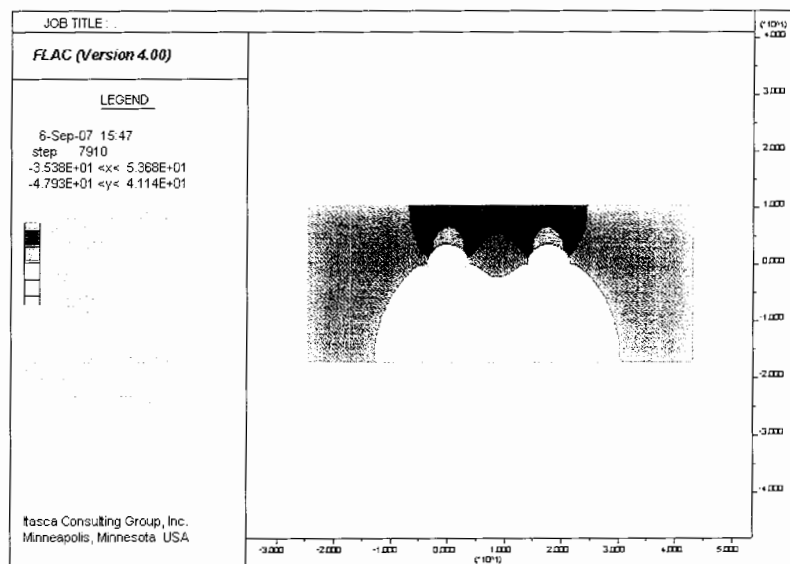
پس از حفاری مرحله اول، (قسمت بالای تونل سمت چپ) سیستم نگهداری اولیه با مشخصات تر نصب شده و سپس مرحله دوم، یعنی قسمت بالای تونل سمت راست حفر می‌کنیم. بعد از حفر مرحله دوم نیز سیستم نگهداری تر نصب می‌شود. در شکل ۴-۱۲ میزان جابجایی‌های قائم در طاق تونل اول نشان داده شده است. در شکل ۴-۱۳ میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفر طاق تونل دوم و نصب نگهداری اولیه نشان داده شده است. در شکل ۴-۱۴ میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفاری مرحله سوم و نصب نگهداری اولیه نشان داده شده است.

در شکل ۴-۱۵ میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفاری مرحله چهارم و نصب نگهداری اولیه در مقطع آبرفتی نشان داده شده است.

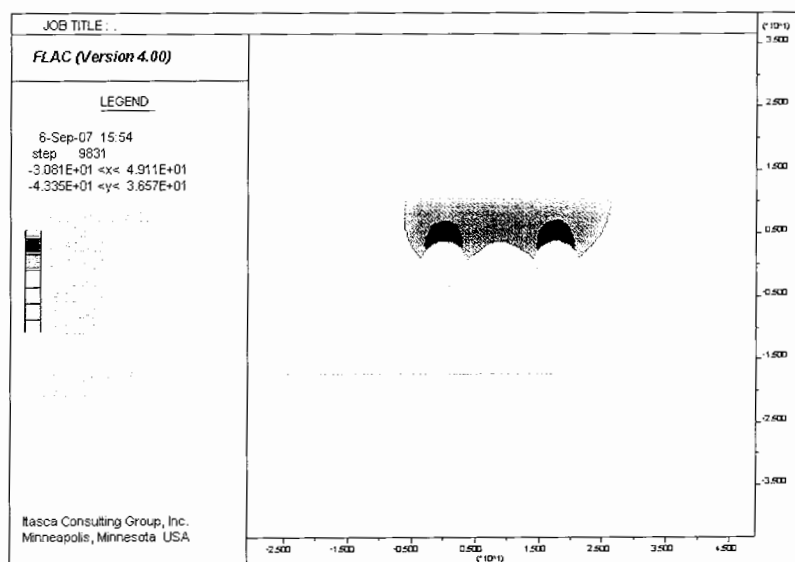
همین‌طور در شکل‌های ۴-۱۶ تا ۴-۱۹ میزان کنتورهای تنش عمودی (S_{yy}) در مراحل مختلف حفاری در مقطع آبرفتی نشان داده شده است.



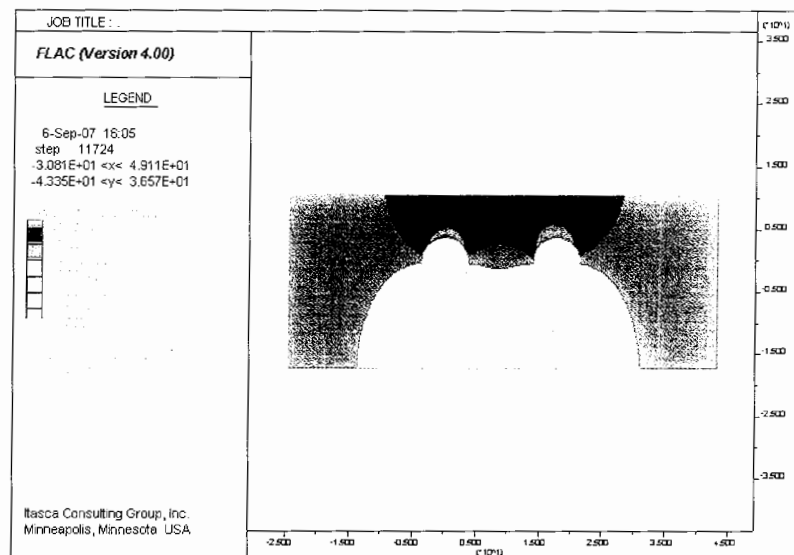
شکل ۴-۱۲ میزان جابجایی‌های قائم در بالای تونل اول (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



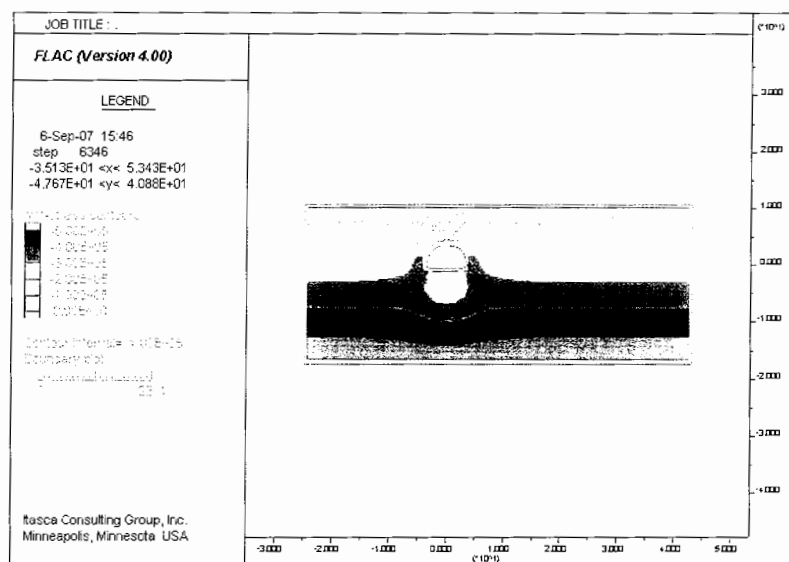
شکل ۴-۱۳ میزان جابجایی‌های قائم در مرحله دوم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



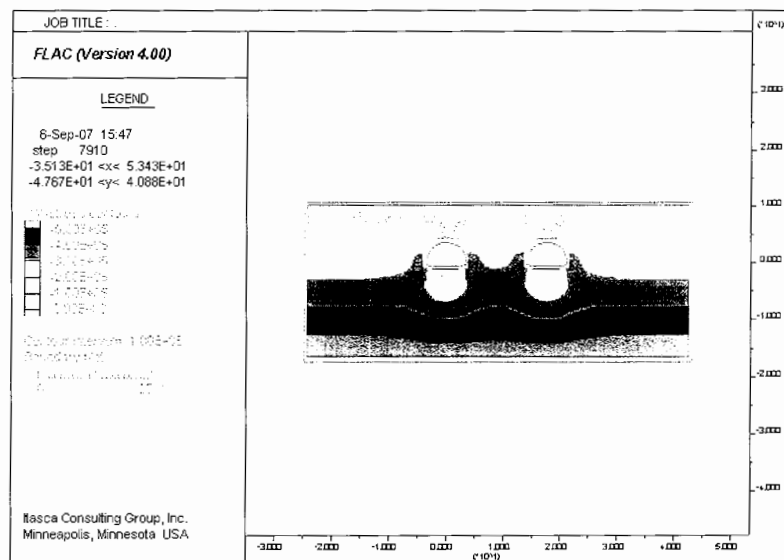
شکل ۴-۱۴ میزان جابجایی‌های قائم در مرحله سوم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



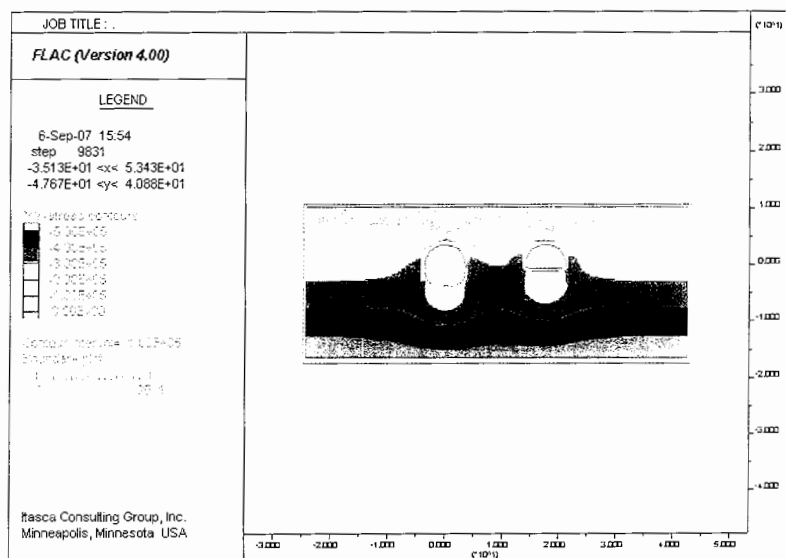
شکل ۴-۱۵ میزان جابجایی‌های قائم در مرحله چهارم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



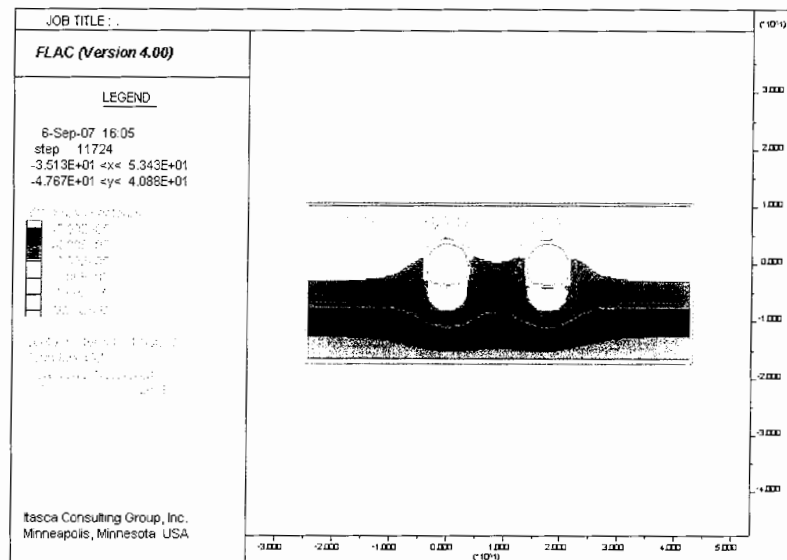
شکل ۴-۱۶ - کنتورهای تنش عمودی در مرحله اول حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



شکل ۴-۱۷ - کنتورهای تنش عمودی در مرحله دوم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



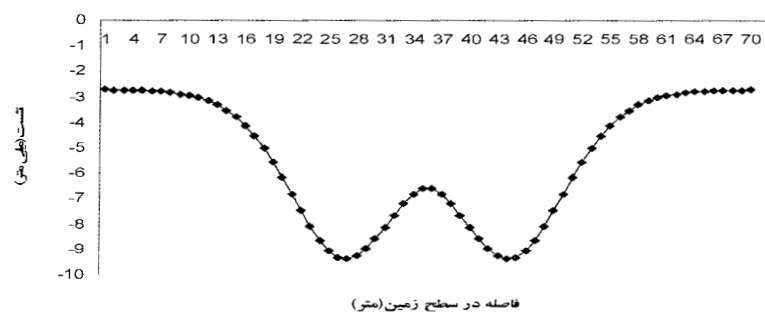
شکل ۴-۱۸ - کنتورهای تنش عمودی در مرحله سوم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



شکل ۴-۱۹- کنتورهای تنش عمودی در مرحله چهارم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار FLAC^{2D})

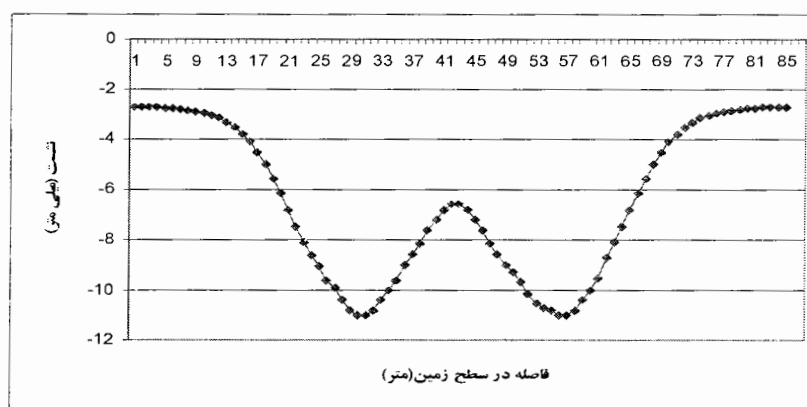
د- تعیین منحنی نشست در سطح زمین در مراحل مختلف حفاری توسط نرم افزار FLAC^{2D}

در شکل ۴-۲۰ میزان نشست در سطح زمین در مقطع آبرفتی بعد از مرحله دوم حفاری نشان داده شده است. میزان ماکزیمم نشست در سطح زمین بعد از مرحله دوم حفاری ۹/۴ میلی‌متر می‌باشد. در قسمت بین تونل‌ها منحنی به سمت بالا آمده، که به دلیل فاصله بین تونل‌ها و برهم کنش دو تونل نسبت به هم می‌باشد.



شکل ۴-۲۰ میزان نشست در سطح زمین بعد از مرحله دوم حفاری در مقطع آبرفت

در شکل ۴-۲۱ میزان نشست در سطح زمین در مقطع آبرفتی بعد از مرحله چهارم حفاری نشان داده شده است. میزان ماکزیمم نشست در سطح زمین بعد از مرحله دوم حفاری ۱۱ میلی‌متر می‌باشد.

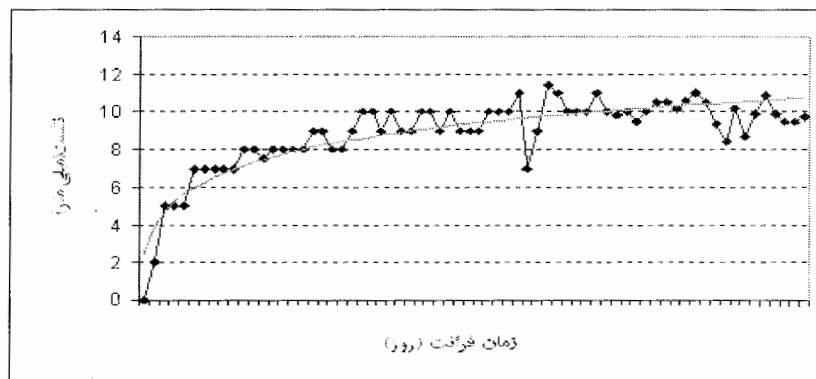


شکل ۴-۲۱ میزان نشست در سطح زمین بعد از مرحله چهارم حفاری در مقطع آبرفت

با توجه به این که در تونل‌های دوقلوی مترو اصفهان، فقط مراحل اول و دوم حفاری انجام شده است لذا نتایج واقعی با نتایج مدلسازی عددی فقط در همین دو حالت مقایسه می‌شود.

ه- نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در مقطع آبرفت

نتایج ابزار دقیق برای به دست آوردن میزان نشست ناشی از حفر مرحله اول و دوم حفاری در مقطع آبرفتی در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است. زمان قرائت این نتایج، بهار ۱۳۸۶ می‌باشد. همان طور که در شکل ۴-۲۲ مشاهده می‌شود، میزان نشست در مقطع آبرفتی ابتدا روند افزایشی و سپس در مقدار ۱۰ میلی‌متر تقریباً ثابت می‌شود. بعضی از قرائت‌ها با مقدار ۱۰ میلی‌متر نشست، اختلاف دارند. این اختلاف به دلیل، خطا در روش قرائت، جابجایی نشانه‌ها و عوامل دیگر است.



شکل ۴-۲۲ نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در مقطع آبرفت (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵)

۴-۳-۱-۲ تعیین منحنی نشست در سطح زمین با استفاده از روابط تجربی در مقطع آبرفت

الف - تعیین منحنی نشست در سطح زمین با استفاده از رابطه Peck

برای تعیین میزان نشست با استفاده از روابط تجربی Peck (رابطه ۲-۱۱)، ابتدا منحنی نشست یک تونل را با استفاده از رابطه مذکور محاسبه و سپس منحنی نشست در تونل دوم نیز با استفاده از همین رابطه محاسبه می‌شود. در نهایت منحنی مجموع از برآیند منحنی‌های نشست مربوط به هر تونل بدست می‌آید. به دلیل این که مشخصات دو تونل یکسان می‌باشد، لذا منحنی نشست هر دو تونل نیز یکسان خواهد بود. مقدار i با توجه به جدول ۴-۲ برابر با ۵ می‌باشد.

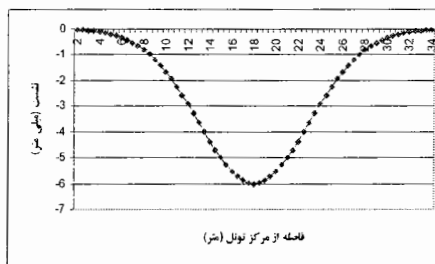
جدول ۴-۲ مقدار i با استفاده از فرمول‌های تجربی در مقطع آبرفت

مقدار متوسط i	مقدار i	رابطه	مأخذ
$i = 5$	۵/۶	$i = (0.45Z_0 + 0.57) \pm 1.01m$	Leach(1985)
	۴/۸۹	$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{2R}\right)^8$	Schmidt & Clough(1969)
	۴/۴۲	$i = 0.25(Z_0 + R)$	Atkinson & potts(1977)
	۵/۳	$i = 0.5 Z_0$	Mail & et al(1983)

بعد از محاسبه i میزان نشست ماکزیمم را از رابطه ۲-۱۶ محاسبه می‌کنیم.

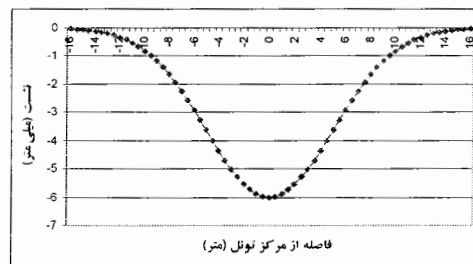
$$S_{\max} = \frac{3.13 V I D^2}{i} = 6 \text{ (mm)}$$

در شکل ۴-۲۳ و ۴-۲۴ میزان نشست در تونل‌ها با استفاده از رابطه ۴-۱۴، در هر تونل نشان داده شده است. در شکل ۴-۲۵ میزان نشست در منحنی نشست مجموع نشان داده شده، که برابر با ۶ میلی‌متر می‌باشد. با این تفاوت که در بین دو تونل، از میزان نشست کاسته شده است.



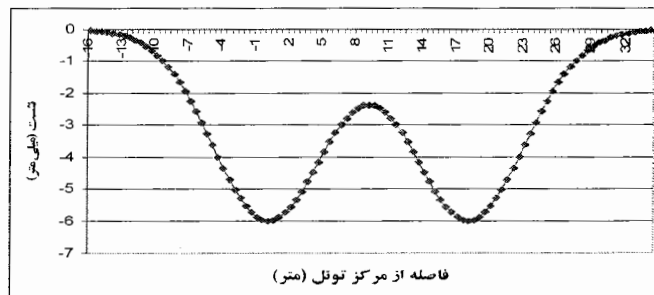
شکل ۴-۲۴ میزان نشست در تونل دوم با استفاده

از رابطه Peck



شکل ۴-۲۳ میزان نشست در تونل اول با استفاده

از رابطه Peck



شکل ۴-۲۵ میزان نشست در منحنی مجموع در مقطع آبرفتی

ب- تعیین ماکزیمم نشست در سطح زمین از رابطه تجربی Karakus & Fowell

با توجه به رابطه ۴-۲۴ میزان ماکزیمم نشست در مقطع آبرفتی، برابر با ۹/۱۸ میلی‌متر به دست می‌آید.

$$S_{\max} = 2S_{\max(s)} \left(\frac{w_p}{D} \right)^{-0.6804} = 9.18 \text{ mm}$$

با استفاده از این رابطه میزان ماکزیمم نشست در مقطع آبرفت بیشتر از ماکزیمم نشست رابطه Peck تخمین زده شده است.

۳-۱-۳-۴ تفسیر نتایج در مقطع آبرفت

میزان نشست، از روش مدل‌سازی عددی در اثر حفاری مرحله ۱ و ۲ با نتایج واقعی اختلاف کمی دارد، که در نتیجه روش عددی در مقطع آبرفتی نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. با توجه به این نتایج عددی، مدل‌سازی عددی برای مراحل سوم و چهارم حفاری ادامه داده شد. در جدول ۳-۴ نتایج مدل‌سازی عددی برای مراحل سوم و چهارم حفاری و نتایج تجربی با هم مقایسه شده است.

جدول ۳-۴ نتایج مدل‌سازی برای مراحل سوم و چهارم در مقطع آبرفت

روش تحلیل	میزان نشست ماکزیمم (میلی‌متر)
مدلسازی عددی	۱۱
روش تجربی Peck	۶
روش تجربی Karakus & Fowell	۹/۱۸

نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج تجربی Peck در مراحل سوم و چهارم حفاری، ۵ میلی‌متر اختلاف دارد و با روش تجربی Karakus & Fowell ۱/۸ میلی‌متر اختلاف دارد.

۲-۳-۴ پیش‌بینی نشست در مقطعی که تونل‌ها کاملاً در سنگ حفر شود

این مقطع در کیلومتر ۸+۹۲۰ واقع شده است با توجه به این که در هر سه مقطع، اندازه تونل‌ها ثابت است و فقط شرایط زمین شناسی منطقه بسیار تغییر می‌کند و فاصله تونل‌ها و ارتفاع طاق تونل از سطح زمین به میزان کمتری تغییر می‌کند. در مقطع سنگ به دلیل مقاومت بیشتر نسبت به محیط آبرفتی، انتظار داریم که میزان جابجایی‌ها در جهت قائم بسیار کمتر باشد در نتیجه

مقدار نشست کم‌تری در این مقطع حاصل می‌شود. مشخصات سیستم نگهداری اولیه نیز در مقطع سنگی مشابه با مشخصات سیستم نگهداری اولیه در مقطع آبرفت می‌باشد فقط قطر شاتکریت در قسمت سنگی برابر با ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. این مشخصات در جدول ۴-۴ آورده شده است (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).

جدول ۴-۴- مشخصات سیستم نگهداری اولیه در مراحل مختلف حفاری در مقطع سنگ

مراحل حفاری	مشخصات سیستم نگهداری اولیه	$I (m^4)$	$A(m^2)$	$E(Pa)$
مرحله اول حفاری	۲۰ سانتی‌متر شاتکریت تر + مش + Lattic Girder25 در فواصل ۱/۷۵ متر	۰/۰۱۶۶۶	۰/۲۲۴۸۳	۲/۱۵۱۰
مرحله دوم حفاری	۲۰ سانتی‌متر شاتکریت تر + مش + Lattic Girder25 در فواصل ۱/۷۵ متر	۰/۰۱۶۶۶	۰/۲۲۴۸۳	۲/۱۵۱۰
مرحله سوم حفاری	۲۰ سانتی‌متر شاتکریت تر + مش + Lattic Girder25 در فواصل ۱/۷۵ متر	۰/۰۱۶۶۶	۰/۲۲۴۸۳	۲/۱۵۱۰
مرحله چهارم حفاری	۲۰ سانتی‌متر شاتکریت تر + مش + Lattic Girder25 در فواصل ۱/۷۵ متر	۰/۰۱۶۶۶	۰/۲۲۴۸۳	۲/۱۵۱۰

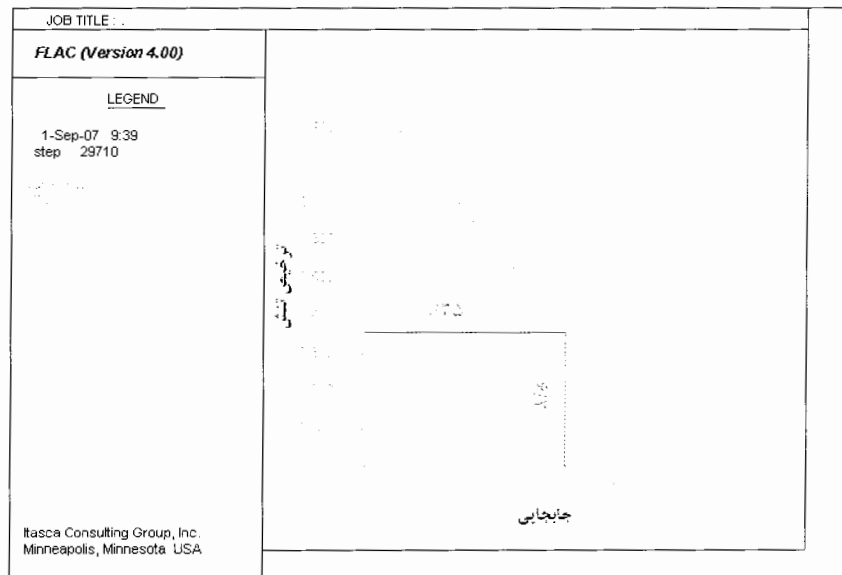
۴-۳-۲-۱ پیش‌بینی نشست با استفاده از مدلسازی عددی

فرآیند مدل‌سازی عددی در مقطع سنگ مشابه با مراحل مدل‌سازی در مقطع آبرفت می‌باشد. در این قسمت فقط نتایج مدل، در مقطع سنگ آورده شده است. ابتدا جابجایی‌های قائم را در مراحل مختلف حفاری بررسی کرده و سپس میزان نشست محاسبه شده است.

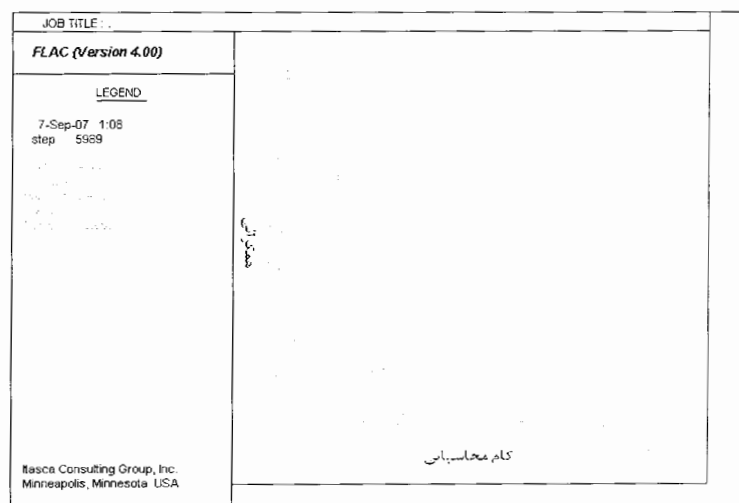
با توجه به شکل ۴-۲۶ و بررسی‌های انجام شده میزان ترخیص تنش اعمالی به مدل برای مقطع سنگی (معادل با ۱ میلی‌متر جابه‌جائی)، ۶۵ درصد محاسبه شد. شکل ۴-۲۷ میزان همگرایی به وجود

آمده در بخش نخست حفاری در نتیجه ترخیص تنش ۶۵ درصد برای مقطع سنگی را نشان

می‌دهد.



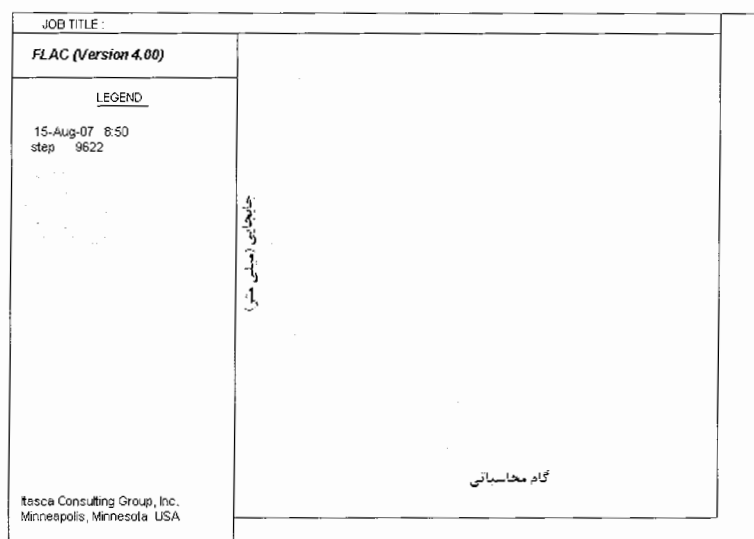
شکل ۴-۲۶- منحنی مشخصه زمین برای مقطع سنگ (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



شکل ۴-۲۷- همگرایی در بخش نخست حفاری برای مقطع سنگ (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)

۱- تعیین جابجایی‌های قائم در مراحل مختلف حفاری در مدل سنگی

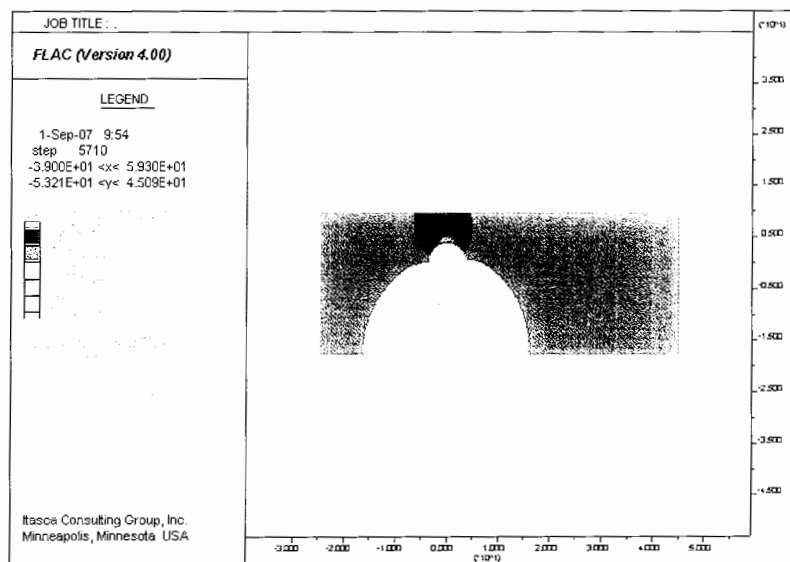
پس از حفاری مرحله اول، سیستم نگهداری اولیه با مشخصات تر نصب شده و سپس مرحله دوم، یعنی قسمت بالای تونل سمت راست حفر می‌کنیم. بعد از حفر مرحله دوم نیز سیستم نگهداری تر نصب می‌شود. در شکل ۴-۲۸ حداکثر میزان جابجایی‌های قائم در طاق تونل اول در مقطع سنگی نشان داده شده است. در واقع میزان جابجایی قائم در طاق تونل اول از ۲ میلی‌متر بیشتر نخواهد شد.



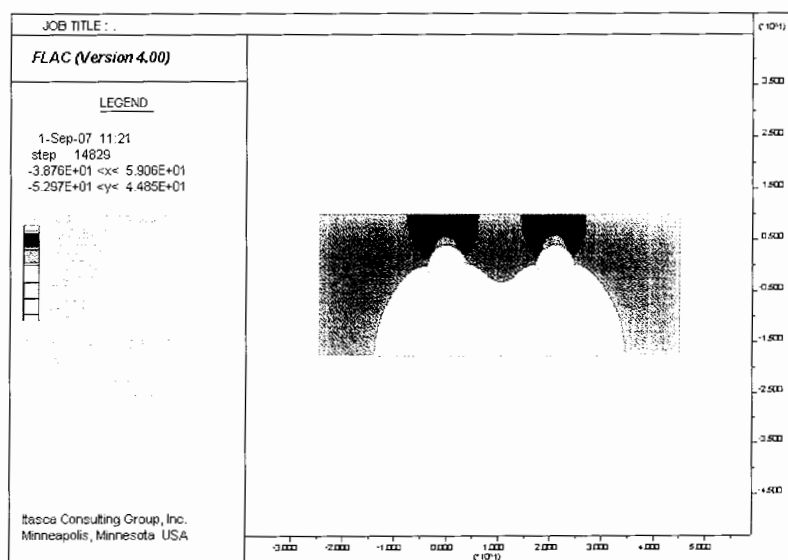
شکل ۴-۲۸ حداکثر میزان جابجایی‌های قائم در طاق تونل اول (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)

در شکل ۴-۲۹ میزان جابجایی‌های قائم در طاق تونل اول نشان داده شده است. در شکل ۴-۲۹ نشان داده شده که میزان جابجایی‌های قائم در اثر حفر مرحله اول حفاری در مقطع سنگی، با توجه به مقاومت بیشتر سنگ، نسبت به مقطع آبرفتی بسیار کم‌تر شده است. در شکل ۴-۳۰ میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفر طاق تونل دوم و نصب نگهداری اولیه در مقطع سنگی نشان داده شده است. در شکل ۴-۳۱ میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفاری مرحله چهارم و نصب نگهداری اولیه

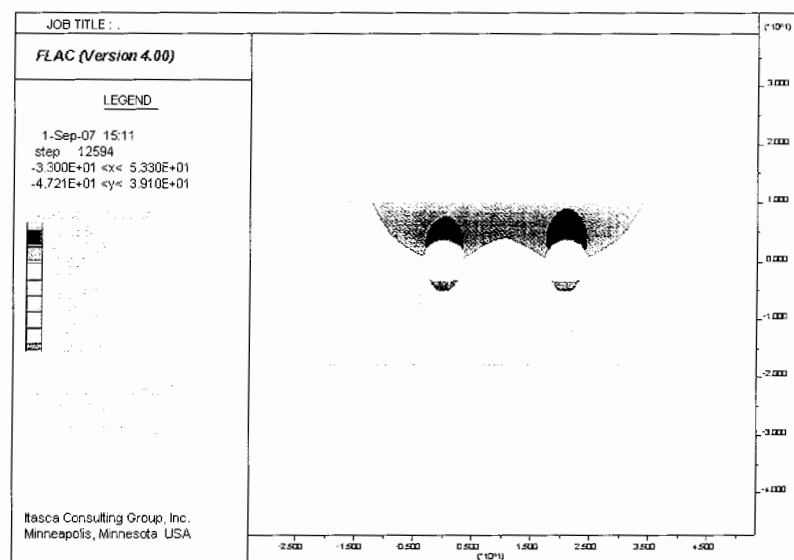
در مقطع سنگی نشان داده شده است. در شکل‌های ۴-۳۲ تا ۴-۳۵ میزان کنترهای تنش عمودی در مراحل مختلف حفاری در مقطع سنگی نشان داده شده است.



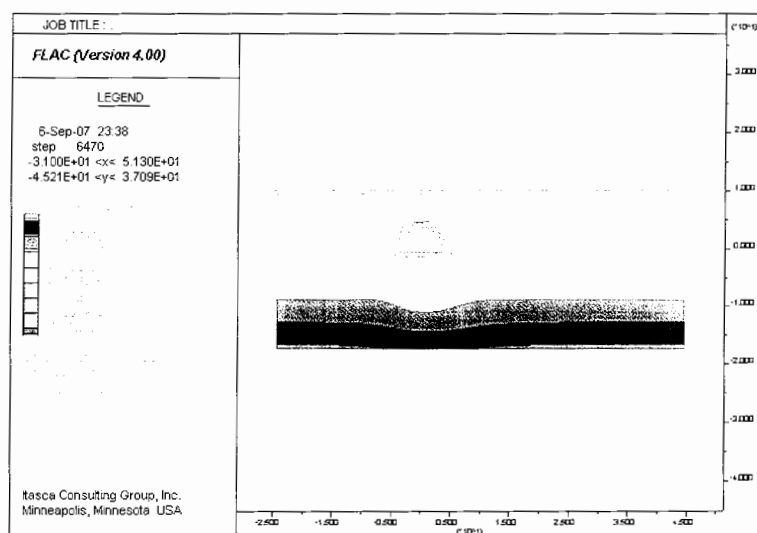
شکل ۴-۲۹- میزان جابجایی‌های قائم در طاق تونل اول (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



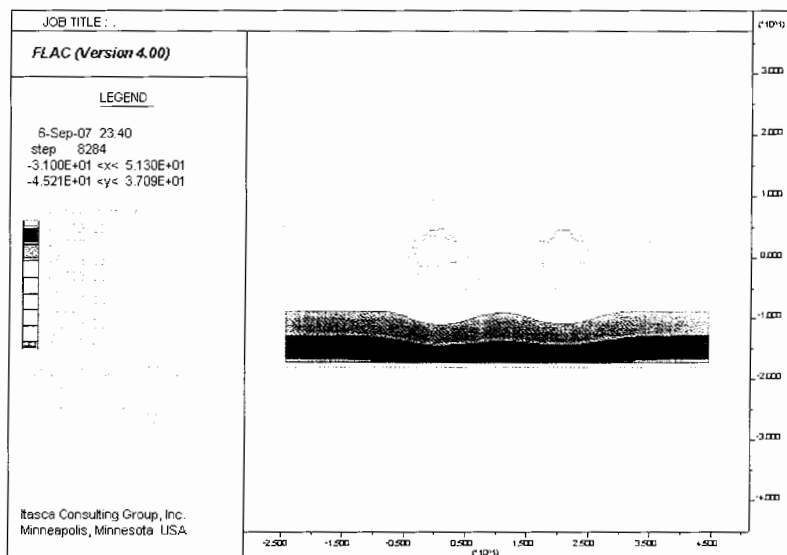
شکل ۴-۳۰- میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفر طاق تونل دوم (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



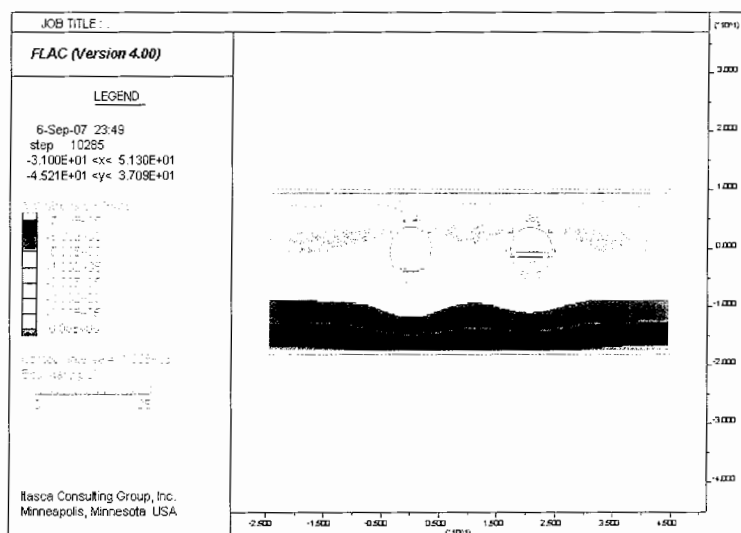
شکل ۴-۳۱ میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفاری مرحله چهارم (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



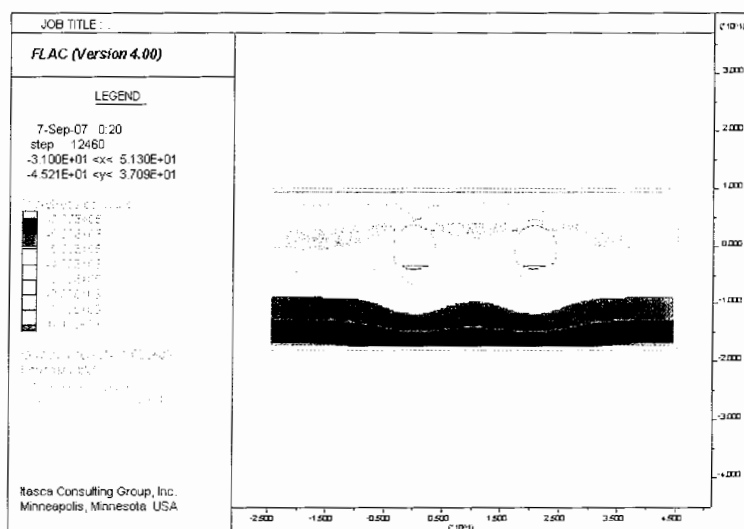
شکل ۴-۳۲- کنتورهای تنش عمودی در مرحله اول حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



شکل ۴-۳۳- کنتورهای تنش عمودی در مرحله دوم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



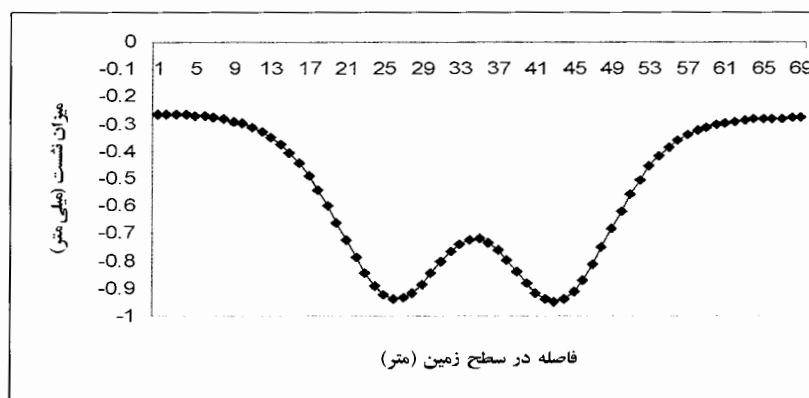
شکل ۴-۳۴- کنتورهای تنش عمودی در مرحله سوم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



شکل ۴-۳۵- کنتورهای تنش عمودی در مرحله چهارم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)

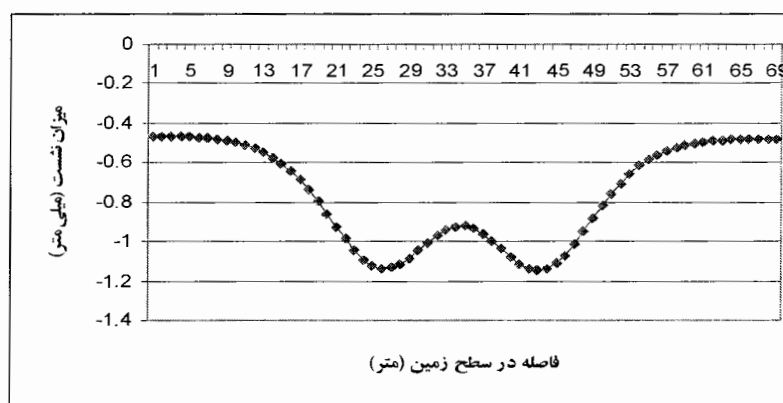
۲- تعیین منحنی نشست در سطح زمین در مراحل مختلف حفاری توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$

در شکل ۴-۳۶ میزان نشست در سطح زمین در مقطع سنگی بعد از مرحله دوم حفاری نشان داده شده است. میزان ماکزیمم نشست در سطح زمین بعد از مرحله دوم حفاری ۰/۹۵ میلی متر می باشد.



شکل ۴-۳۶ میزان نشست در سطح زمین بعد از مرحله دوم حفاری در مقطع سنگ

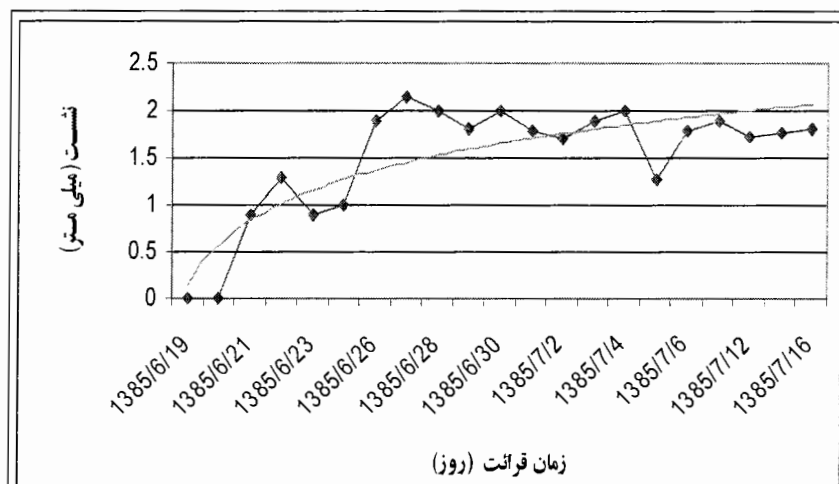
در شکل ۴-۳۷ میزان نشست در سطح زمین در مقطع سنگی بعد از مرحله چهارم حفاری نشان داده شده است. میزان ماکزیمم نشست در سطح زمین بعد از مرحله چهارم حفاری ۰/۱۵ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۴-۳۷ میزان نشست در سطح زمین بعد از مرحله چهارم حفاری در مقطع سنگ

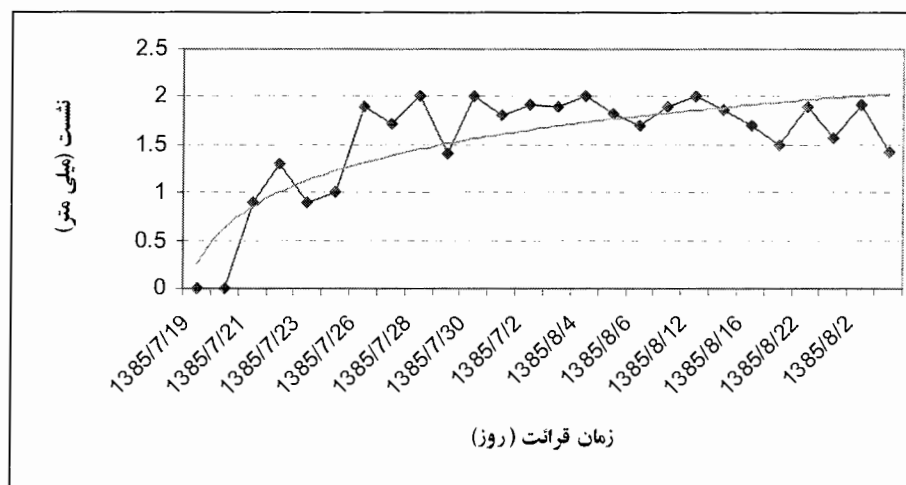
۳- نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در مقطع سنگ

نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در مقطع سنگ در شکل‌های ۴-۳۸ و ۴-۳۹ نشان داده شده است. نتایج منحنی‌های نشست بر حسب زمان، در سه ماه شهریور و مهر و آبان به دست آمده است. با توجه به نتایج ابزار دقیق مشاهده می‌شود که حداکثر جابجایی در مقطع سنگ برابر با ۲ میلی‌متر می‌باشد (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵).



شکل ۳۸-۴ نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در ماه‌های

شهریور و مهر (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵)



شکل ۳۹-۴ نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در ماه‌های مهر و آبان (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵)

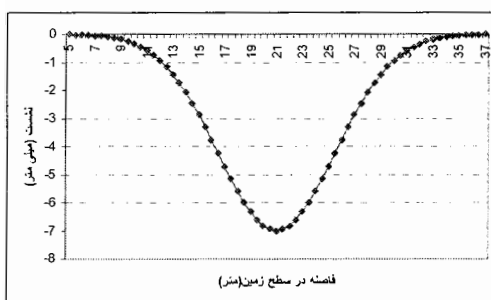
میزان نشست، از روش مدل‌سازی عددی در اثر حفاری مرحله ۱ و ۲ حدود یک میلی‌متر

است که با نتایج واقعی اختلاف کمی دارد.

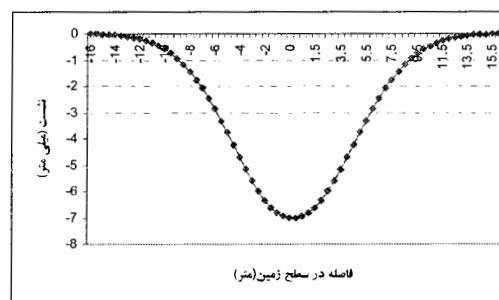
۲-۲-۳-۴ تعیین منحنی نشست در سطح زمین توسط روابط تجربی در مقطع سنگی

الف- تعیین منحنی نشست در سطح زمین توسط رابطه تجربی Peck

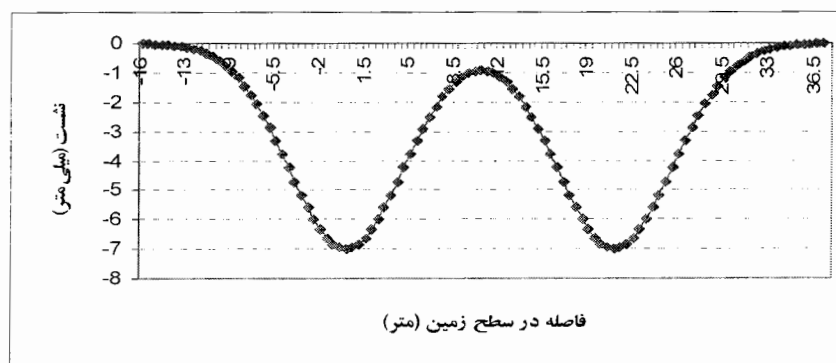
مقدار i با استفاده از فرمول‌های تجربی در جدول ۲-۱ برابر با $4/5$ و در نتیجه ماکزیمم نشست با توجه به رابطه ۲-۱۶ برابر با ۷ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۴-۴۰ و ۴-۴۱ میزان نشست در تونل اول و دوم به ترتیب، نشان داده شده است. و در شکل ۴-۴۲ منحنی مجموع (برآیند منحنی نشست هر تونل) نشان داده شده است.



شکل ۴-۴۱ میزان نشست در تونل دوم با استفاده از رابطه Peck در مقطع سنگ



شکل ۴-۴۰ میزان نشست در تونل اول با استفاده از رابطه Peck در مقطع سنگ



شکل ۴-۴۲ میزان نشست در منحنی مجموع در مقطع سنگ

ب- تعیین ماکزیمم نشست در سطح زمین از رابطه تجربی Karakus & Fowell

با استفاده از رابطه ۲-۲۴ میزان نشست ماکزیمم در سطح زمین از رابطه تجربی Karakus & Fowell

Karakus برابر $8/9$ میلی‌متر بدست می‌آید.

$$S_{\max} = 2S_{\max(s)} \left(\frac{w_p}{D} \right)^{-0.6804} = 8.9 \text{ mm}$$

با توجه به رابطه ۲-۱۷ میزان ماکزیمم نشست در مقطع سنگی برابر با ۳ میلی‌متر به دست می‌آید.

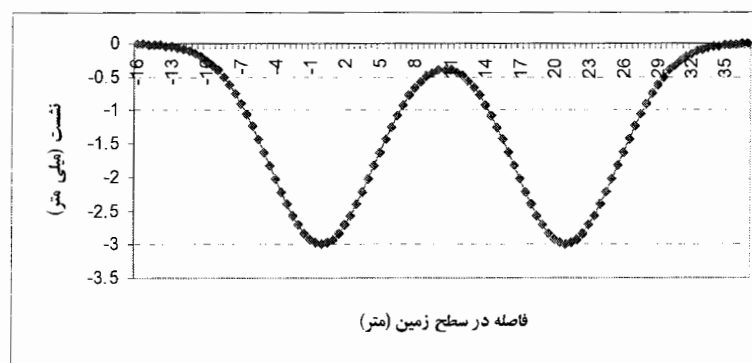
$$V_s = AK = 2.5iS_{\max} = 3 \text{ mm}$$

با توجه به رابطه ۲-۱۷ میزان نشست محاسبه شده کمتر از میزان نشست ماکزیمم در سطح

زمین از رابطه تجربی ۲-۱۶ می‌باشد. و لذا $S_{\max}$ در رابطه ۲-۲۴ برابر با ۳/۸ میلی‌متر محاسبه

می‌شود. در شکل ۴-۴۳ میزان نشست در منحنی مجموع در مقطع سنگ برای حالتی که

($S_{\max} = 3 \text{ mm}$) می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل ۴-۴۳ میزان نشست در منحنی مجموع در مقطع سنگ ($S_{\max} = 3 \text{ mm}$)

۳-۲-۳-۴ تفسیر نتایج در مقطع سنگی

در جدول ۴-۵ نتایج مدلسازی برای مراحل سوم و چهارم در مقطع سنگی نشان داده شده

است.

جدول ۴-۵ نتایج مدل‌سازی برای مراحل سوم و چهارم در مقطع سنگ

روش تحلیل	میزان نشست ماکزیمم (میلی‌متر)
مدلسازی عددی	۱/۱۵
روش تجربی Peck	۷
روش تجربی Karakus & Fowell	۸/۹
روش تجربی Peck با $S_{\max} = 3 \text{ mm}$	۳
روش تجربی Karakus & Fowell با $S_{\max} = 3 \text{ mm}$	۳/۸

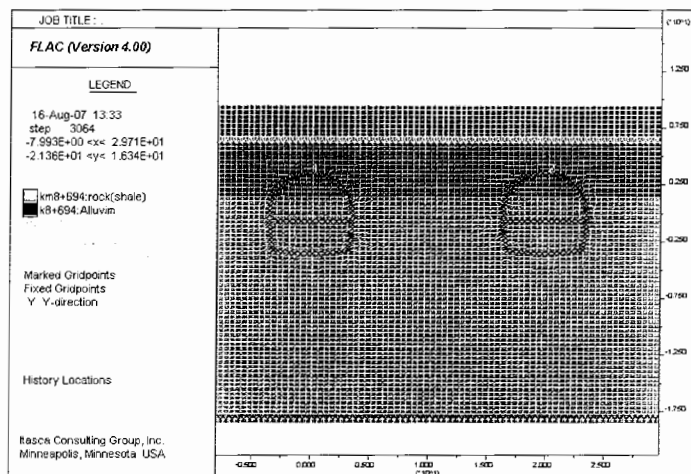
با توجه به جدول ۴-۵، میزان نشست در روابط تجربی بیشتر از نتایج مدل‌سازی عددی می‌باشد. هر چه میزان نشست ماکزیمم در نتایج تجربی به میزان واقعی نزدیکتر باشد، منحنی نشست دقیق‌تری به دست می‌آید.

۴-۳-۳ پیش‌بینی نشست در مقطعی که تونل‌ها کاملاً در سنگ و آبرفت حفر شود

این مقطع در کیلومتر ۸+۶۹۴ واقع شده است. با توجه به شرایط زمین‌شناسی منطقه در این مقطع، انتظار داریم که میزان جابجایی‌های قائم در محیط آبرفتی که در قسمت بالای مدل می‌باشد جابجایی بیشتر و در محیط سنگی جابجایی کم‌تری داشته باشیم.

۴-۳-۳-۱ پیش‌بینی نشست با استفاده از مدل‌سازی عددی

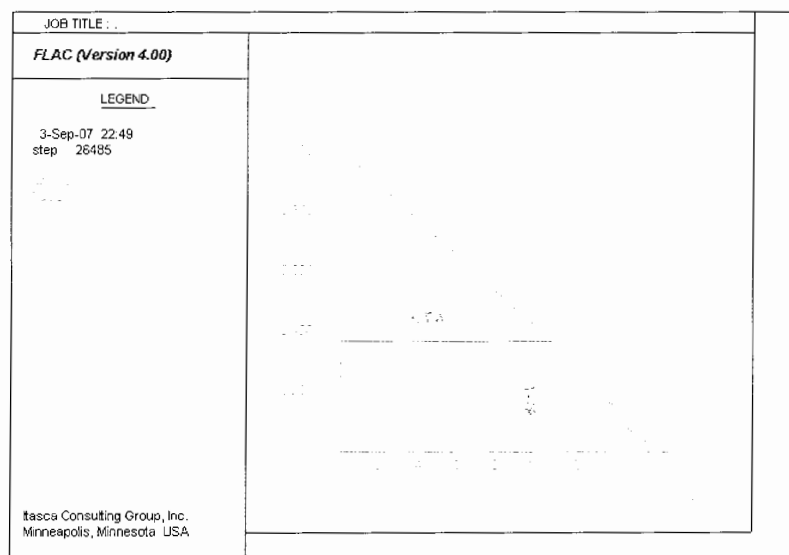
در شکل ۴-۴۴ مدل سنگ و آبرفت را نشان می‌دهد که توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$ رسم شده است.



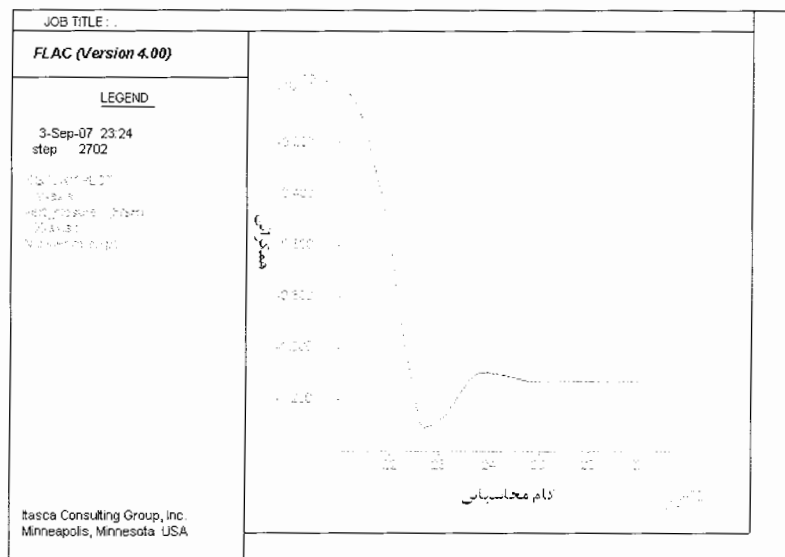
شکل ۴-۴ مدل سنگ و آبرفت (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)

شکل‌های ۴-۴۵ و ۴-۴۶ و ۴-۴۷ به ترتیب منحنی مشخصه زمین، میزان همگرایی در بخش

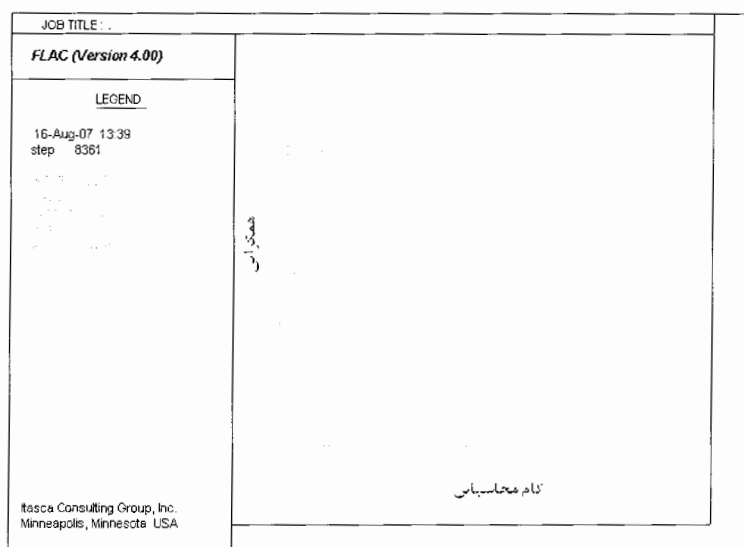
نخست حفاری و میزان جابجایی حداکثر را در تاج تونل اول نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴۵- منحنی مشخصه زمین برای مقطع سنگ و آبرفت (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



شکل ۴-۴- همگرایی در بخش نخست حفاری برای مقطع سنگ و آبرفت (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)

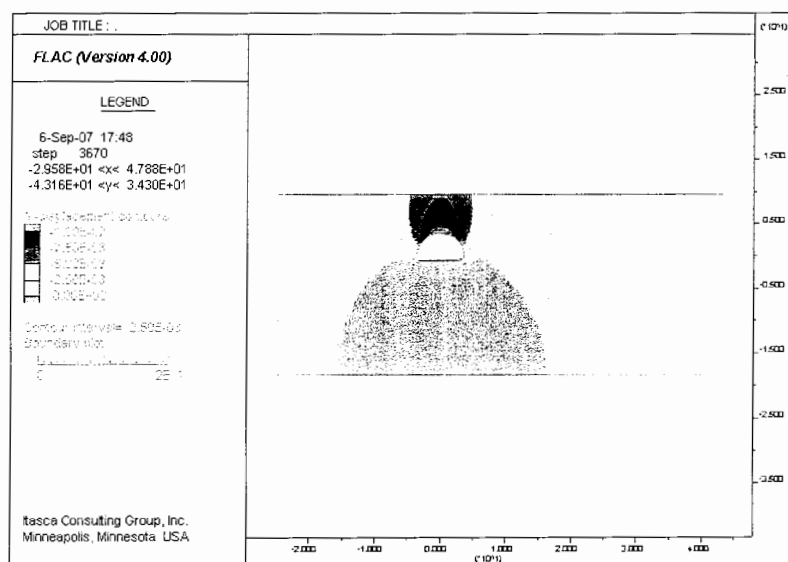


شکل ۴-۴۷ میزان جابجایی قائم حداکثر را در تاج تونل اول (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)

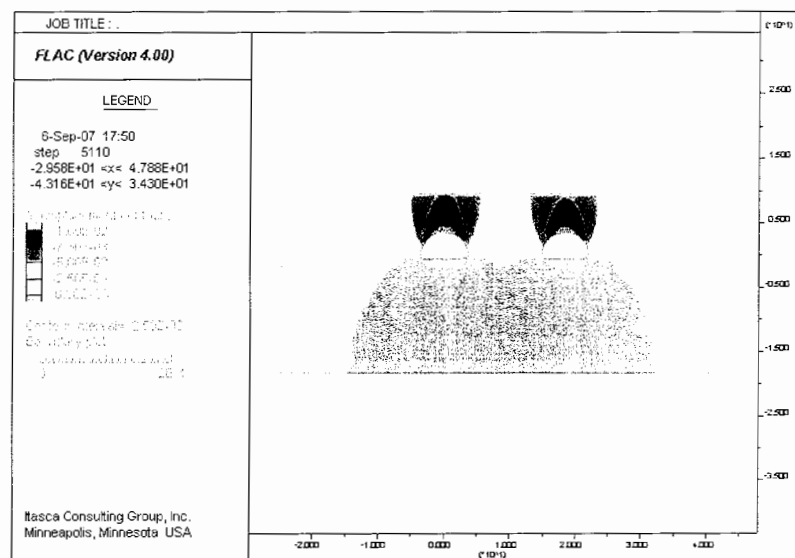
۱- تعیین جابجایی‌های قائم در مراحل مختلف حفاری در مدل سنگ و آبرفت

همان طور که در شکل ۴-۴۷ دیده می‌شود، میزان جابجایی قائم حداکثر را در تاج تونل اول برابر با ۱۸ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۴-۴۸ که میزان جابجایی‌های قائم در اثر حفر مرحله اول حفاری و در شکل ۴-۴۹ میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفر طاق تونل دوم در مقطع سنگ و آبرفت نشان داده شده است. در شکل ۴-۵۰ و ۴-۵۱ میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفاری مرحله سوم و چهارم در مقطع سنگ و آبرفت نشان داده شده است.

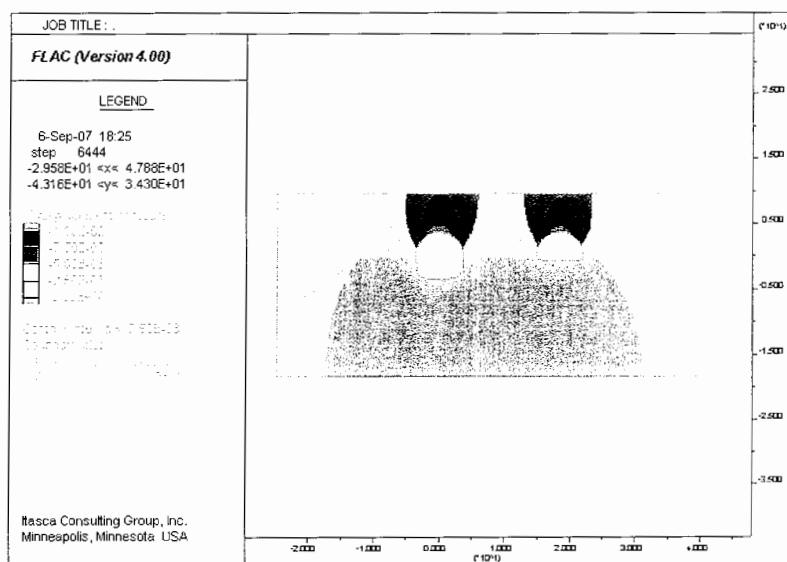
همین‌طور در شکل‌های ۴-۵۲ تا ۴-۵۵ میزان کنترهای تنش عمودی در مراحل مختلف حفاری در مقطع سنگ و آبرفت نشان داده شده است.



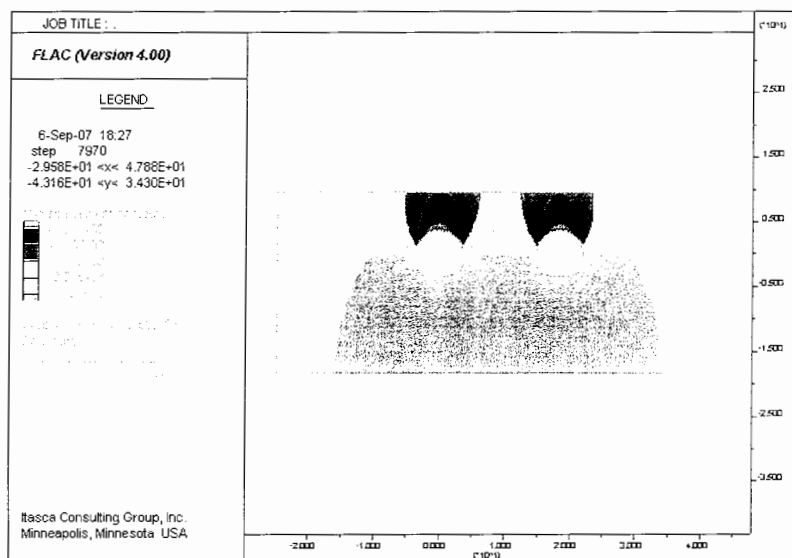
شکل ۴-۴۸ میزان جابجایی‌های قائم در اثر حفر مرحله اول حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



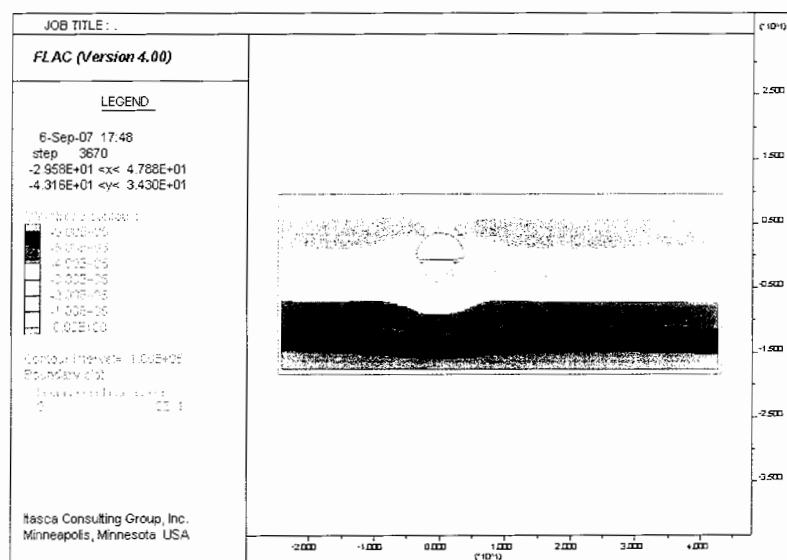
شکل ۴-۴۹ میزان جابجایی‌های قائم در اثر حفر مرحله دوم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



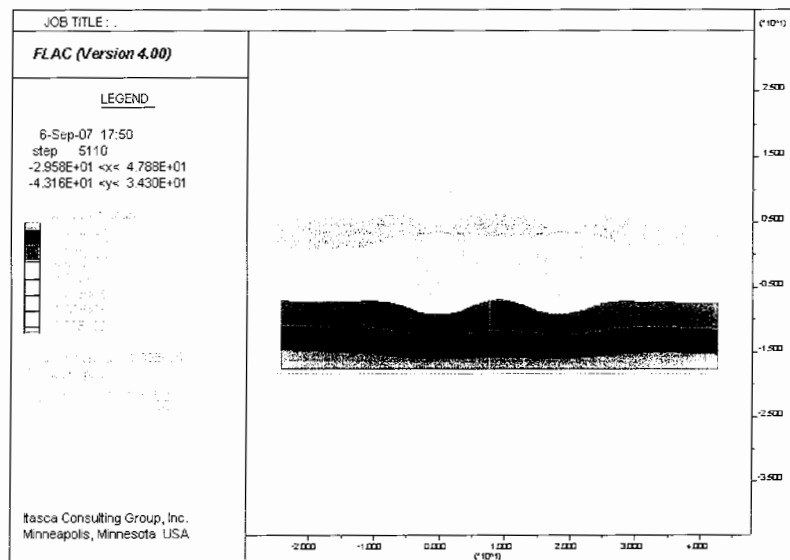
شکل ۴-۵۰ میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفاری مرحله سوم (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



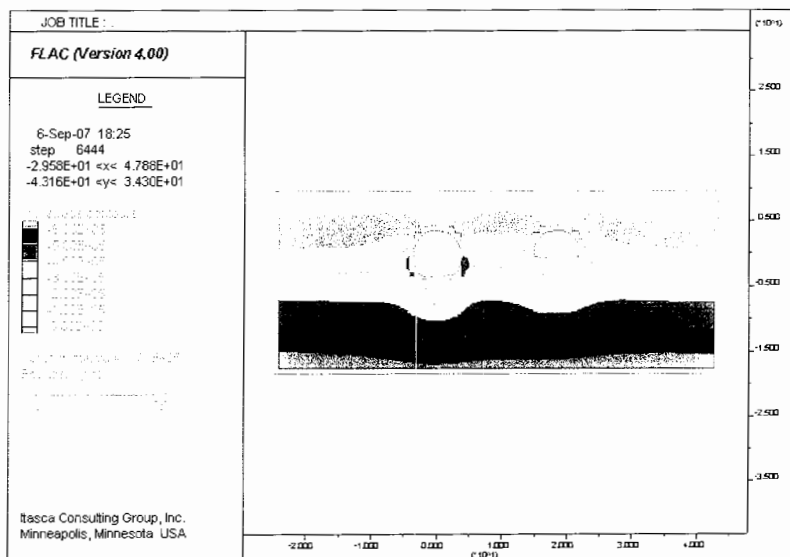
شکل ۴-۵۱ میزان جابجایی‌های قائم بعد از حفاری مرحله چهارم (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



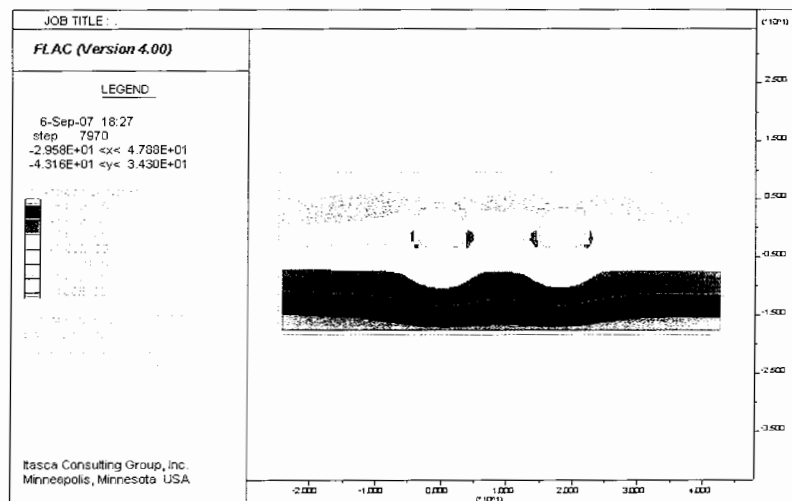
شکل ۴-۵۲- کنتورهای تنش عمودی در مرحله اول حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



شکل ۴-۵۳- کنتورهای تنش عمودی در مرحله دوم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



شکل ۴-۵۴- کنتورهای تنش عمودی در مرحله سوم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)



شکل ۴-۵۵- کنتورهای تنش عمودی در مرحله چهارم حفاری (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)

۲- تعیین منحنی نشست در سطح زمین در مراحل مختلف حفاری توسط نرم‌افزار $FLAC^{2D}$

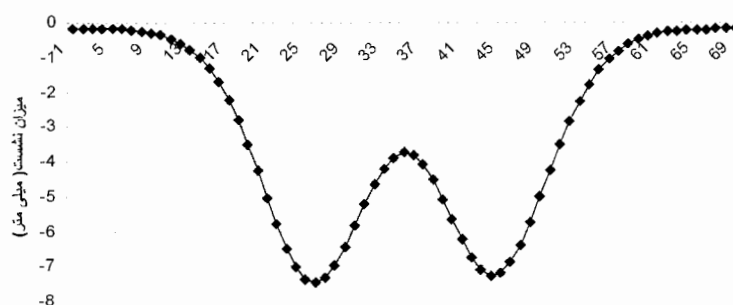
در شکل ۴-۵۶ میزان نشست در سطح زمین در مقطع سنگ و آبرفت بعد از مرحله دوم

حفاری نشان داده شده است. میزان ماکزیمم نشست در سطح زمین بعد از مرحله دوم حفاری ۷/۴

میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۴-۵۷ میزان نشست در سطح زمین در مقطع سنگ و آبرفت بعد از

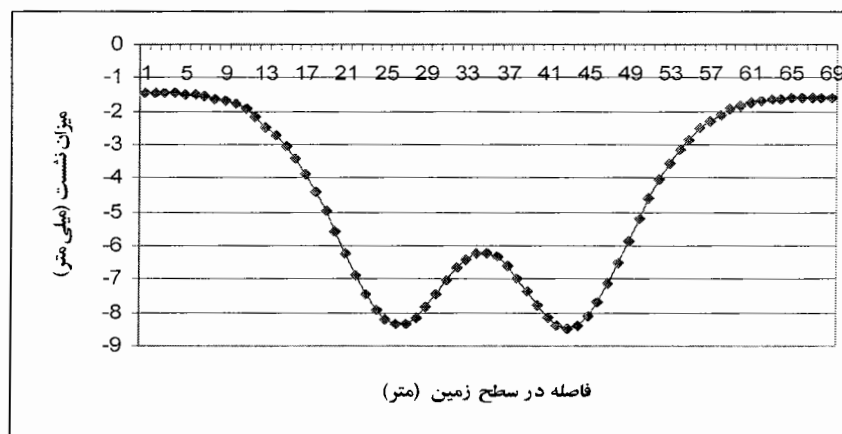
مرحله چهارم حفاری نشان داده شده است. میزان ماکزیمم نشست در سطح زمین بعد از مرحله

چهارم حفاری ۸/۴ میلی‌متر می‌باشد.



فاصله در سطح زمین (متر)

شکل ۴-۵۶- میزان نشست در سطح زمین بعد از مرحله دوم حفاری در مقطع سنگ و آبرفت



شکل ۴-۵۷ میزان نشست در سطح زمین بعد از مرحله چهارم حفاری در مقطع سنگ و آبرفت

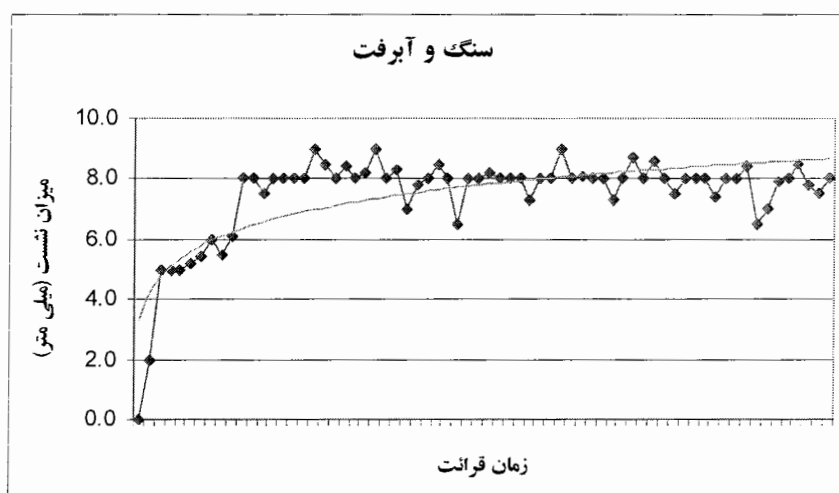
۳- نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در مقطع سنگ و آبرفت

نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در مقطع سنگ و آبرفت در شکل‌های ۴-۵۸ و ۴-۵۹

۵۹ نشان داده شده است. نتایج منحنی‌های نشست بر حسب زمان، در سه ماه شهریور و مهر و آبان

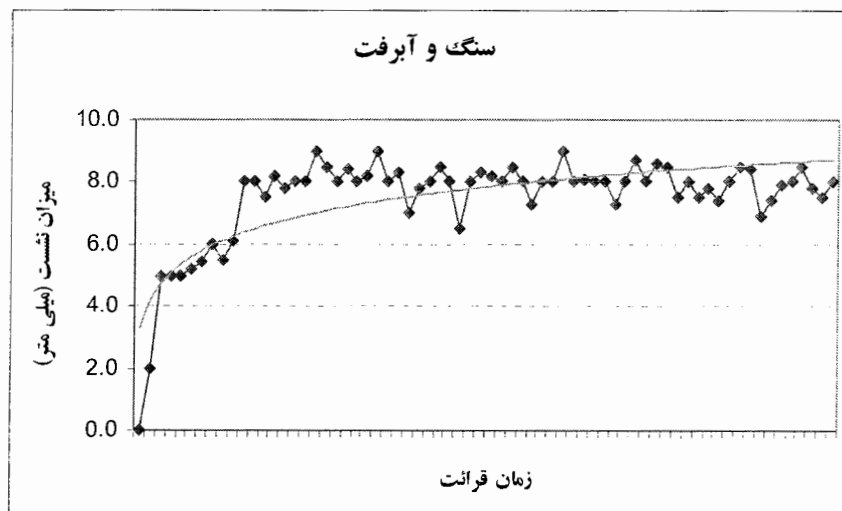
به دست آمده است. با توجه به نتایج ابزار دقیق مشاهده می‌شود که حداکثر جابجایی در مقطع

سنگ و آبرفت برابر با ۸ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۴-۵۸ نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در ماه‌های

شهریور و مهر (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵)



شکل ۴-۵۹ نتایج ابزار دقیق در محاسبه میزان نشست در

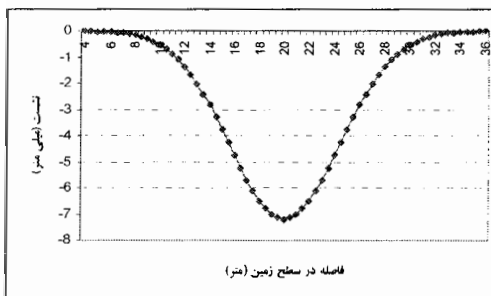
ماه‌های مهر و آبان (مهندسین مشاور کاوشگران، ۱۳۸۵)

با توجه به نتایج ابزار دقیق در می‌یابیم که، روش مدلسازی عددی، در مقطع سنگ و آبرفت نتایج بسیار خوبی به دست می‌آورد.

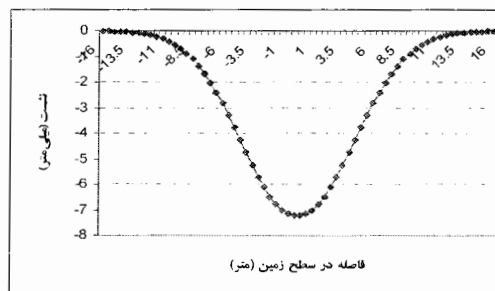
۴-۳-۲ تعیین منحنی نشست در سطح زمین توسط روابط تجربی در مقطع سنگ و آبرفت

الف- تعیین منحنی نشست در سطح زمین توسط رابطه تجربی Peck

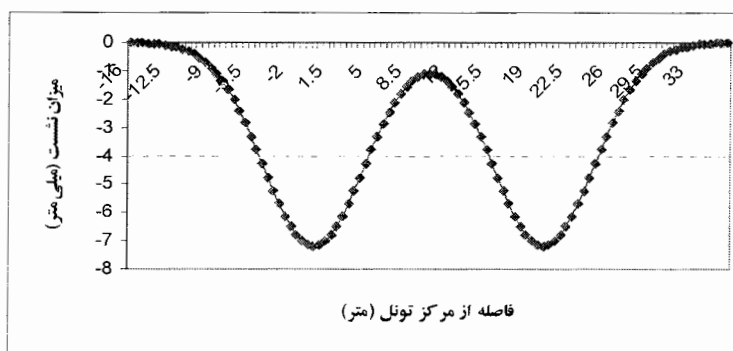
مقدار i با استفاده از فرمول‌های تجربی در جدول ۲-۱ برابر با $4/4$ و در نتیجه ماکزیمم نشست با توجه به رابطه ۲-۱۶ برابر با $7/2$ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۴-۶۰ و ۴-۶۱ میزان نشست در تونل اول و دوم با استفاده از رابطه ۲-۱۴ مشاهده می‌شود. و در شکل ۴-۶۲ منحنی مجموع (برآیند منحنی نشست هر تونل) در مقطع سنگ و آبرفت نشان داده شده است.



شکل ۴-۶۱ میزان نشست در تونل دوم با استفاده از رابطه Peck در مقطع سنگ و آبرفت



شکل ۴-۶۰ میزان نشست در تونل اول با استفاده از رابطه Peck در مقطع سنگ و آبرفت



شکل ۴-۶۲ میزان نشست در منحنی مجموع در مقطع سنگ و آبرفت

ب- تعیین ماکزیمم نشست در سطح زمین از رابطه تجربی Karakus & Fowell

با استفاده از رابطه ۲-۲۴ میزان نشست ماکزیمم در سطح زمین از رابطه تجربی

Karakus & Fowell برابر $9/6$ میلی‌متر بدست می‌آید.

$$S_{\max} = 2S_{\max(s)} \left(\frac{w_p}{D} \right)^{-0.6804} = 9.6 \text{ mm}$$

۴-۳-۳-۳ تفسیر نتایج در مقطع سنگ و آبرفت

در جدول ۴-۶ نتایج مدلسازی برای مراحل سوم و چهارم در مقطع سنگ و آبرفت نشان داده

شده است.

جدول ۴-۶ نتایج مدل‌سازی برای مراحل سوم و چهارم در مقطع سنگ و آبرفت

میزان نشست ماکزیمم (میلی‌متر)	روش تحلیل
۸/۴	مدلسازی عددی
۷	روش تجربی Peck
۹/۶	روش تجربی Karakus & Fowell

میزان نشست در نتایج مدل‌سازی عددی در مراحل سوم و چهارم حفاری برابر با ۸/۴ میلی‌متر می‌باشد. و با نتایج تجربی ۰/۶ میلی‌متر اختلاف دارد.

۴-۴-۴- ارزیابی نتایج در مقاطع مختلف

مدلسازی عددی در تعیین میزان نشست تونل‌های دوقلوی مترو اصفهان نتایج بسیار قابل قبولی به دست می‌آورد. با توجه به اینکه میزان نشست مجاز در زیر خیابان کم‌تر از ۲ سانتی‌متر و در زیر ساختمان‌ها کم‌تر از ۱ سانتی‌متر است، لذا در هر سه مقطع میزان نشست محاسبه شده، کم‌تر از نشست مجاز می‌باشد. مقطع آبرفتی با توجه به شرایط زمین‌شناسی منطقه، میزان نشست بیشتری نسبت به مقاطع دیگر دارد. در مقطع سنگ و آبرفت با توجه به این موضوع که، مراحل سوم و چهارم حفاری در محیط سنگی قرار دارند لذا، با حفر این دو مرحله جابجایی بسیار کمی ایجاد می‌شود. در مقطع سنگی با توجه به مشخصات زمین‌شناسی منطقه نشست بسیار کمی ایجاد شده و حتی با حفر مراحل سوم و چهارم حفاری تونل‌های دوقلوی مترو اصفهان، منحنی نشست تغییر زیادی ندارد.

فصل پنجم:

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

با توجه به این موضوع که تاکنون، محاسبه میزان نشست تونل‌های دوقلوی مترو اصفهان با روش عددی انجام نشده است و روش‌های عددی، نتایج بسیار قابل قبولی ارائه می‌دهند لذا در این تحقیق برای پیش‌بینی نشست ناشی از حفر تونل‌های دوقلوی مترو اصفهان از روش مدلسازی عددی (نرم‌افزار $FLAC^{2D}$) استفاده شده و در نهایت، نتایج مدلسازی عددی با نتایج واقعی و تجربی مقایسه شده است. در پایان، به نتایج و پیشنهاداتی که از انجام این تحقیق به دست آمده اشاره می‌شود:

۵-۱-۱ نتیجه‌گیری

- ۱- براساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های کارگاهی حداکثر نشست حاصل از حفر تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان در منطقه مورد نظر کم‌تر از مقدار نشست مجاز (یک سانتی‌متر در زیر ساختمان‌ها و ۲ سانتی‌متر در سطح خیابان) می‌باشد.
- ۲- در این منطقه نشست حداکثر در دو منطقه درست در بالای تونل‌ها اتفاق افتاده است و در بین تونل‌های دوقلو میزان نشست کم می‌شود. که به احتمال زیاد این امر ناشی از برهم کنش دو تونل و

تأثیر کم دو تونل بر یکدیگر به دلیل فاصله بیشتر از دو برابر قطر تونل‌ها می‌باشد. در واقع با افزایش فاصله تونل‌ها اثر هر تونل بر دیگری از بین می‌رود.

۳- میزان نشست حداکثر به دست آمده از روش تفاضل محدود توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$ در مقطع آبرفتی برابر ۱۱ میلی‌متر می‌باشد.

۴- میزان نشست حداکثر به دست آمده از روش تفاضل محدود توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$ در مقطع سنگی برابر ۱ میلی‌متر می‌باشد.

۵- میزان نشست حداکثر به دست آمده از روش تفاضل محدود توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$ در مقطع سنگ و آبرفت برابر ۸/۴ میلی‌متر می‌باشد.

۶- میزان نشست حداکثر به دست آمده از روش تجربی در مقطع آبرفت برابر با ۶ تا ۹ میلی‌متر و در مقطع سنگ و آبرفت ۷ تا ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین میزان نشست حداکثر به دست آمده از روش تجربی در مقطع سنگی برابر با ۳ تا ۷ میلی‌متر می‌باشد. مشاهده می‌شود که نتایج تجربی میزان نشست بسیار بیشتری در مقطع سنگی نسبت به نتایج عددی می‌دهد و در دو مقطع دیگر این اختلاف کم‌تر می‌باشد.

۷- با مقایسه میزان نشست حداکثر در نتایج عددی با میزان نشست حداکثر در نتایج واقعی در می‌یابیم که نتایج عددی اختلاف بسیار کمی با نتایج واقعی دارد. این حالت نشان‌گر صحت مدل در مقاطع مختلف، در نرم افزار $FLAC^{2D}$ می‌باشد.

۸- روش‌های تجربی برای مناطق خاص اجرا شده‌اند و نتایج آن برای همان مناطق قابل قبول می‌باشد و روش مناسبی برای پیش‌بینی نشست در اثر حفر تونل‌ها نمی‌باشد اما به کارگیری

روش‌های عددی روز به روز با استقبال بیشتری مواجه شده است. نتایج عددی در تعیین میزان نشست حداکثر، نتایج بسیار قابل قبولی ارائه می‌دهد ولی به نتایج تجربی نمی‌توان اعتماد کرد.

۵-۱-۲ پیشنهادات

۱- از آنجا که تحقیقات حاضر اولین گام در زمینه اندازه‌گیری نشست‌های ناشی از حفر تونل‌های دوقلو در کشور بوده است، تکرار اندازه‌گیری‌های مشابه در شرایط متفاوت از لحاظ اجرایی یا ژئوتکنیکی، انجام تحلیل‌های عددی براساس انتخاب مدل رفتاری مناسب برای خاک اصفهان و نیز انجام آزمایشات درجا و آزمایشگاهی بیشتری برای تعیین پارامترهای واقعی خاک اصفهان می‌تواند نقش به سزایی، در افزایش کارایی اجرای پروژه‌های مشابه گردد.

۲- انجام آنالیز برگشتی برای تعیین پارامترهای ورودی (ϕ, C, K, E) و به کار بردن پارامترهای جدید جهت استفاده در تحلیل عددی، برای تعیین میزان نشست در مرحله سوم و چهارم حفاری.

۳- برای به دست آوردن نتایج بهتر از روش‌های تجربی، باید پارامتر S_{max} بسیار دقیق محاسبه شود.

۴- انجام رفتارنگاری جدید، و به دست آوردن میزان نشست در چند ایستگاه نقشه‌برداری و استفاده از آنالیز برگشتی برای محاسبه پارامترهای ورودی، با نتایج رفتارنگاری جدید در مقاطع مختلف، انجام شود.

فهرست منابع

فهرست منابع انگلیسی

- 1- Atkinson, J.H and Potts, D.M., 1977,"*Subsidence above shallow circular tunnels in soft ground*," Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.103,G.T.4, pp.307-325
- 2- Attewell, P. B., Farmer, I. W., 1974. *Ground deformations resulting from shield tunneling in London clay*. Can. Geotech. J. 11,380—395.
- 3- Attewell, P. B., Yeastes J.,Selby A.R, 1986. *soil movment inused by tunneling and their effects on pipe line and structure* , Eng. Geology, Vol 8, pp 361-381
- 4- Barry N. Whittaker and David J.Reddish, (1989). *Subsidence Occurrence Prediction and Control* , Elsevier science Publisher.
- 5- Bardy B.h.g and Brown E.T, (1993). *Rock Mechanics for underground mining* Chapman and Hall Publisher.
- 6- Chapman, D.N., Rogers, C.D.F., and Hunt, D.V.L.,(2003). *Investigating the settlement above closely spaced multiple tunnel constructions in soft ground, Claiming the Underground space*, Saveur (ed.), pp 629-635

- 7- Chapman D.N , C.D.F. Rogers, D.V.L. Hunt, (2004). *Predicting the settlements above twin tunnels constructed in soft ground*, Tunnelling and Underground Space Technology vol 19 pp 378, science direct Publisher.
- 8- Chehade F Hage, Shahrour I, (2007). *Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure*, science direct Publisher.pp 1-5
- 9- Clough, G.W. and Schmidt, B. 1981,"*Excavation and tunneling*," *soft clay engineering*, Chapter8, edited by E.W.Brand and R.P. Brenner, Elsevier.
- 10- Franzius j.N, (2003). *Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence*, A thesis submitted to the University of London, Department of Civil and Environmental Engineering Imperial College of Science, Technology and Medicine London
- 11-Itasca Consulting Group. (1992). Flac version 3. 0 User's manual, Minneapolis
- 12- Itasca Consulting Group. (1999). Flac version 4.10 User's manual, Minneapolis
- 13- Itasca Consulting group. (2001). FLAC^{2D} version4 user manual Lined Tunnel Construction in Saturated Ground.
- 14- Karakus, M. (2000). *Numerical Modelling for NATM in Soft Ground*. PhD Thesis, The University of Leeds.

- 15- Karakus M and Fowell R.J, (2007). *FEM Analysis for the effects of the NATM Construction technique on settlement above shallow soft ground tunnels*, science direct Publisher.
- 16- Kim C.Y. , Bae G.J., Hong S.W., Park C.H., Moon H.K., Shin H.S. 2001, *Neural network based prediction of ground surface settlements due to tunneling*, Computers and Geotechnics, Vol 28 ,PP. 517-547.
- 17- Leach, G., 1985 "Pipeline response to tunneling," Unpublished paper.
- 18- Lee K.M, and. Tang D.K.W, (2004) *Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions*, Published on the NRC Research.
- 19- Maidl Bernhard, Herrenkmecht Martin, Lother Anheuser, (1995). *Mechanized Shield tunneling*, Ernest and Sohn Publisher.
- 20- Mail, R.J., Gunn, M.J. and O'Reilly, M.P., 1983," *Ground movement around shallow tunnels in soft clay*," 10th International Conference on soil mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, pp.323-328.
- 21- O'Reilly M.P and New, B.M, 1982," *Settlements above tunnels in UK- Their magnitude and prediction*," tunneling'82,pp.173-181

- 22- Nielen Van Der Merw J. ,(1999). *Subsurface erosion – A post subsidence phenomena*, International Congress in Rock Mechanics, A.A.South Africa, Balkeman and Rotterdam.
- 23- Oteo, C. S. & Sagaseta, C. (1996). *Some Spanish experiences of measurement and evaluation of ground displacements around urban tunnels*. Geotechnical aspects of undergoing construction in soft ground (ed. R. J. Mair and R. N. Taylor), London, pp. 731-736.
- 24- Peck RB, (1969). *Deep excavation and tunneling in soft ground*, state of the art report In: 7th Congress in Soil Mechanics UNAM, Mexico pp 225 – 290.
- 25- Schmidt B, (1969). *Settlement and ground movement associated with tunneling in soil*, PHD thesis, University of Illinois at Urbana Champaign.
- 26- Romo Miguel, (1997). *Soil movement induced by slurry shield tunneling*, International Congress in Soil Mechanics UNAM, Mexico pp 152-241
- 27- Sakurai, S.; Kawashima, I.; and Otani, T. (1994). *Environmental effects on critical strain of rocks*. Proc. Symp. Developments in Geotechnical Engineering, Bangkok, Thailand, 359-363. Rotterdam: A. A. Balkema.

- 28- Sakurai, S. (1997). *Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling*.
Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 453-460, 1997
- 29- Sagaseta, C. (1986). *Evaluation of surface movment above tunnels*, conference on
soil structure inter ation, paris
- 30- Whittaker B.N. & Reddish D.J, (1989). *Subsidence Occurrence Prediction
and Control*, Elsevier science Publisher.

فهرست منابع فارسی

- ۳۱- منصوری بروجنی. حشمت الله. (۱۳۸۱). بررسی نشست ایجاد شده در اثر استخراج منابع
زیرزمینی، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی معدن و نفت و
متالورژی

- ۳۲- بهنیا، ابولحسن و بهنیا، کامبیز (۱۳۷۳). بناهای زیرزمینی طراحی- اجرا- نگهداری، انتشارات
دانشگاه تهران

- ۳۳- سعیدی کاخکی. سید حسن (۱۳۷۸). بررسی نشست ناشی از حفر تونل‌های کم عمق، مطالعه
موردی متروی تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی
معدن و نفت و متالورژی

- ۳۴- شریعتمداری نادر، (۱۳۸۰). مطالعه نشست سطحی زمین بر اثر حفر تونل مترو، پایان نامه
کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی عمران

- ۳۵- شریعتمداری نادر و فرزانه اورنگ، (۱۳۸۰). مطالعه نشست سطحی زمین بر اثر حفر تونل مترو، پنجمین کنفرانس تونل ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران
- ۳۶- طاهریان عبدالرضا، (۱۳۸۱) مهندسی سنگ کاربردی، مولف پروفسور رابرت هوک، صفحه ۲۳۰ تا ۲۵۰.
- ۳۷- عطایی. محمد. (۱۳۸۴). معدنکاری زیرزمینی، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۳۸- مهندسین مشاور کاوشگران، (اردیبهشت ۱۳۸۵). گزارش مطالعات زمین شناسی، هیدروژئولوژی و آزمایشهای ژئوتکنیک تونل‌های دوقلوی مترو اصفهان، طرح خط یک قطار شهری اصفهان، حدفاصل ایستگاه شریعتی - آزادی
- ۳۹- میکائیل، رضا، (۱۳۸۶). تحلیل پایداری تونل راه‌آهن کوهین محور قزوین- رشت- بندرانزلی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک

Abstract

The study of lateral effects of shallow tunnels excavation has been considered by some of geotechnical researchers and tunneling engineers. One of these lateral effects is the subsidence phenomenon. Excavation will result in a certain degree of ground movement. The distribution of the ground surface settlement must be predicted prior to excavation to assess impacts to adjacent buildings or public facilities. The finite element method and the empirical method are two common methods of predicting ground surface settlement induced by excavation. The development of transportation in large cities requires the construction of twin-tunnels or the construction of new tunnels close to the existing ones. Since, both the relative position of tunnels and the construction procedure affect the soil movement and internal forces in the lining, it is of major interest to study the influence of these factors on the tunnel design.

In this research, the numerical finite difference method (FLAC^{2D} Software) has been used for prediction of subsidence at the ground resulted from the Isfahan subway's twin tunnels excavation. Finally, numerical modeling results have been comprised with measurements results. These comparisons show that numerical models in different sections have minimum error in calculation of subsidence resulted from Isfahan subway's twin tunnels excavation.