



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد

# تعیین فاصله بهینه جبهه کارها در تونل‌های دوقلوی موازی در زمین‌های نرم

مطالعه موردی: تونل‌های دوقلوی متروی شیراز

نگارش

محسن حاجی حسنی

اساتید راهنما

دکتر علی مرادزاده

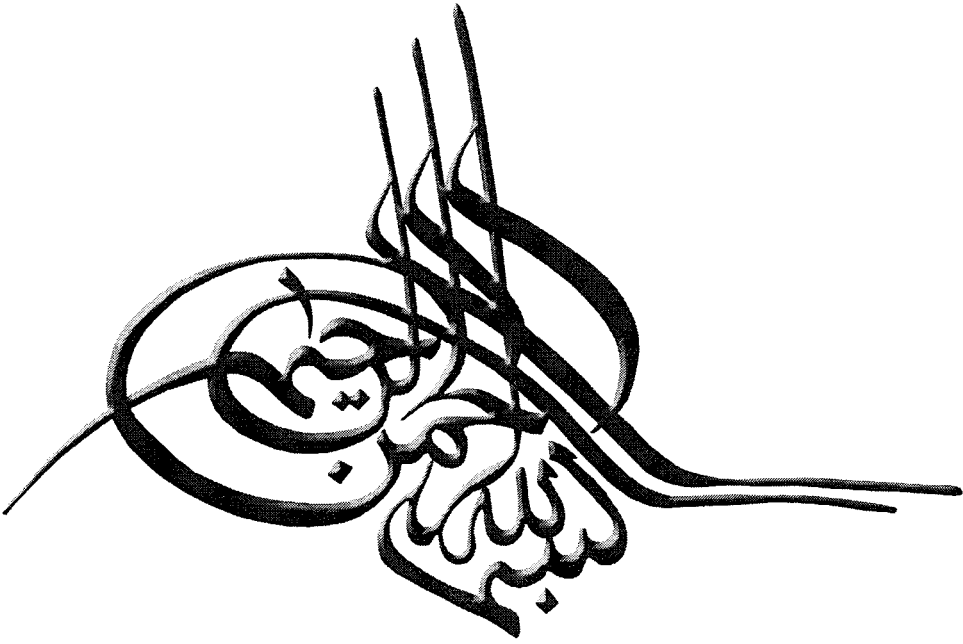
دکتر رضا نادری

اساتید مشاور

مهندس محمد خسرو تاش

مهندس حامد جمشیدی

تابستان ۱۳۸۶



## العلم يهدى الى الحق

علم انسان را به سوى حق هدايت مى كند.

امام على (ع)

با درود بى کران بر پیام آور رحمت و

خاندان مطهرش

این چشمه های ناب و پاک علم ، حکمت و ...

تقدیم به عزیزانم

به پدرم، به پاس محبت و تلاش بی وقفه اش

و

به مادرم، سرچشمه جوشان مهر و فداکاری، که زندگی ام برایش همه رنج

است و وجودش برایم همه مهر

و سه عزیز، منیر، محمد و مهدی، به پاس همه تلاش هایشان که مرا با مفهوم

زندگی و لذت شعور و معرفت آشنایی دادند.

## تشکر و قدردانی

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستیم بخشید و مرا به طریق علم و دانش رهنمون شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرم ساخت. اکنون که به یاری پروردگار مهربان مراحل انجام این تحقیق به پایان رسیده است، سپاسگزار همه اساتید و بزرگوارانی هستم که از راهنمایی‌هایشان بهره جستیم. مراتب سپاس صمیمانه خود را از استاتید گرانقدر جناب آقای دکتر علی مرادزاده و دکتر رضا نادری که با لطف و صبر فراوان در تمام مراحل انجام و تنظیم پایان نامه، اینجانب را ارشاد نموده و اندوخته علمی و تجربیات خود را در اختیار اینجانب قرار دادند، ابراز می‌نمایم و موفقیت روز افزون ایشان را از خداوند سبحان مسألت می‌نمایم. از اساتید بزرگوار آقایان مهندس محمد خسرو تاش و مهندس حامد جمشیدی به خاطر راهنمایی‌های ارزنده‌شان سپاسگزارم. همچنین از جناب آقای دکتر محمد اسماعیل جلالی که با دقت و حوصله فراوان نظرات ارزنده‌ای در تکمیل این مجموعه ارائه نموده‌اند، صمیمانه تشکر می‌نمایم. در پایان از تمامی عزیزانی که به نحوی مرا در انجام این تحقیق یاری رسانیده‌اند، قدردانی می‌نمایم.

۱	فصل اول : کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- تاریخچه مطالعات سیستم حمل و نقل درون شهری شیراز
۳	۳-۱- مسیرهای پروژه
۴	۱-۳-۱- مسیر خط اول
۴	۲-۳-۱- مسیر خط دوم
۵	۳-۳-۱- مسیر خط سوم
۷	۴-۱- بررسی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های مسیر قطار شهری شیراز
۷	۱-۴-۱- آزمایشات صحرایی
۷	۱-۱-۴-۱- حفاری گمانه‌ها
۸	۲-۱-۴-۱- آزمایش نفوذ استاندارد
۹	۳-۱-۴-۱- آزمایش برش پره
۱۰	۴-۱-۴-۱- آزمایش تعیین سطح ایستابی
۱۰	۵-۱-۴-۱- آزمایش لوفران
۱۱	۲-۴-۱- آزمایشات آزمایشگاهی
۱۱	۱-۲-۴-۱- آزمایش دانه‌بندی
۱۱	۲-۲-۴-۱- آزمایشات سه‌محوره و برش مستقیم
۱۲	۵-۱- حفاری تونل‌های متروی شیراز

۱۳	۶-۱- بررسی سوابق و ضرورت مطالعه
۱۴	۷-۱- هدف از مطالعه
۱۵	۸-۱- روش و مراحل انجام تحقیق
۱۵	۹-۱- ساختار پایان نامه
۱۶	<b>فصل دوم : حفاری مکانیزه تونل در زمین‌های نرم و ماشین حفار EPB</b>
۱۷	۱-۲- مقدمه
۱۷	۲-۲- روش‌های سنتی و مکانیزه حفر تونل در زمین‌های نرم
۱۸	۳-۲- تاریخچه تونلسازی سپری
۱۸	۴-۲- شرایط زمین‌های نرم در ارتباط با تونلسازی سپری
۱۹	۵-۲- انواع ماشین‌آلات حفاری تونل
۱۹	۱-۵-۲- تقسیم‌بندی بر اساس پوشش جبهه‌کار توسط دستگاه حفار
۱۹	۱-۱-۵-۲- دستگاه‌های حفاری تمام مقطع
۱۹	۲-۱-۵-۲- ماشین‌آلات حفاری جزء مقطع
۲۲	۲-۵-۲- تقسیم‌بندی بر مبنای وضعیت زمین
۲۲	۱-۲-۵-۲- دستگاه‌های حفاری مخصوص زمین‌های نرم
۲۲	۲-۲-۵-۲- دستگاه‌های حفاری مخصوص زمین‌های سخت
۲۲	۶-۲- اصول کار سپرها
۲۳	۱-۶-۲- قسمت‌های مختلف یک سپر
۲۳	۲-۶-۲- دوره متعارف کار سپر
۲۴	۷-۲- نشست سطح زمین و نگهداری فضای حفاری شده

۳۹	۲-۱۰-۱-۵- حفر هیدرولیکی
۴۰	۲-۱۰-۲- انتقال مواد حفاری شده
۴۰	۲-۱۰-۲-۱- آماده‌سازی مواد حفر شده برای انتقال
۴۱	۲-۱۰-۲-۲- انتقال مواد به بیرون محدوده جبهه‌کار تونل
۴۲	۲-۱۰-۳- ناتراواسازی و فرآیندهای تزریق در تونلسازی سپری
۴۲	۲-۱۰-۳-۱- آب‌بند نمودن پشت سپر
۴۳	۲-۱۰-۳-۲- روش‌های تزریق
۴۴	۲-۱۰-۴- قطعه‌گذاری
۴۴	۲-۱۱-۱۱- مزایا و معایب تونلسازی سپری
۴۵	۲-۱۱-۱- مزایای تونلسازی سپری
۴۵	۲-۱۱-۲- معایب تونلسازی سپری
۴۶	۲-۱۲- مسائل اصلی و مهم در سیستم EPBS متروی شیراز
۴۶	۲-۱۲-۱- قسمت‌های اصلی دستگاه
۴۶	۲-۱۲-۲- تنظیم فشار در اتاقک حفاری
۴۷	۲-۱۲-۳- آب‌بندی دستگاه
۴۹	۲-۱۲-۴- تخلیه مصالح حفاری شده
۴۹	۲-۱۲-۵- کاهش اصطکاک بین دستگاه و زمین
۵۰	۲-۱۲-۶- قسمت پشتیبانی
۵۱	۲-۱۳- مبانی انتخاب نوع دستگاه TBM متروی شیراز
۵۱	۲-۱۳-۱- نوع کله حفار و ابزار برنده
۵۲	۲-۱۳-۲- نوع دستگاه



۵۳	فصل سوم : مدل سازی عددی تونل های دوقلوی متروی شیراز جهت تعیین حداقل فشار جبهه کار
۵۴	۱-۳-۱- مقدمه
۵۴	۲-۳-۲- روش اجزاء محدود
۵۵	۳-۳-۳- نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL
۵۶	۱-۳-۳-۱- نکات کلی مدل سازی توسط نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL
۵۸	۲-۳-۳-۲- اطلاعات ورودی
۵۹	۳-۳-۳-۳- موضوعات هندسی
۶۰	۱-۳-۳-۳-۱- صفحات
۶۰	۲-۳-۳-۳-۲- ژئوگریدها
۶۰	۳-۳-۳-۳-۳- صفحات مشترک
۶۱	۴-۳-۳-۳-۲- تونل ها
۶۱	۴-۳-۴- مدل سازی عددی تونل های دوقلوی متروی شیراز
۶۱	۱-۴-۳-۱- هندسه تونل ها و خواص مواد و مصالح مسیر و موضوعات ساختمانی
۶۴	۲-۴-۳-۲- مدل سازی تونل ها
۶۷	۵-۳-۵- محاسبه فشار جبهه کار
۶۹	۱-۵-۳-۱- تحلیل پایداری جبهه کار تونل
۷۰	۲-۵-۳-۲- محاسبه فشار جبهه کار به روش تعادل حدی گوه
۷۱	۳-۵-۳-۳- آنالیز گوه
۷۳	۱-۳-۵-۳-۱- تنش های قائم در بالای گوه
۷۴	۴-۵-۳-۴- محاسبه حداقل فشار مورد نیاز برای نگهداری جبهه کارهای تونل های دوقلوی متروی شیراز

۸۰	فصل چهارم : تعیین فاصله بهینه جبهه کارها در تونل های دوقلوی موازی
۸۱	۱-۴- مقدمه
۸۱	۲-۴- مدل سازی عددی
۸۳	۱-۲-۴- مراحل ساختمانی
۸۵	۲-۲-۴- محاسبات
۸۷	۳-۴- بررسی نتایج حاصل از مدل سازی عددی
۹۸	۴-۴- نتایج
۹۹	فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۳	منابع و مراجع
۱۰۶	فصل ششم : پیوست - (روش اجزاء محدود)
۱۰۷	۱-۶- مقدمه
۱۰۸	۲-۶- روش اجزاء محدود دوبعدی
۱۰۹	۱-۲-۶- مش اجزاء محدود
۱۱۰	۲-۲-۶- توابع شکل
۱۱۱	۳-۲-۶- تبدیل مختصات
۱۱۵	۴-۲-۶- روابط جابجایی - کرنش
۱۱۷	۵-۲-۶- رابطه تنش - کرنش
۱۱۷	۶-۲-۶- معادلات سختی یک المان
۱۲۰	۷-۲-۶- سختی کلی

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- ایستگاه‌ها و مسیرهای مصوب مسیر خط اول ۶
- شکل ۱-۲- نمایش محل برداشت گمانه‌ها و آزمایشات CPT از میدان گل سرخ تا گمانه BHA8 ۸
- شکل ۱-۳- نمایش محل برداشت گمانه‌ها و آزمایشات CPT از محدوده گمانه BHA8 تا میدان ولیعصر ۹
- شکل ۱-۴- نتایج آزمایش دانه‌بندی در یکی از گمانه‌ها ۱۲
- شکل ۱-۲- قسمت‌های مختلف یک سپر ۲۴
- شکل ۲-۲- فشار وارد به جبهه کار از طرف زمین ۲۶
- شکل ۲-۳- تقسیم‌بندی سپرها بر اساس نوع حفاظت جبهه کار ۲۹
- شکل ۲-۴- انواع سپرهای خاص ۲۹
- شکل ۲-۵- نمایی شماتیک از یک سپر هوای فشرده ۳۰
- شکل ۲-۶- پایدارسازی جبهه کار توسط هوای فشرده ۳۱
- شکل ۲-۷- نمایی شماتیک از یک سپر دوغابی ۳۲
- شکل ۲-۸- نگهداری جبهه کار در سپر دوغابی ۳۳
- شکل ۲-۹- مشکلاتی که در پایدارسازی جبهه کار در سپرهای دوغابی ایجاد می‌گردد ۳۴
- شکل ۲-۱۰- نمایی شماتیک از یک سپر EPB ۳۵
- شکل ۲-۱۱- محدوده کاری سپر تعادلی با فشار زمین ۳۶
- شکل ۲-۱۲- قسمت‌های اصلی دستگاه EPB تونل‌های دوقلوی متروی شیراز ۴۷
- شکل ۲-۱۳- محلهایی که احتمال نفوذ آب به درون دستگاه EPB وجود دارد ۴۸
- شکل ۲-۱۴- آب‌بندی محل‌های نفوذ آب به درون دستگاه EPB ۴۸

- شکل ۲-۱۵- تفاوت قطر قسمت‌های مختلف سپر برای کم کردن اصطکاک بین زمین و دستگاه ۵۰
- شکل ۲-۱۶- قسمت‌های مختلف پشتیبانی دستگاه حفار EPB ۵۱
- شکل ۳-۱- گره‌ها و نقاط تنش در المان‌های گوه‌ای ۱۵ گره‌ای ۵۸
- شکل ۳-۲- ایجاد مدل سه‌بعدی و مش‌بندی اجزاء محدود ۵۹
- شکل ۳-۳- تعریف صفحات Z و Sliceها ۶۰
- شکل ۳-۴- موضوعات ژئوتکنیکی که در آنها صفحات، بولت‌ها و صفحات مشترک کاربرد دارند ۶۱
- شکل ۳-۵- هندسه مقطع عرضی تونل ۶۲
- شکل ۳-۶- قطر حفاری، ضخامت لاینینگ و دوغاب تزریقی پشت سگمنت‌های بتنی ۶۳
- شکل ۳-۷- مدل مقطع عرضی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز ۶۵
- شکل ۳-۸- مش‌بندی دوبعدی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز ۶۶
- شکل ۳-۹- مش‌بندی سه‌بعدی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز ۶۷
- شکل ۳-۱۰- محاسبه فشار منفذی در تونل‌های دوقلوی متروی شیراز ۶۸
- شکل ۳-۱۱- محاسبه تنش‌های اولیه در تونل‌های دوقلوی متروی شیراز ۶۸
- شکل ۳-۱۲- مقدار حدی ضریب اضافه بار ۷۰
- شکل ۳-۱۳- گوه بارگذاری شده بوسیله سیلوی خاک ۷۱
- شکل ۳-۱۴- مکانیسم شکست در آنالیز گوه ۷۱
- شکل ۳-۱۵- نیروهای عمل‌کننده بر روی گوه در جبهه‌کار ۷۳
- شکل ۳-۱۶- قوس خاکی در مدل ترزاقی ۷۴
- شکل ۳-۱۷- مدل‌سازی ریزش جبهه‌کار به درون تونل توسط فشار آب ۷۵
- شکل ۳-۱۸- مش‌های تغییر شکل یافته در اثر ریزش جبهه‌کار به درون تونل ۷۶

- شکل ۳-۱۹- جابجایی‌های کل در اثر ریزش جبهه‌کار به داخل تونل ۷۶
- شکل ۳-۲۰- جابجایی‌های افقی در جهت X در اثر ریزش جبهه‌کار به داخل تونل ۷۷
- شکل ۴-۱- نگهداری تونل‌های دوقلوی متروی شیراز توسط سگمنت‌های بتنی پیش‌ساخته ۸۲
- شکل ۴-۲- مقطع عرضی هندسه تونل‌های دوقلوی متروی شیراز ۸۲
- شکل ۴-۳- انتخاب چندین گره برای بررسی جابجایی‌های ناشی از حفر تونل B بر تونل A ۸۶
- شکل ۴-۴- انتخاب یک نقطه تنش برای بررسی تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از حفر تونل B بر تونل A ۸۶
- شکل ۴-۵- تغییرات جابجایی نقطه A در جهت X در اثر حفر تونل B ۸۷
- شکل ۴-۶- جابجایی‌های عمودی ایجاد شده ناشی از حفر تونل B ۸۸
- شکل ۴-۷- جابجایی‌های افقی ایجاد شده در جهت X ناشی از حفر تونل B ۸۸
- شکل ۴-۸- جابجایی‌های افقی ایجاد شده در جهت Z ناشی از حفر تونل B ۸۹
- شکل ۴-۹- جابجایی‌های کل ناشی از حفر تونل B ۸۹
- شکل ۴-۱۰- تغییرات جابجایی نقطه A در جهت Y در اثر حفر تونل B ۹۰
- شکل ۴-۱۱- تغییرات جابجایی نقطه B در جهت‌های X و Y در اثر حفر تونل B ۹۱
- شکل ۴-۱۲- تغییرات جابجایی نقطه C در جهت‌های X و Y در اثر حفر تونل B ۹۲
- شکل ۴-۱۳- تغییرات جابجایی نقطه D در جهت‌های X و Y در اثر حفر تونل B ۹۲
- شکل ۴-۱۴- تغییرات جابجایی نقطه E در جهت‌های X و Y در اثر حفر تونل B ۹۳
- شکل ۴-۱۵- تغییرات جابجایی نقطه F در جهت‌های X و Y در اثر حفر تونل B ۹۳
- شکل ۴-۱۶- تغییرات جابجایی نقطه G در جهت‌های X و Y در اثر حفر تونل B ۹۴
- شکل ۴-۱۷- مقایسه تغییرات جابجایی نقاط A ، B ، C ، D ، E ، F و G در جهت X در اثر حفر تونل B ۹۵

- شکل ۴-۱۸- مقایسه تغییرات جابجایی نقاط A ، B ، C ، D ، E ، F و G در جهت Y در  
اثر حفر تونل B ۹۵
- شکل ۴-۱۹- تغییرات تنش در نقطه H در جهت X در اثر حفر تونل B ۹۶
- شکل ۴-۲۰- تغییرات تنش در نقطه H در جهت Y در اثر حفر تونل B ۹۷
- شکل ۴-۲۱- تغییرات تنش در نقطه H در جهت Z در اثر حفر تونل B ۹۷
- شکل ۴-۲۲- مقایسه تغییرات تنش در نقطه H در جهت‌های X ، Y و Z در اثر حفر تونل  
B ۹۸
- شکل ۶-۱- انواع اصلی المان‌های محدود ۱۰۸
- شکل ۶-۲ المان مربعی شکل با چهار گره ۱۱۰
- شکل ۶-۳- المان‌های متداول سه‌بعدی و تبدیل آنها در سیستم مختصات محلی ۱۲۴

## فهرست جداول

۹	جدول ۱-۱- ارتباط زاویه اصطکاک داخلی و عدد نفوذ استاندارد
۱۰	جدول ۲-۱- سطح ایستابی در گمانه‌ها
۲۰	جدول ۱-۲- انواع آزمون‌های مؤثر در انتخاب سپر و کاربرد نتایج آنها
۲۱	جدول ۲-۲- شرایط زمین‌های نرم در ارتباط با تونلسازی سپری
۶۳	جدول ۱-۳- خواص مواد و مصالح خاک‌های مسیر منطقه مورد مطالعه
۶۴	جدول ۲-۳- خواص مواد و مصالح دستگاه‌های PBE
۶۴	جدول ۳-۳- خواص مواد و مصالح سگمنت‌های بتنی
۷۷	جدول ۴-۳- فشار استفاده شده برای نگهداری جبهه‌کارها در منطقه مورد مطالعه
۷۸	جدول ۵-۳- نتایج بدست آمده در محاسبه حداقل فشار جبهه‌کارهای تونل‌های دوقلوی متروی شیراز
۷۹	جدول ۶-۳- فشار استفاده شده برای نگهداری جبهه‌کارها حداقل ایستگاه دوم تا چهارم
۸۳	جدول ۱-۴- مراحل ساختمانی مدل‌سازی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز
۸۴	جدول ۲-۴- ادامه مراحل ساختمانی مدل‌سازی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز
۸۴	جدول ۳-۴- ادامه مراحل ساختمانی مدل‌سازی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز
۸۵	جدول ۴-۴- ادامه مراحل ساختمانی مدل‌سازی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز
۸۵	جدول ۵-۴- ادامه مراحل ساختمانی مدل‌سازی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز
۱۱۳	جدول ۱-۶- توابع شکل‌المان‌های مختلف یک و دوبعدی

فصل اول

# کلیات



## ۱-۱- مقدمه

همگام با رشد و گسترش شهرها و توسعه ارتباطات، افزایش روزافزون جمعیت و تعداد وسایل نقلیه، روزبه‌روز بر پیچیدگی سیستم‌های حمل و نقل درون شهری و مشکلات ناشی از آنها افزوده می‌شود. مشکلاتی که هزینه‌های سنگین آن بر این سیستم‌ها تحمیل می‌شود و در صورت عدم مقابله با آن بر سایر ابعاد جامعه نیز تأثیر منفی خواهد داشت.

چندی است که مشکلات ساختاری و عملکردی سیستم‌های حمل و نقل درون شهری کلان شهرهای ایران بروز کرده و هر روز نمود بیشتری می‌یابد. برای رفع این مشکلات راهکارها و طرح‌هایی شامل ساخت و توسعه شبکه‌های بزرگراهی، توسعه و تقویت سیستم‌های حمل و نقل همگانی و بکارگیری روش‌های مدیریتی در کنترل و هدایت ترافیک به اجرا درآمده‌اند که هر یک به فراخور ماهیت آن سهمی در بهبود عملکرد سیستم‌های حمل و نقل داشته است. ولی با وجود همه این اقدامات هنوز کلان شهرها با مشکلات ترافیکی بسیاری روبرو هستند. به همین جهت نگاه ویژه‌ای به سیستم‌های حمل و نقل عمومی زیرزمینی که قادر به جابجایی تعداد قابل ملاحظه‌ای مسافر در زمان کم و با حداقل آلودگی زیست محیطی می‌باشند، شکل گرفته است. در همین راستا در کشور ما اقدامات وسیعی برای ایجاد اینگونه سیستم‌های حمل و نقل صورت گرفته است که از جمله این اقدامات احداث متروی شهرهای شیراز، اصفهان، تبریز، اهواز و مشهد می‌باشد.

با توجه به اینکه در شهر شیراز در سال ۱۴۰۰ کریدور ترافیکی با پتانسیل بیش از ۱۰ هزار مسافر در ساعت در هر جهت وجود خواهد داشت، امکان استفاده از سیستم قطار سبک شهری مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت استفاده از این سیستم به تصویب نهایی رسید [۱].

## ۲-۱- تاریخچه مطالعات سیستم حمل و نقل درون شهری شیراز

مطالعات اولیه سیستم حمل و نقل همگانی شهر شیراز در سال ۱۳۵۵ توسط شرکت ولوو انجام شد و مشاور طرح به منظور بهبود سیستم حمل و نقل، استفاده از شبکه ریلی را در کنار خطوط اتوبوسرانی توصیه نمود. در سال ۱۳۶۹ جمعی از اعضای هیئت علمی دانشگاه مطالعات جدیدی را آغاز نمودند. در این مطالعات که دو سال بطول انجامید، ضرورت استفاده از شبکه ریلی بعنوان توسعه سیستم حمل و نقل همگانی مورد تأیید مجدد قرار گرفت. در سال ۱۳۷۸ بازبینی مطالعات قبلی برای تکمیل و تدوین مطالعات جامع حمل و نقل همگانی شهر شیراز توسط پژوهشکده حمل و نقل شریف - ممتحن (دانشگاه صنعتی شریف) آغاز شد. نتایج این مطالعات دوساله به صورت ۲۰ مجلد شامل گزارش‌ها و نقشه‌ها منتشر شد و در اختیار شهرداری شیراز و شورای عالی ترافیک کشور قرار گرفت. با توجه به ویژگی‌های کارکردی، شرایط اجرایی و ملاحظات اقتصادی گزینه‌های پیشنهادی، قطار سبک شهری به عنوان گزینه برتر معرفی گردید. همزمان با پیشنهاد مسیرهای مناسب جهت راه‌اندازی قطارهای سبک شهری در شهر شیراز، ویژگی‌های مناسب این سیستم نیز بررسی شد و مشخصات سیستم بدین شرح پیشنهاد گردید [۱]:

♦ حداکثر سرعت ۷۰ کیلومتر در ساعت برای قطار

♦ شتاب مثبت برابر  $1/2$  و شتاب منفی برابر  $1/2$  متر بر مجذور ثانیه

♦ سه واگن در هر قطار با ظرفیت (نشسته و ایستاده) ۶۰۰ نفر

♦ تعداد واگن‌های فعال مورد نیاز ۱۴۰ دستگاه

♦ زمان توقف برابر ۳۰ ثانیه در هر ایستگاه

♦ سر فاصله زمانی بین ۳ تا ۵ دقیقه برای هر خط

## ۳-۱- مسیرهای پروژه

توقفگاه و تعمیرگاه اصلی جهت توقف یکصد و بیست واگن و نیز انجام عملیات شستشو و نظافت این واگن‌ها و انجام کامل تعمیرات سبک و سنگین به وسعت حدود ۲۷ هکتار بصورت ادواری در سطح زمین ساخته خواهد شد. توقفگاه شماره دو که صرفاً به منظور توقف حدود ۱۸ واگن در نظر

گرفته شده، در عمق ۱۵ متری زمین و در سطحی به وسعت ۲۰ هزار متر مربع ساخته خواهد شد. مسیرهای مصوب مترو به شرح ذیل است [۲]:

### ۱-۳-۱- مسیر خط اول

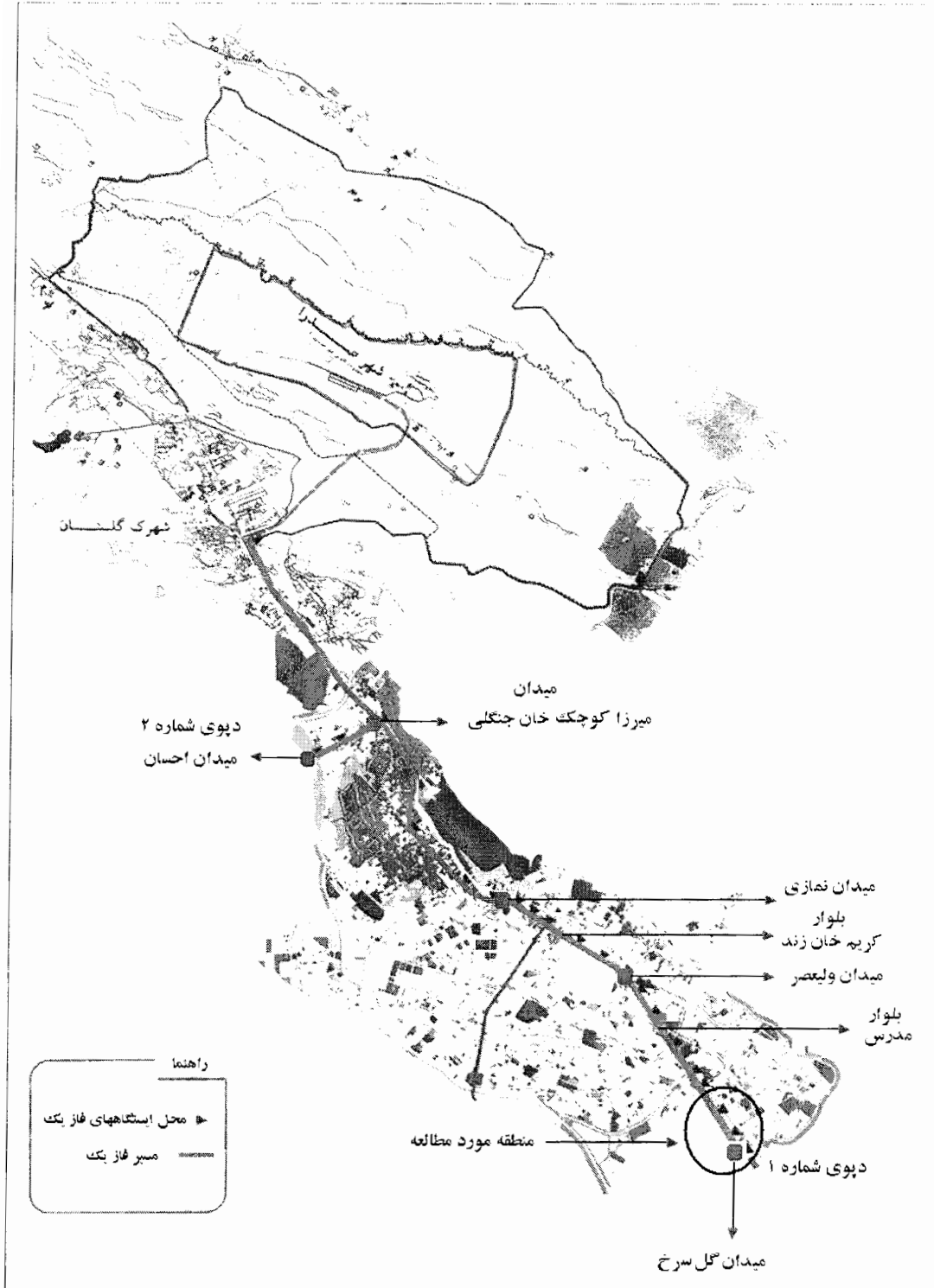
این خط که مطابق شکل ۱-۱ از میدان گل سرخ شروع شده و از طریق میدان ولیعصر، میدان نمازی، میدان قصردشت، خیابان گلخون و میدان میرزا کوچک خان به میدان احسان متصل می‌شود، طولی معادل ۲۲/۴ کیلومتر خواهد داشت. این خط به ۲۰ ایستگاه زیرزمینی و یک ایستگاه همسطح مجهز خواهد شد. پلان خط اول در تمامی طول مسیر از اراضی متعلق به شهرداری (معا، پیاده‌روها و سطوح در اختیار شهرداری) عبور خواهد نمود. در ۱۵ کیلومتر اول (میدان گل سرخ تا زیرگذر زرگری) مسیر به صورت دو تونل مجزا با قطر حدود ۷ متر در زیر زمین احداث خواهد شد و از زیرگذر زرگری و از طریق خیابان قصردشت، میدان قصردشت، خیابان گلخون تا پل چمران مسیر به شکل یک تونل کم عمق (با روش کند و پوش<sup>۱</sup>)، از پل چمران تا میدان میرزا کوچک خان به صورت همسطح زمین در همجواری رودخانه خشک و از میدان میرزا کوچک خان تا میدان احسان مجدداً به صورت یک تونل کم عمق به عرض حدود ۱۰ متر اجرا خواهد شد.

حدود ۱۴ کیلومتر از طول مسیر از میدان گل سرخ تا میدان نمازی، مسیر به صورت دو تونل مجزا رفت و برگشت و در عمق تقریبی ۱۸ متر از سطح زمین اجرا خواهد شد. در این مسیر بدلیل بالا بودن سطح ایستابی، عملیات حفاری با تجهیزات ویژه قابل انجام خواهد بود. در شکل ۱-۱ ایستگاه‌ها و مسیرهای مصوب مسیر خط اول نشان داده شده است.

### ۱-۳-۲- مسیر خط دوم

طول این مسیر حدود ۸/۵ کیلومتر خواهد بود که میدان امام حسین را از طریق خیابان انقلاب و میدان بسیج به عادل آباد و میانرود متصل خواهد نمود. مشخصات سازه‌ای این خط جز در انتهای مسیر تماماً در عمق حداقل ۱۵ متری زمین و بصورت دو تونل مجزا با قطر حدود ۷ متر و فاصله مرکز به مرکز ۱۵ متر خواهد بود. در این مسیر تعداد ۸ ایستگاه زیرزمینی و ۲ ایستگاه همسطح پیش‌بینی شده است.

<sup>۱</sup> - Cut and Cover



شکل ۱-۱- ایستگاه‌ها و مسیرهای مصوب مسیر خط اول [۲]

## ۴-۱- بررسی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های مسیر قطار شهری شیراز

پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های مسیر از تلفیق نتایج آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی بدست آمده است که در ذیل به برخی از آزمایشات انجام شده و نحوه انجام آنها پرداخته می‌شود.

### ۴-۱-۱- آزمایشات صحرایی

آزمایشات صحرایی شامل فعالیت‌های ذیل است که مختصراً به شرح آنها پرداخته شده است:

#### ۴-۱-۱-۱- حفاری گمانه‌ها

گمانه‌ها به روش مغزه‌گیری ممتد<sup>۱</sup> و بدون استفاده از گل حفاری حفر شده‌اند. بخش عمده گمانه‌ها در فضای سبز وسط بلوار حفاری شده‌اند. اشکال شماره ۲-۱ و ۳-۱ موقعیت گمانه‌ها و محل انجام آزمایشات نفوذ استاندارد (آزمایش نفوذ مخروط)<sup>۲</sup> را نشان می‌دهند. گمانه‌های دستی نیز به منظور شناسایی عوارض زیرسطحی (لوله، کابل و غیره) در اعماق بین ۱/۵ تا ۳ متری حفر شده‌اند. با بررسی نتایج حاصل از اطلاعات نمودارنگاری گمانه‌ها، خاک محل مورد مطالعه عمدتاً از نوع خاک‌های ریزدانه از جنس رس با خاصیت خمیری پایین می‌باشد و در مواردی که همراه با ماسه بوده، با توصیف رس با خاصیت خمیری پایین همراه با ماسه نامیده شده است. در موارد معدودی نیز خاک مورد نظر با توصیف‌های رس سیلت‌دار همراه با درصد کمی ماسه نامگذاری شده است. بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید، عمده خاک‌های مسیر به ترتیب فراوانی شامل رس با خاصیت خمیری پایین و رس سیلت‌دار می‌باشند [۳].

در گمانه‌های BHA2، BHA14 و BHA15 به لایه‌های خاک درشت‌دانه از جنس ماسه لای‌دار همراه با شن برخورد شده است. در گمانه‌های BHA3، BHA5، BHA6، BHA9، BHA10 و BHA15 نیز میان لایه‌های خاک درشت‌دانه عمدتاً از جنس ماسه لای‌دار به ضخامت حداکثر ۱/۵ متر مشاهده شده است. این خاک‌ها در رده‌بندی یونیفاید با نام‌های ماسه خوب دانه‌بندی شده، ماسه سیلت‌دار، ماسه رس‌دار، شن خوب دانه‌بندی شده و شن سیلت‌دار نامگذاری می‌شوند. به هر حال به نظر می‌رسد که بخش اعظم لایه‌های زیر سطحی در محل گمانه‌های BHA2 و BHA15 از نوع

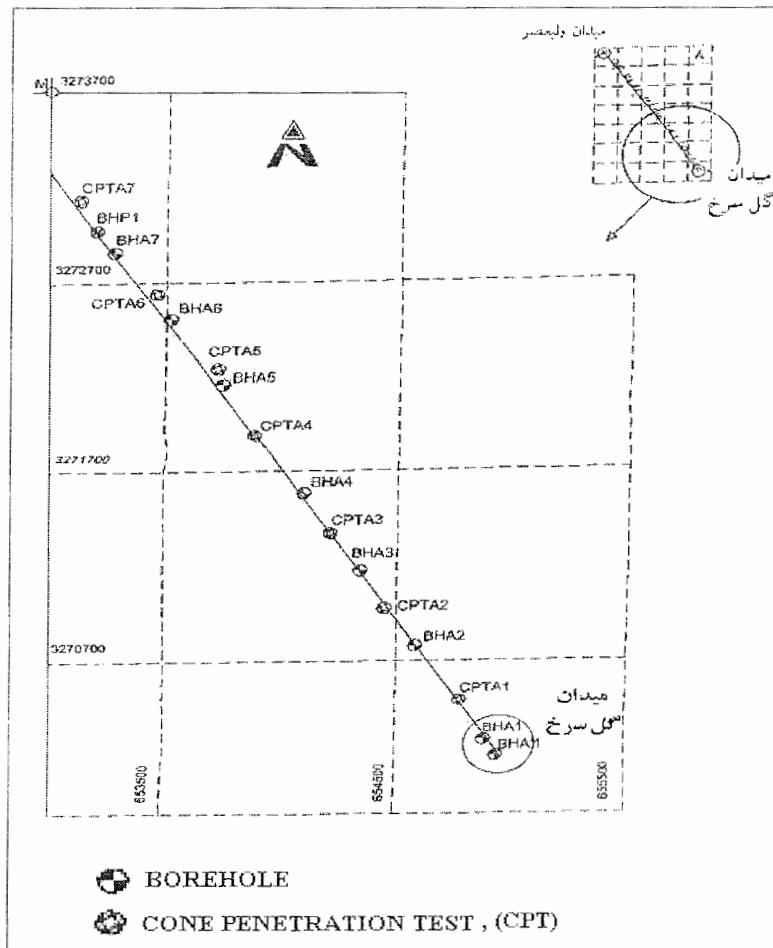
1- Continuous Coring

2-Standard Penetration Test (SPT) or Cone Penetration Test (CPT)

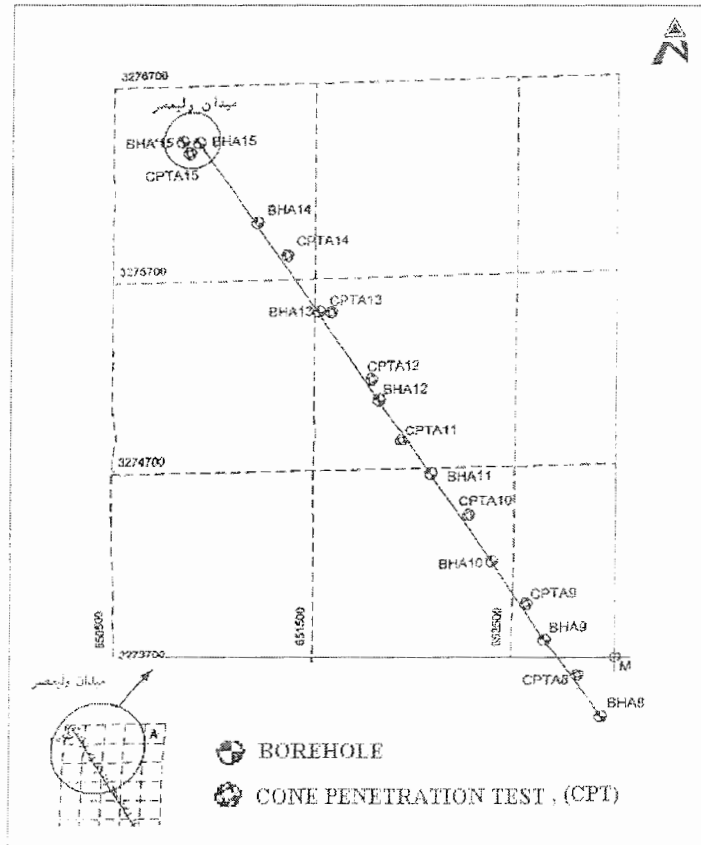
خاک‌های درشت‌دانه از جنس ماسه سیلت‌دار می‌باشد. در کل می‌توان اینگونه اظهار نظر نمود که از سمت میدان گل سرخ به سمت میدان امام حسین و نمازی و از آنجا به موازات رودخانه خشک ضخامت لایه‌های درشت‌دانه افزایش می‌یابد [۳].

#### ۱-۴-۲- آزمایش نفوذ استاندارد

آزمایش نفوذ استاندارد در داخل گمانه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D1586 با شمارش تعداد ضربات لازم برای نفوذ نمونه‌گیر استاندارد به طول ۴۵ سانتیمتر به وسیله چکشی به وزن ۶۳/۵ کیلوگرم و ارتفاع سقوط ۷۶ سانتیمتر جهت ۳۰ سانتیمتر نفوذ در خاک انجام شده است. این آزمایش تا عمق ۱۵ متری در فواصل ۱/۵ متری و پس از آن در فواصل ۲ متری انجام شده است [۳].



شکل ۱-۲- نمایش محل برداشت گمانه‌ها و آزمایش‌های CPT از میدان گل سرخ تا گمانه BHA8 [۳]



شکل ۳-۱-۳- نمایش محل برداشت گمانه‌ها و آزمایش‌های CPT از محدوده گمانه BHA8 تا میدان ولیعصر [۳]

بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات نفوذ استاندارد، عمده خاک مسیر از نظر استحکام تا عمق حدود ۱۵ متری در رده خیلی سخت و پس از آن در رده سخت قرار می‌گیرد. جهت برآورد مقدار تقریبی زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از عدد  $N$  تعداد ضربات لازم برای ۳۰ سانتیمتر نفوذ در خاک) از جدول ۱-۱ استفاده می‌شود.

جدول ۱-۱- ارتباط زاویه اصطکاک داخلی و عدد نفوذ استاندارد [۴]

N	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
$\phi$ (درجه)	۳۰	۳۳	۳۶	۳۹	۴۱

#### ۳-۱-۴-۱- آزمایش برش پره

در مواردی که عدد نفوذ استاندارد خاک مورد آزمایش کمتر از ۱۰ باشد و خاک نیز از استحکام چندانی برخوردار نباشد و همچنین در مواردی که به رس‌های نرم و بسیار نرم با عدد نفوذ استاندارد کمتر از ۱۰ برخورد شود، این آزمایش انجام می‌گیرد [۵]. به عنوان مثال این آزمایش در گمانه BHA1

جهت طراحی ایستگاه شماره ۱ انجام شده است. این آزمایش بصورت دست‌خورده و دست‌نخورده بر اساس استاندارد ASTM 2573 انجام گرفته است. پره مورد استفاده از نوع مستطیل شکل به ابعاد  $10 \times 5$  سانتیمتر و گشتاورسنج دستی می‌باشد. بر اساس نتایج این آزمون که در گمانه BHÁ1 انجام شده است، میزان مقاومت خاک دست‌نخورده  $2/31 \text{ kg/cm}^2$  و خاک دست‌خورده  $84 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمده است [۶].

#### ۱-۴-۱-۴- آزمایش تعیین سطح ایستابی

جهت تعیین سطح ایستابی، در پایان حفاری هر گمانه سطح آب قرائت شده است. جهت ثبت و مطالعه نوسانات سطح ایستابی، تعدادی از گمانه‌ها جهت قراردادن پیزومتر انتخاب گردیدند. متوسط سطح آب در پیزومترهای مسیر در جدول ۱-۲ نشان داده شده است.

جدول ۱-۲- سطح ایستابی در گمانه‌ها [۱]

BHÁ15	BHA4	BHA3	BHA2	BHA1	BHÁ1	گمانه
۸/۳	۴/۶	۴/۲	۴/۱	۴	۴	سطح آب (متر)
BHZ'6	BHZ6	BHZ4	BHZ3	BHZ2	BHA15	گمانه
>۲۰	۷	۱۰/۷	۹/۳	۹	۸/۸	سطح آب (متر)

#### ۱-۴-۱-۵- آزمایش لوفران

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش لوفران، از محدوده میدان گل سرخ به سمت بلوار کریم خان زند میزان نفوذپذیری بین  $10^{-3}$  تا  $10^{-6}$  سانتیمتر بر ثانیه و مقدار متوسط آن  $10^{-4}$  سانتیمتر بر ثانیه بدست آمده است که نشان‌دهنده خاک‌های رسی و سیلتی و در اعماق خاک‌های ماسه‌ای دانه‌ریز و سیلت‌دار می‌باشد. ولی از محدوده بلوار کریم خان یعنی از گمانه BHZ6 به بعد، میزان نفوذپذیری افقی بیش از  $10^{-3}$  سانتیمتر بر ثانیه بدست آمده که نشان‌دهنده درشت‌دانه بودن خاک‌ها در محدوده مذکور می‌باشد [۳].



### ۱-۴-۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی

جهت طبقه‌بندی خاک‌های زیرسطحی و تعیین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آنها، بر روی نمونه‌های معرف بدست آمده از حفاری‌ها، آزمایش‌های آزمایشگاهی متعددی صورت گرفته است که در ذیل به شرح برخی از آنها پرداخته می‌شود.

#### ۱-۴-۲-۱- آزمایش دانه‌بندی

بر اساس آزمایشات دانه‌بندی، بخش عمده خاک‌های مسیر رسی و سیلتی می‌باشند. همچنین در برخی از قسمت‌ها میان‌لایه‌هایی از جنس ماسه ریزدانه وجود دارد. بخش رویی خاک در تمامی مسیر از نوع خاک دستی می‌باشد که اندازه دانه‌های آن از حد گراول تا سیلت و رس در تغییر می‌باشد. در شکل ۱-۴-۱ منحنی دانه‌بندی بدست آمده از یکی از گمانه‌ها نشان داده شده است [۳].

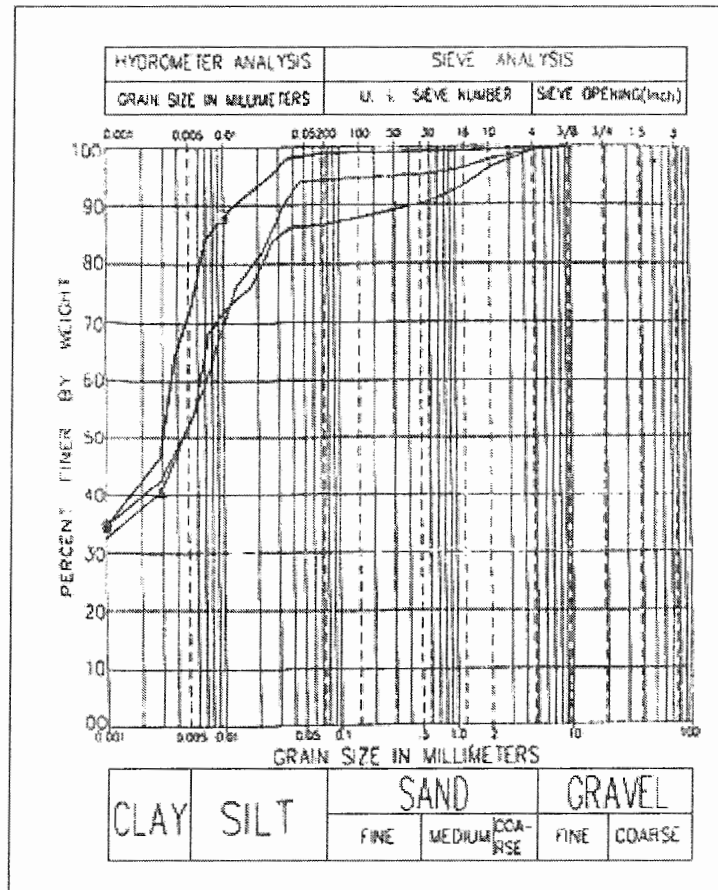
#### ۱-۴-۲-۲- آزمایش‌های سه‌محوره و برش مستقیم

برای تعیین مشخصات مقاومت برشی خاک در دوره کوتاه مدت، بر روی تعدادی از نمونه‌ها آزمایش‌های سه‌محوره و برش مستقیم<sup>۱</sup> انجام شده است. همچنین برای برآورد مشخصات مقاومت برشی خاک مسیر مورد مطالعه در بلند مدت، آزمایش برش مستقیم کند<sup>۲</sup> صورت گرفته است. بر اساس نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی، در مورد خاک‌های مسیر تونل‌های قطار شهری شیراز موارد ذیل قابل ذکر هستند:

- ♦ عمده خاک مسیر از جنس رس با خاصیت خمیری پایین و در برخی موارد همراه با میان‌لایه‌های ماسه‌ای و سیلتی می‌باشد که جهت حفر تونل خاک‌های خوبی تلقی نمی‌شوند.
- ♦ بر اساس نتایج حاصل از گمانه‌ها، عمق سطح ایستابی از سمت شمال به جنوب افزایش می‌یابد؛ بطوریکه در محدوده گمانه BHÁ1 در میدان گل سرخ، فاصله تراز آب تا تاج تونل ۵/۸ متر و میزان آب ورودی به تونل در واحد متر مربع  $26/9 \text{ L/m}^2$  بر دقیقه می‌باشد [۳]. لذا جهت آب‌بند نمودن و جلوگیری از هجوم آب به داخل تونل و اختلال در حفاری، طراحی پوشش مطمئن و با ضریب اطمینان بالا ضروری است.

<sup>۱</sup> - Direct Shear Test

<sup>۲</sup> - Slow Direct Shear Test



شکل ۱-۴- نتایج آزمایش دانه‌بندی در یکی از گمانه‌ها [۳]

## ۱-۵- حفاری تونل‌های متروی شیراز

به دلایل تاریخی شناخته شده، اکثر شهرهای بزرگ در زمین‌های نرم با سطح ایستایی بالا بنا شده‌اند. با توجه به نیاز شهرهای بزرگ به استفاده از فضاهای زیرزمینی، استفاده از روش‌های حفاری پیشرفته تونل جهت مقابله با مشکلات ناشی از نشست و خطر ریزش این نوع زمین‌ها ضروری به نظر می‌رسد. فعالیت‌های اصلی تونل‌سازی در زمین‌های نرم حفر زمین همراه با کنترل فوری جبهه‌کار و محیط تونل توسط وسایل نگهداری موقت، انتقال مصالح حاصل از حفاری و نصب نگهداری دائم را شامل می‌شود. در این خصوص با استفاده از تجارب کشورهای پیشرفته، دستگاه حفار مناسب جهت حفر تونل‌های متروی شهر شیراز، ماشین حفار TBM از نوع EPB<sup>۱</sup> (تعادل فشار زمین) معرفی و دو دستگاه از این ماشین توسط شرکت NFM-WIRTH جهت حفر ساخته شد. هر یک از این دستگاه‌ها حدود یکصد متر طول و ۱۶۰۰ تن وزن دارد که نصب، مونتاژ و راه‌اندازی هر یک از آنها طی یک

<sup>۱</sup> - Earth Pressure Balance

پروژه دو ماهه زیر نظر گروه مهندسين سازنده دستگاه صورت گرفته است. اين دستگاهها مجهز به امکاناتی هستند که پس از حفر ۱/۴ متر، قطعات پیش‌ساخته بتنی موسوم به سگمنت‌های بتنی را بصورت یک حلقه کامل نصب کرده و ضمن پیشگیری از ریزش خاک بالای آن، مانع از نفوذ آب به داخل تونل می‌شوند. این دو دستگاه با چند صد متر فاصله یکدیگر را تعقیب می‌کنند [۱].

### ۱-۶- بررسی سوابق و ضرورت مطالعه

در دهه‌های بعد از ۱۹۵۰ میلادی به علت رشد سریع جوامع و بهبود وضع اقتصادی کشورهای پیشرفته و در حال توسعه، استفاده از ماشین‌های مدرن جهت حفر تونل‌های بلند و قطور برای موارد مختلف بسیار متداول گردید و به همین مناسبت نیز صنعت تونل‌سازی تا به امروز دچار تحولات تکنیکی چشمگیری گردیده است. در زمینه حفر تونل در زمین‌های نرم، روش‌های حفر تونل به دو گروه بزرگ روش‌های سنتی و روش‌های مکانیزه تقسیم‌بندی می‌شوند [۷].

مهمترین و پرکاربردترین روش حفر سنتی تونل در زمین‌های نرم روش جدید اتریشی یا NATM<sup>۱</sup> می‌باشد که هم‌اکنون نیز در برخی از پروژه‌ها در حال استفاده است [۸].

اساس روش‌های مکانیزه حفر تونل بر استفاده از سپر استوار است. تونل‌سازی سپری عبارت از بکارگیری دستگاهی است که حفاظت کارگاه را در برابر ریزش‌های مختلف تأمین کند و سرعت بیشتری در پیشروی حاصل نماید. از مزایای تونل‌سازی سپری نسبت به سایر روش‌های حفر تونل در زمین‌های نرم به موارد مکانیزه بودن و نرخ پیشروی بالا، حفر تمام مقطع در یک مرحله و ایجاد مقطع دقیق برای تونل، حداقل تأثیر بر سازه‌های سطحی و نشست کم سطح زمین، حذف نگهداری موقت و آستربندی اقتصادی می‌توان اشاره کرد [۹].

تقسیم‌بندی رایج سپرها بر اساس نوع نگهداری جبهه کار می‌باشد که از مهمترین سپرهای مورد استفاده می‌توان سپرهای هوای فشرده، سپرهای دوغابی و سپرهای تعادل فشار زمین یا EPB را نام برد. توسعه سپرهای EPB اوایل دهه هفتاد در ژاپن صورت گرفت. اولین سپر از این نوع در سال ۱۹۷۴ در ژاپن بکار گرفته شد. سپر EPB جدیدترین و پیشرفته‌ترین نوع سپر می‌باشد که با توجه به مزایای سپر EPB نسبت به سایر سپرها همانند مشکلات کمتر زیست محیطی، ایمنی بیشتر پرسنل و

<sup>۱</sup> - New Austrian Tunnelling Method

نشست کمتر سطح زمین، استفاده از این سپر نسبت به سایر سپرها افزایش چشمگیری یافته است [۱۰]. در کشور ما اولین تجربه استفاده از این دستگاهها در حفر تونل‌های دوقلوی متروی شیراز حاصل شده است. همچنین تونل‌های متروی تبریز نیز توسط این دستگاهها در حال حفر می‌باشند. با توجه به اینکه در طراحی متروی شیراز استفاده از دو تونل موازی لحاظ شده است، تعیین فاصله بهینه بین جبهه‌کارها ضرورت پیدا می‌کند؛ بدین معنی که حداقل فاصله بین جبهه‌کار تونل‌ها چقدر باشد تا کمترین تأثیر بر تونل‌ها حادث شود. یک مطالعه جامع توسط آقایان Karakus و Fowell در زمینه چگونگی پیشروی تونلی که با روش NATM حفر می‌شوند و تأثیر آن بر نشست سطح زمین انجام گرفته است [۱۱]؛ اما با توجه به اینکه متروی شیراز شامل دو تونل موازی می‌باشد که با سپر حفر می‌شوند، نتایج آن تحقیق قابل تعمیم به تونل‌های دوقلو نمی‌باشد. با توجه به مطالعات نگارنده تحقیقی جامع در زمینه فاصله بهینه جبهه‌کارها در تونل‌هایی که در زمین‌های نرم حفر می‌شوند، صورت نگرفته است و عمده تحقیقات در زمینه فاصله عرضی تونل‌ها و نشست سطح زمین می‌باشد. همانطور که در بالا ذکر گردید دو دستگاه EPB با چند صد متر فاصله از یکدیگر حرکت می‌کنند.

## ۱-۷- هدف از مطالعه

با توجه به پیشروی نسبتاً سریع حفاری روزانه ۱۴ متر برای هر تونل و اینکه تونل‌ها در زمینی از جنس رس اشباع حفر می‌شوند، به منظور کاهش تنش‌ها و به تعادل رساندن محیط اطراف فضای حفاری، برآورد بهترین فاصله برای جبهه‌کارها که همان فاصله طولی حفر تونل‌ها یا فاصله کله حفار<sup>۱</sup> دستگاهها از یکدیگر می‌باشد، ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس فاصله بهینه جبهه‌کارها بر اساس جابجایی‌ها و تنش‌هایی که در اثر حفر یک تونل در جوار تونل مجاور بوجود می‌آیند، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این تحقیق سؤالات اساسی ذیل مطرح می‌باشد:

- ♦ فاصله جبهه‌کارها از یکدیگر چه تأثیری بر میزان جابجایی نقاط مجاور تونل‌ها و سطح زمین و همچنین تنش‌های القاء شده به محیط اطراف فضاهای حفاری خواهد داشت؟
- ♦ با چه فاصله‌ای بین جبهه‌کارها حداقل جابجایی در نقاط مجاور فضای حفاری شده و سطح زمین رخ خواهد داد؟

<sup>۱</sup> - Cutter Head

### ۸-۱- روش و مراحل انجام تحقیق

منطقه مورد مطالعه بخشی از مسیر فاز یک متروی شیراز، حدفاصل میدان گل سرخ تا زیرگذر مطهری به طول تقریبی ۱۵ کیلومتر می‌باشد که توسط دو دستگاه EPB در حال حفاری می‌باشد. برای رسیدن به اهداف فوق مراحل ذیل دنبال شده است.

- ♦ گردآوری و بررسی اطلاعات موجود، اطلاعات و نقشه‌های ژئوتکنیکی مسیر
- ♦ بررسی داده‌های گمانه‌ها، آزمایشات برجا و آزمایشگاهی
- ♦ بررسی تونل‌سازی سپری و سپر EPB
- ♦ مدلسازی عددی تونل‌ها توسط نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL [۱۲] و ساخت مدل‌های متعدد
- ♦ تعریف مراحل و انجام محاسبات
- ♦ تحلیل نمودارها و نتایج حاصل شده و ارائه نتایج

با توجه به اینکه پارامترهای ژئوتکنیکی تغییرپذیر هستند و نتیجتاً خصوصیات محیطی و ژئوتکنیکی هر پروژه با سایر پروژه‌ها متفاوت است، این تحقیق یک مقدار را به عنوان فاصله بهینه جبهه‌کارها برای پروژه مذکور پیشنهاد خواهد کرد، اما عمده هدف این تحقیق بر مبنای ارائه یک روش مناسب برای بدست آوردن فاصله بهینه جبهه‌کارها در تونل‌های دوقلوی موازی بنا شده است.

### ۹-۱- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در چهار فصل تدوین شده است. در فصل اول بطور مختصر به خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر و آزمایشات آزمایشگاهی و صحرایی اشاره شده است. در فصل دوم تونل‌سازی سپری و ماشین حفار EPB مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل سوم تونل‌های دوقلوی متروی شیراز توسط نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL مدلسازی عددی شده است و در فصل چهارم به تعیین فاصله بهینه بین جبهه‌کارها پرداخته شده است. نهایتاً در فصل پنجم نتایج و پیشنهادات ارائه شده است.

فصل دوم

حفاری مکانیزه تونل در زمین های نرم  
و ماشین حفار EPB

## ۲-۱- مقدمه

استفاده مناسب از فضاهای زیرزمینی به منظور ارتقاء پیشرفت در صنعت حمل و نقل نوین در حال افزایش است. در نتیجه اکثر پروژه‌های زیرزمینی به اجبار در شرایط متنوع زمین شامل خاک‌های ضعیف حاوی آب و سنگ‌های نرم اجرا می‌شوند. عمده نگرانی‌ها از حفر تونل در نواحی شهری، تأثیر حفر تونل بر تأسیسات سطحی می‌باشد. پیشرفت‌های فنی قابل ملاحظه‌ای امکان انجام چنین پروژه‌هایی را میسر می‌سازد.

با پیشرفت تکنولوژی در عرصه‌های مختلف، تحولات عمده‌ای در فن تونل‌سازی صورت گرفته است. هر چند که هنوز هم روش‌های سنتی کاربرد وسیعی در این زمینه دارند، ولی به دلیل استفاده از ماشین‌آلات جدید، باعث کارآمدتر شدن این روش‌ها بویژه در تونل‌هایی با مقاطع بزرگ شده است. با توجه به کاربرد تونل‌سازی سپری در حفر تونل‌های متروی شیراز، در این فصل به تفصیل به بررسی تونل‌سازی سپری و ماشین حفار EPB پرداخته شده است.

## ۲-۲- روش‌های سنتی و مکانیزه حفر تونل در زمین‌های نرم

فضاهای زیرزمینی با ابعاد کوچکتر خطرات کمتری را در حین حفر دارند و زمان ایستایی و یا خودایستایی آنها بیشتر است. در نتیجه در اکثر روش‌های سنتی، حفر یکباره تمام مقطع تونل معمول نیست و سطح مقطع با حفر تونل‌های پیشرو به قسمت‌ها و جبهه‌کارهای کوچکتر تقسیم می‌شود. احداث تونل بصورت چند بخشی مستلزم نصب، باز کردن و جابجا نمودن‌های مکرر وسایل نگهداری موقت می‌باشد. در این روش‌ها نه تنها کار زیاد و مصرف قابل ملاحظه‌ای از وسایل نگهداری لازم است، بلکه نشست سقف را نیز موجب می‌شوند. اساس روش‌های مکانیزه حفر تونل در زمین‌های نرم بر استفاده از ماشین‌آلات حفاری بخصوص ماشین‌آلات تمام مقطع یا سپرها استوار است که در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری را بدست آورده است. سپرها سطح مقطع تونل را در یک مرحله حفاری

کرده و نگهداری ثابتی را برای پیشروی تونل تأمین می‌کنند. در این سیستم‌ها انتقال مصالح حفاری شده توسط نوار نقاله، دوغاب و یا واگن انجام می‌شود. از معایب این سیستم‌ها هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار بالا می‌باشد. همچنین در صورت خرابی بخشی از دستگاه، حفاری تماماً متوقف خواهد شد [۱۳].

### ۲-۳- تاریخچه تونل‌سازی سپری

روش‌های تونل‌سازی سپری بواسطه موفقیتی که این روش‌ها در حفر تونل در محیط‌های آبدار و تونل‌های زیرآبی بدست آوردند، رواج یافتند. حفر تونل در زمین‌های نرم با استفاده از سپر به عنوان روشی جهت دستیابی به ایمنی مناسب در جریان حفر و پوشش صورت گرفت. تکنیک استفاده از سپر اولین بار در نیمه سال ۱۸۸۰ در ساخت گالری کوچکی زیر رودخانه تایمز در انگلستان مورد استفاده قرار گرفت. این اولین کاربرد سپر در تونل‌سازی در شرایط زیرآبی بدون استفاده از هوای فشرده بود. دستاورد مهم دیگر در تونل‌سازی سپری طراحی اولین سپر مدور در سال ۱۸۹۶ بود که با موفقیت در جریان حفر دومین تونل در زیر رودخانه تایمز بکار گرفته شد. این تونل نیز بدون هوای فشرده حفر شد. این سپر مبنای ساخت سپرهای بعدی شد و مشابه سپرهایی بود که امروزه بکار گرفته می‌شوند. پیشرفت مهم دیگر در امر احداث تونل‌های زیرآبی، کاربرد پوشش‌های چدنی بود که در اتصال با سپر نصب می‌شدند. استفاده از هوای فشرده گام بعدی در احداث موفقیت‌آمیز تونل‌هایی بود که با مشکلات جریان آب در موقعیت‌های زیرآبی مواجه می‌شدند. سپرها در دستیابی به موفقیت در ساخت تونل‌های بزرگ‌راه و مترو در شهرهایی چون لندن و نیویورک به میزان زیادی مؤثر بودند [۱۳، ۱۴].

### ۲-۴- شرایط زمین‌های نرم در ارتباط با تونل‌سازی سپری

آزمون‌های دانه‌بندی خاک، حد روانی و حد خمیری خاک، سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در هر قسمت، مقاومت تک‌محوری و برشی و میزان سایش ذرات، مهمترین آزمایش‌های مؤثر در انتخاب نوع سپر می‌باشند. انواع آزمون‌های مؤثر در انتخاب سپر و کاربرد نتایج آنها در جدول ۲-۱ درج



گردیده است. همچنین شرایط زمین‌های نرمی که تونل‌سازی همراه با سپر غالباً در آنها بکار برده می‌شود، بطور مختصر در جدول ۲-۲ آورده شده است.

## ۲-۵- انواع ماشین‌آلات حفاری تونل

دستگاه‌های حفاری تونل بر اساس معیارهای مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۵]:

### ۲-۵-۱- تقسیم‌بندی بر اساس پوشش جبهه‌کار توسط دستگاه حفار

تقسیم‌بندی ماشین‌آلات حفاری تونل بر اساس پوشش جبهه‌کار به شرح ذیل است:

#### ۲-۵-۱-۱- دستگاه‌های حفاری تمام مقطع<sup>۱</sup>

ابزار برنده در این دستگاه‌ها بر روی مجموعه‌ای به نام کله حفار<sup>۲</sup> که عمدتاً دایره‌ای شکل است قرار می‌گیرند و بر اثر چرخش کله حفار به دور محور خود، ابزار برنده در دواير متحدالمرکزی بر روی زمین چرخانده شده و با اعمال نیروی فشاری<sup>۳</sup> توسط دستگاه، باعث حفر و کنده شدن زمین مقابل کله حفار می‌شود. ابزار برنده برای زمین‌های سخت و سنگی عمدتاً از نوع Disc Cutter و برای زمین‌های نرم از انواع Drag & Knife Bit می‌باشد. این دستگاه‌ها انواع مختلفی داشته و عمدتاً با نام TBM<sup>۴</sup> شناخته می‌شوند.

#### ۲-۵-۱-۲- ماشین‌آلات حفاری جزء مقطع<sup>۵</sup>

ابزار برنده این دستگاه‌ها در مجموعه‌ای متمرکز هستند که قسمت نسبتاً کوچکی از مقطع تونل را در بر می‌گیرد و حرکت این مجموعه ابزار برنده که بر روی کله حفار قرار دارد کل مقطع تونل را پوشش می‌دهد. عمده‌ترین ماشین‌آلات حفاری جزء مقطع دستگاه Road Header است و ماشین‌های حفاری تونل‌های معدنی از قبیل Mobile Minerها و Disk Boom Minerها را می‌توان جزء این ماشین‌آلات محسوب کرد.

<sup>۱</sup> - Full Face Machine

<sup>۲</sup> - Cutter Head

<sup>۳</sup> - Thrust

<sup>۴</sup> - Tunnel Boring Machine

<sup>۵</sup> - Partial Face Machine

جدول ۱-۲- انواع آزمون‌های مؤثر در انتخاب سپر و کاربرد نتایج آنها [۱۶]

کاربرد	آزمایشهای سنگ
شناسایی اولیه زمین و تعیین مراحل بعدی اکتشاف	برداشت‌های ژئوفیزیکی
محاسبه میزان نفوذ آب به داخل تونل و مهار آن در صورت لزوم توسط حفر زهکش و...	تعیین ضریب نفوذپذیری سنگ (آزمون‌های لوژان و پمپاژ)
محاسبه سیستم نگهداری، نوع و اندازه ابزار برنده و محاسبه نیروهای لازم جهت خرد کردن سنگ و پیشروی دستگاه	آزمون بار نقطه‌ای و یا تک‌محوری آزمون مقاومت فشاری سه‌محوری
تعیین ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ	آزمون برش مستقیم
بدست آوردن مقاومت فشاری سنگ، محاسبه و انتخاب پارامترهای سیستم‌های حفاری ضربه‌ای	آزمون ضربه
تعیین نوع ابزار برنده و طول عمر آنها	آزمایش سایندگی
کاربرد	آزمایش‌های خاک
محاسبه نشست زمین، طراحی سیستم لوله‌گذاری، تخمین مقاومت فشاری خاک، محاسبه مقاومت خاک در برابر نفوذ لبه سپر و ابزار برنده	آزمون نفوذ استاندارد (SPT)
انتخاب دستگاه، تخمین ضریب تراوایی، حد خمیری و ...	تعیین منحنی دانه‌بندی خاک
میزان نشست آب و مهار آن، طراحی نیروهای وارد بر دستگاه و انتخاب دستگاه	تعیین سطح ایستابی و ضریب تراوایی
محاسبه پمپ دوغاب، طراحی سیستم نگهداری در سپر و استفاده از نقاله ماریپیچی و انتخاب دستگاه	شاخص خمیری و حد روانی (تعیین حدود اتربرگ)
بدست آوردن پارامترهای مقاومت برشی خاک برای طراحی جک‌ها و قسمت‌های مختلف دستگاه	آزمایش برش مستقیم (SBT)
محاسبه نیروهای زمین، بدست آوردن درصد اشباع و رسیدن به حد خمیری، محاسبه سیستم نگهداری و حمل و نقل	تعیین رطوبت و وزن حجمی
محاسبه پی و تأسیساتی که بر تونل بار وارد می‌کنند	آزمایش مقاومت تک‌محوری و سه‌محوری

جدول ۲-۲- شرایط زمین‌های نرم در ارتباط با تونلسازی سپری [۱۷]

توضیحات	رده‌بندی اصلی خاک
<p>۱- خاک‌های فاقد چسبندگی مشکلات عمده‌ای را از جنبه ایمنی و راندمان حفر برای روش‌های معمولی تونلسازی در زمین‌های نرم ایجاد می‌کنند.</p> <p>۲- کاربرد سپر در شرایط هوای اتمسفر یک امر معمول است.</p> <p>۳- سپرها امکان کنترل بهتری را بر روی فضاهایی که بعد از حفر تونل در بالای آن ایجاد می‌شوند، فراهم می‌کنند.</p> <p>۴- این نوع خاک‌ها، ماسه‌های روان، شن‌های سست و لای را شامل می‌شوند.</p>	<p>خاک‌های ضعیف غیر چسبنده</p>
<p>۱- استفاده از سپر، امکان اعمال بهترین کنترل را بر روی خاک‌هایی که حاوی آب زیاد هستند و بسهولت در موقع کار سیلان پیدا می‌کنند، فراهم می‌آورد.</p> <p>۲- کاربرد سپر در شرایط هوای اتمسفر یک امر عادی است، هر چند در موارد خاصی نیز از هوای فشرده استفاده می‌شود.</p> <p>۳- از جمله این نوع خاک‌ها می‌توان رس‌های خمیری نرم را نام برد.</p>	<p>خاک‌های ضعیف خمیری (پلاستیک)</p>
<p>۱- خاک‌های واقع در زیر سطح ایستایی و خاک‌هایی که تحت تأثیر فشار آب قرار دارند، موجب بروز مشکلات خاصی می‌شوند. تونلسازی سپری روشی پیشرفته برای حفر موفقیت‌آمیز تحت چنین شرایطی است.</p> <p>۲- حفر تونل در زیر سطح ایستایی معمولاً مستلزم کاربرد سپر است. مگر اینکه زمین با تزریق دوغاب مناسب صلیب کافی یافته باشد، یا سطح آب پایین برده شده باشد.</p> <p>۳- برای احداث تونل در زیر آب‌های آزاد، تونلسازی سپری با هوای فشرده امری معمول است، با این وجود استثنائی وجود دارد و آن موقعی است که بین تونل و آب‌های آزاد (سطح زمین) سنگ صلب با ضخامت کافی وجود داشته باشد.</p>	<p>خاک‌های واقع در زیر سطح ایستایی</p>

## ۲-۵-۲- تقسیم‌بندی بر مبنای وضعیت زمین

تقسیم‌بندی ماشین‌آلات حفاری تونل بر اساس وضعیت زمین به شرح ذیل است:

### ۲-۵-۲-۱- دستگاه‌های حفاری مخصوص زمین‌های نرم

مطمئن‌ترین روش حفاری در زمین‌های نرم استفاده از انواع سپرها<sup>۱</sup> می‌باشد. سپر جسمی است فولادی و معمولاً به شکل استوانه با مقطع دایره‌ای که از ریزش مواد به داخل تونل جلوگیری کرده و توسط ماشین حفار در داخل زمین به جلو رانده می‌شود. انواع کلی سپرها عبارتند از:

الف) سپرهای باز<sup>۲</sup> که حفاری در این گونه سپرها می‌تواند بصورت دستی یا مکانیکی انجام شود.

ب) سپرهای کور<sup>۳</sup>

ج) سپرهای تعادل فشار زمین<sup>۴</sup> یا EPBS

د) سپرهای دوغابی<sup>۵</sup>

سپرهای تعادل فشار زمین و دوغابی از نوع تمام مقطع هستند و سپرهای باز و سپرهای کور می‌توانند جزء سپرهای تمام مقطع یا جزء مقطع باشند.

### ۲-۵-۲-۲- دستگاه‌های حفاری مخصوص زمین‌های سخت

حفاری در زمین‌های سخت هم با ماشین‌آلات جزء مقطع و هم با دستگاه‌های تمام مقطع متداول است. حفاری در سنگ‌های سخت نیرو و توان بسیار بالایی را می‌طلبد.

## ۲-۶- اصول کار سپرها

تونل‌سازی سپری عبارت است از بکارگیری دستگاهی که حفاظت کارگاه را در برابر ریزش‌های مختلف تأمین کند و سرعت بیشتری در پیشروی حاصل نماید. یک سپر استوانه‌ای متشکل از یک استوانه بزرگ می‌باشد که بدنه آن از فولاد ضخیم ساخته شده است. از داخل این استوانه حفاری تونل انجام می‌شود. سپرهای استوانه‌ای انواع گوناگونی دارند؛ برخی تنها ایمنی کارگران را تأمین می‌کنند و برخی دیگر بازوی حفاری دارند. اساس کار این دستگاه‌ها، حفاری تونل در تمام مقطع و غالباً به شکل

<sup>۱</sup> - Shield

<sup>۲</sup> - Open Face Shield

<sup>۳</sup> - Blind Shield

<sup>۴</sup> - Earth Pressure Balance Shield

<sup>۵</sup> - Slurry Shield

دایره است. سپر چند وظیفه اصلی را در تونل‌سازی بر عهده دارد؛ خاک‌های بالای مقطع را نگاه می‌دارد تا خاکبرداری در جبهه‌کار در پناه آن انجام شود؛ همچنین نصب قطعات پوشش تونل در انتهای آن اجرا می‌گردد. برای پیشرفت به سمت جلو، باید اتکایی برای سپر وجود داشته باشد. بدلیل سستی در زمین‌های نرم، بر خلاف زمین‌های سنگی که که جک‌ها به زمین تکیه می‌کنند، نمی‌توان از تکیه‌گاهی زمین استفاده کرد. لذا پیشروی دستگاه حفاری و سپر دور آن با تکیه بر پوشش اجرا شده توسط جک‌های افقی صورت می‌گیرد. به این دلیل پوشش از حلقه‌هایی با عرض ۰/۵ تا ۱/۵ متر متشکل از بتن مسلح پیش‌ساخته، چدن یا فولاد ساخته می‌شود [۹].

### ۲-۶-۱- قسمت‌های مختلف یک سپر

**لبه سپر:** لبه سپر قوی‌ترین بخش یک سپر می‌باشد که کار آن تأمین پیشروی صحیح مجموعه در زمین بدون تغییر شکل استوانه می‌باشد. دستگاه حفار تمام مقطع یا جزء مقطع در زیر این بخش قرار می‌گیرد. این قسمت از سپر غالباً با یک ماده مقاوم در برابر سایش پوشش داده می‌شود.

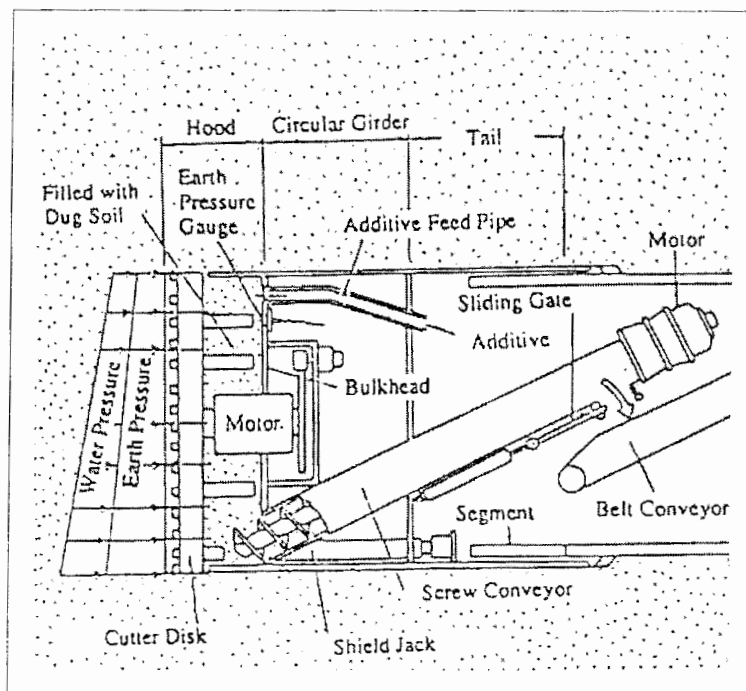
**بدنه سپر:** این بخش از سپر یک پوسته استوانه‌ای شکل فولادی است که در داخل آن تجهیزاتی همانند جک‌ها و پمپ‌های هیدرولیکی برای هل دادن سپر به سمت جلو قرار دارند.

**دنباله سپر:** قسمت دنباله در پشت بدنه سپر قرار می‌گیرد و فضای لازم را برای نصب سگمنت‌ها در مرحله پوشش تونل فراهم می‌نماید. عرض دنباله به طور معمول ۱/۵ برابر عرض هر یک از سگمنت‌ها می‌باشد. در شکل ۱-۲ قسمت‌های مختلف یک سپر نشان داده شده است [۱۸].

### ۲-۶-۲- دوره متعارف کار سپر

دوره متعارف کار یک سپر طبق مراحل ذیل است:

- ♦ حفاری تونل در طولی متناسب با یک حلقه پوشش
- ♦ پیش بردن دستگاه به کمک جک‌هایی که به آخرین حلقه پوشش تکیه می‌دهند.
- ♦ عقب کشیدن جک‌ها و جایگذاری یک حلقه تازه در فضایی که با پیشرفت سپر استوانه‌ای آزاد شده است.



شکل ۲-۱- قسمت‌های مختلف یک سپر [۱۸]

## ۲-۷- نشست سطح زمین و نگهداری فضای حفاری شده

یک سپر همانند یک وسیله متحرک مطمئن، قبل از نصب تجهیزات نگهداری به فضای حفاری شده ایمنی می‌بخشد. سپر می‌بایست در برابر فشار خاک اطراف مقاومت کرده و در مواقع ضروری مانع ورود آب شود. به غیر از این موارد، سپر باید پارامتر مهم دیگری نیز داشته باشد و آن جلوگیری از ایجاد نشست‌های نامطلوب در اطراف فضای حفاری شده می‌باشد؛ مخصوصاً در محیط‌های شهری که کنترل نشست از اهمیت خاصی برخوردار است. دستیابی به کمترین میزان نشست در حین پیشروی تونل نیازمند تدابیر ویژه‌ای است. نصب سیستم نگهداری بلافاصله بعد از حفر فضا پیش‌نیازی برای ایجاد حداقل نشست، کمترین شل‌شدگی و جابجایی لایه‌های زمین می‌باشد. نگهداری جبهه کار، محدوده سپر و پشت سپر ضروری است. در طول پیشروی تونل عوامل ذیل در میزان نشست سطح مؤثر هستند [۱۹]:

- ♦ پایین رفتن سطح ایستایی و در نتیجه تغییر وزن حجمی خاک
- ♦ تغییرات تنش‌ها بدلیل جابجایی خاک در جلوی تونل
- ♦ جریان یافتن خاک درون جبهه کار بدلیل نگهداری ناکافی جبهه کار
- ♦ تغییرات ساختاری به سبب لرزش‌ها

- ♦ نشست در اثر تزریق ناکافی در پشت سپر
- ♦ کاهش قطر تونل در اثر افزایش نیروهای وارده بر پوسته نگهداری

## ۲-۸- نگهداری و پایدارسازی جبهه کار

در زمین‌های سست نگهداری جبهه کار ضروری است؛ چون پس از حفر تونل و از بین رفتن تعادل، خاک و آب‌های زیرزمینی وارد تونل خواهند شد. این امر جدای ایجاد مشکلاتی برای حفاری، باعث نشست سطح زمین و تخریب تأسیسات سطحی خواهد شد.

### ۲-۸-۱- فشار جبهه کار

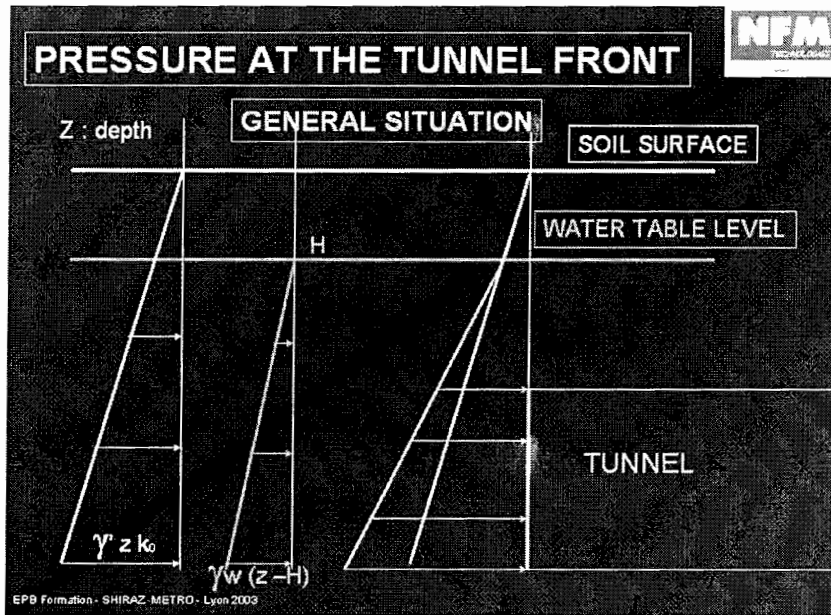
فشار وارد به جبهه کار از طرف زمین در دو حالت کلی ذیل قابل بررسی است [۲۰]:

#### الف- وقتی تونل زیر سطح ایستابی قرار دارد

فشار وارد بر جبهه کار در حالتیکه تونل زیر سطح ایستابی قرار دارد، شامل فشار هیدرواستاتیک آب و فشار فعال خاک می‌باشد که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، فشار فعال خاک که حاصل ضرب وزن مخصوص در ارتفاع و در ضریب  $k_0$  می‌باشد با فشار هیدرواستاتیک آب (حاصل ضرب وزن مخصوص آب در ارتفاع سطح ایستابی تا نقطه مورد نظر) جمع شده و وقتی تونل حفر می‌شود، تعادل طبیعی زمین از بین رفته و این نیروها به جبهه کار وارد می‌شوند.

#### ب- حالتی که تونل زیر سطح ایستابی قرار ندارد

در این حالت تنها فشار فعال خاک است که پس از حفر تونل به جبهه کار وارد می‌شود. این حالت در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- فشار وارد به جبهه کار از طرف زمین [۲۱]

## ۲-۸-۲- مقابله با فشار خاک و پایدارسازی جبهه کار

مقابله با فشار خاک در انواع سپرهای هوای فشرده<sup>۱</sup> به کمک فشار هوا، سپرهای دوغابی به کمک فشار آب یا دوغاب و سپرهای تعادل فشار زمین توسط فشار خاک حفاری شده در اتاقک حفاری انجام می‌شود. در این سپرها در قسمت جلوی سپر و پشت کله حفار محفظه‌ای وجود دارد که آن را اتاقک فشار<sup>۲</sup> و یا اتاقک حفاری می‌نامند. این قسمت از درون سپر بسته است و ارتباط با آن از طریق دریچه‌هایی مخصوص صورت می‌گیرد. در این سپرها با اعمال فشار در اتاقک حفاری با روش‌های فوق‌الذکر با فشار خاک در جبهه کار مقابله می‌شود. در حالتی که خاک ناتراوا باشد، اعمال فشار به راحتی انجام می‌شود. ولی در زمین‌هایی که تراوایی دارند، هوا یا سیالی که در اتاقک حفاری تحت فشار می‌باشد به داخل زمین نفوذ کرده و وارد زمین می‌شود. در این حالت ایجاد یک لایه ناتراوا در روی جبهه کار ضروری است که معمولاً این کار بوسیله ورود بنتونیت و تشکیل یک لایه کیک<sup>۳</sup> انجام می‌شود [۱۵].

1- Compressed Air Shield  
2- Chamber  
3- Cake



### ۲-۸-۲-۱- پایدارسازی جبهه کار توسط هوای فشرده

در برخی از انواع سپرها که عموماً در قدیم کاربرد داشته و هم‌اکنون کاربرد آن محدود شده است، پایدارسازی و حفاظت جبهه کار توسط هوای فشرده و اعمال فشار هوا بر روی جبهه کار انجام می‌شود. در واقع در این روش برای مقابله با فشار زمین، فشار هوا به جبهه کار اعمال می‌شود. از معایب و کاستی‌های این روش ثابت بودن فشار در ارتفاع اتاقک حفاری است. هم‌اکنون از این تکنیک برای تعمیرات، تعویض ابزار برنده و داخل شدن نفرت به داخل اتاقک حفاری در سپرهای تعادل فشار خاک و یا انواع دیگر سپرها استفاده می‌شود [۱۵].

### ۲-۸-۲-۲- پایدارسازی جبهه کار توسط فشار آب یا دوغاب

یکی از راه‌های حفاظت جبهه کار، اعمال فشار آب یا دوغاب در اتاقک حفاری است. در این حالت فشار داخل اتاقک بر خلاف سیستم هوای فشرده ثابت نیست و به ازای ارتفاع جبهه کار یا قطر سپر و به اندازه حاصلضرب وزن مخصوص سیال داخل اتاقک در ارتفاع جبهه کار، فشار پایین جبهه کار از فشار بالای جبهه کار بیشتر است. بنابراین تنظیم فشار در جبهه کار بهتر از حالت محافظت با هوای فشرده است. علی‌رغم این مزیت، در این روش باز هم تنظیم فشار در بالا و پایین جبهه کار به سختی امکان‌پذیر است؛ چون اختلاف وزن مخصوص خاک با سیال زیاد بوده و نهایتاً اختلاف فشار بالا و پایین جبهه کار نیز زیاد خواهد بود [۱۵].

### ۲-۸-۲-۳- پایدارسازی جبهه کار توسط اعمال فشار خاک حفاری شده در اتاقک فشار

بهترین شیوه حفاظت جبهه کار، اعمال فشار توسط خاک حفاری و جمع شده در اتاقک حفاری است. خاک حفاری شده که با شرایط زمین مقابل خود یعنی جبهه کار بسیار همخوانی و شباهت دارد و از نظر وجود آب و وزن مخصوص بسیار نزدیک به زمین دست‌نخورده است، می‌تواند اختلاف فشار بالا و پایین جبهه کار را بسیار دقیق‌تر از سیستم‌های قبلی تأمین نماید. فشار پایه داخل اتاقک حفاری بر مبنای فشار واقعی متوسط اندازه‌گیری شده در اتاقک حفاری و فشار برآورد شده از زمین بر مبنای اطلاعات ژئوتکنیک و محاسبات انجام شده مشخص می‌شود [۱۵].

## ۹-۲- تقسیم‌بندی سپرها

سپرها از مناظر مختلفی همچون تکنیک حفر، روش نگهداری جبهه‌کار، روش حمل مواد و نوع سیستم نگهداری بکار گرفته شده تقسیم‌بندی می‌شوند. امتیاز تونل‌سازی همراه با سپر نسبت به سایر روش‌های تونل‌سازی قابلیت این روش در زمین‌های سست، ریزشی و جریانی است. بنابراین در این روش‌ها نگهداری جبهه‌کار و دیوارهای تونل اهمیت بیشتری نسبت به سایر جنبه‌های تونل‌سازی داشته و تقسیم‌بندی سپرها عموماً بر این مبنا صورت می‌پذیرد. بر این اساس سپرها در دو گروه مهم زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۲]. در شکل ۲-۳ نمایی شماتیک از این ماشین‌آلات نشان داده شده است.

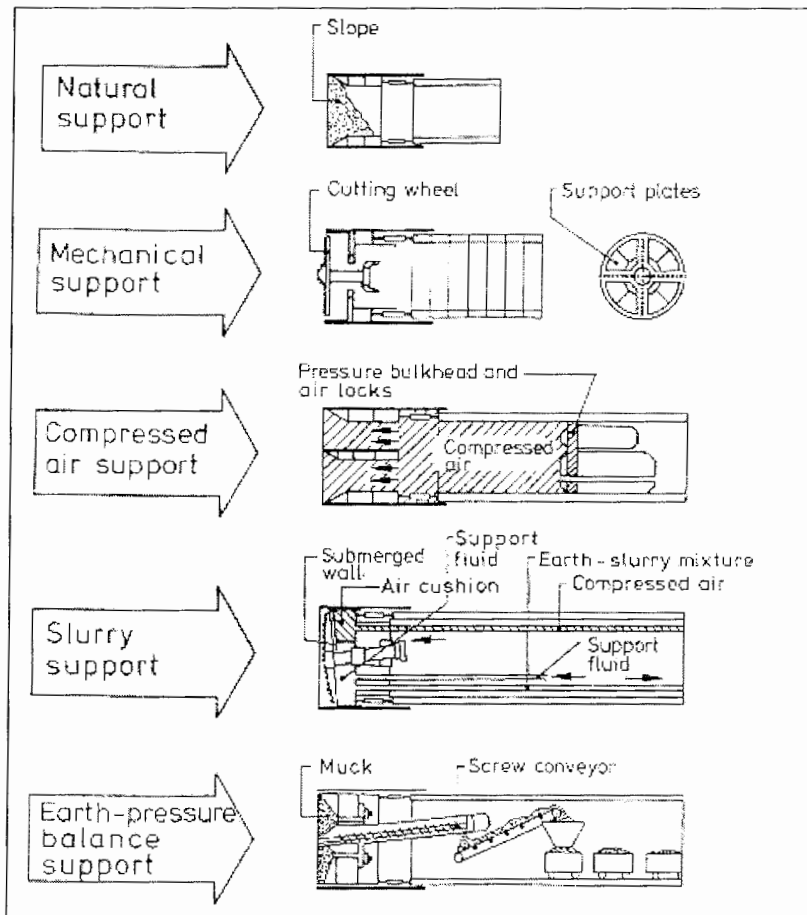
### الف - سپرهای مرسوم

در این سپرها به دلیل مقاومت نسبتاً مناسب زمین، جبهه‌کار تونل باز بوده و یا به طریق مکانیکی نگهداری می‌شود. این سپرها عموماً برای خاک‌های غیر ریزشی و شرایط بدون آب مناسب هستند. استفاده از این نوع سپرها در زمین‌های جریانی و شرایط وجود آب‌های زیرزمینی با فنون بهسازی زمین همچون پایین آوردن سطح آب، تزریق، انجماد و غیره امکان‌پذیر است. سپرهای مرسوم دو نوع ذیل را شامل می‌شوند:

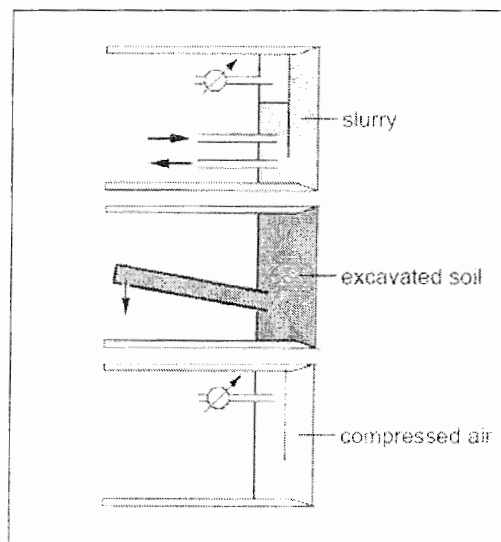
- ♦ سپرهای باز همانند سپر دستی، سپر مکانیزه و سپر نیمه مکانیزه
- ♦ سپرهای نیمه باز همانند سپر کور

### ب - سپرهای خاص

مشخصه اصلی این نوع سپرها دارا بودن اتاقک حفاری جهت مقابله با فشار زمین و آب در جبهه‌کار تونل می‌باشد. به همین دلیل به این نوع سپرها، سپرهای بسته نیز گفته می‌شود. بکارگیری این نوع ماشین‌ها در شرایط نامطلوب زمین همچون زمین‌های جریانی و زمین‌هایی که زیر سطح ایستایی قرار دارند، امکان‌پذیر است. استفاده از این نوع سپرها به دلیل در اختیار داشتن تجهیزات ویژه نسبت به روش‌های مرسوم هزینه بیشتری را به همراه دارد. در شکل ۲-۴ نمایی شماتیک از سپرهای خاص نشان داده شده است. سپرهای خاص شامل انواع سپرهای هوای فشرده، دوغابی و تعادلی با فشار زمین می‌باشند [۲۲]. بدلیل اهمیت این سپرها در ذیل به بررسی آنها پرداخته شده است.



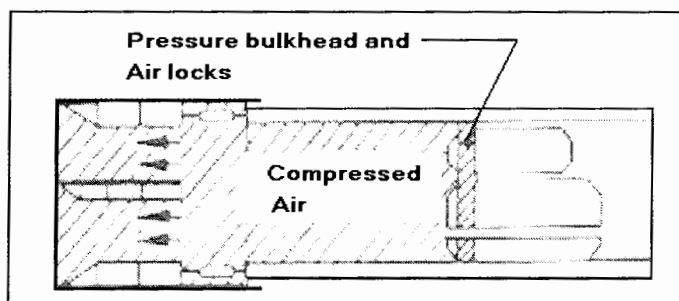
شکل ۲-۳- تقسیم‌بندی سپرها بر اساس نوع حفاظت جبهه‌کار [۱۶]



شکل ۲-۴- انواع سپرهای خاص [۲۲]

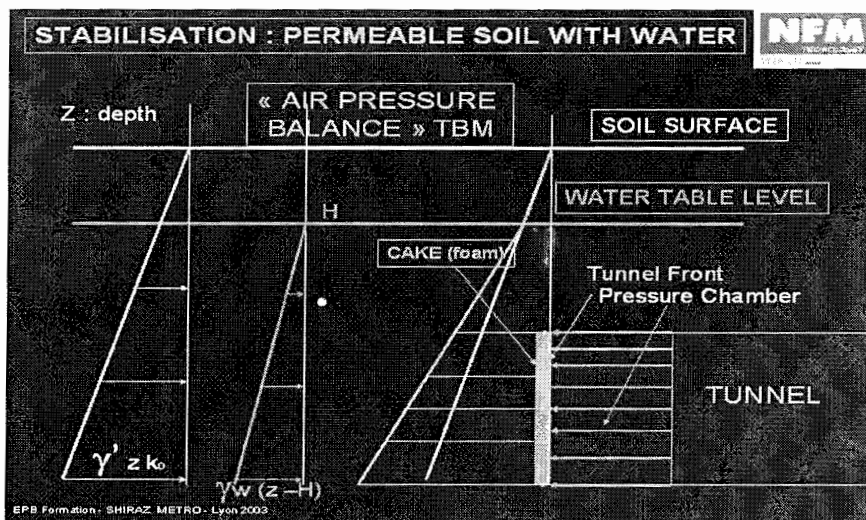
## ۲-۹-۱- سپر هوای فشرده

استفاده از هوای فشرده به منظور مقابله با آب‌های زیرزمینی سابقه طولانی دارد و زمان آن به سال ۱۸۲۸ باز می‌گردد. سپرهای دستی، نیمه مکانیزه یا تمام مکانیزه همراه با تجهیزات هوای فشرده و حبس هوا می‌توانند جزء سپرهای هوای فشرده محسوب شوند. در شکل ۲-۵ نمای شماتیک از یک سپر هوای فشرده نشان داده شده است. در سپر هوای فشرده، هوا در تعادل با فشار هیدرواستاتیک آب قرار می‌گیرد، ولی قدرت مقابله با فشار زمین را ندارد. بدین منظور از نگهداری طبیعی یا مکانیکی استفاده می‌شود. استفاده از هوای فشرده بویژه در زمین‌های متخلخل یک روش مناسب برای جلوگیری از ورود آب می‌باشد. همانگونه که اشاره شد از هوای فشرده نمی‌توان به منظور مقابله با فشار زمین استفاده کرد و بدین منظور از نگهداری طبیعی یا مکانیکی استفاده می‌شود.



شکل ۲-۵- نمای شماتیک از یک سپر هوای فشرده [۲۲]

اساس این روش در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. فشار آب در عمق بطور خطی افزایش می‌یابد و جهت مقابله با ورود آب به داخل تونل، فشار هوا بیشتر یا برابر با بیشترین مقدار فشار آب وارد بر جبهه کار می‌باشد. فشار هوا در تمام نقاط جبهه کار ثابت است و بنابراین در قسمت بالای جبهه کار فشار هوا از فشار آب بیشتر بوده و باعث آزاد شدن هوا در این بخش می‌شود. در جاهایی که شن‌های فاقد سیمان همراه با کمی ماسه وجود داشته باشد، افت هوای فشرده به سهولت بالا می‌رود. فرار هوای فشرده از میان لایه‌های نفوذپذیر احتمال ایجاد راه‌های عمده عبور آب و جریان یافتن آب به داخل تونل را افزایش می‌دهد. در زمین‌های با تراوایی بالا، بکارگیری این روش به دلیل فرار هوا دشوار می‌باشد. علاوه بر آن اجرای این روش نیازمند حداقل ضخامت پوشش به منظور جلوگیری از خروج ناگهانی هوا و متلاشی شدن سطح می‌باشد. همچنین بدلیل ایمنی پرسنل، اعمال فشار بیش از ۴ بار مجاز نیست [۲۲، ۲۳].

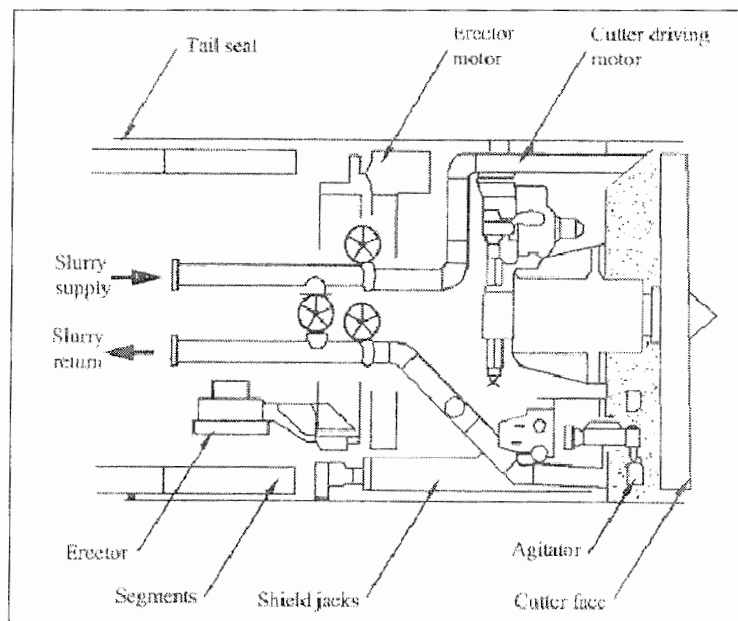


شکل ۲-۶- پایدارسازی جبهه کار توسط هوای فشرده [۲۱]

بوسیله پاشیدن یک محلول بنتونیتی به سطح جبهه کار، یک غشاء به ضخامت چند میلیمتر ایجاد شده و سطح جبهه کار تونل عایق می‌شود. با این اقدام هم مشکلات قبل مرتفع می‌گردد و هم امکان مقابله با فشار زمین فراهم می‌شود [۲۳].

## ۲-۹-۲- سپر دوغابی

تونل‌سازی با استفاده از سپرهای دوغابی یک روش ایمن و مطمئن به منظور حفر تونل با حداقل نشست در سطح می‌باشد. بکارگیری این روش در انواع زمین‌های سست آبدار یا بدون آب امکان‌پذیر می‌باشد. مبانی این روش تونل‌سازی اولین بار توسط Greathead (۱۸۷۴) و سپس Haag (۱۸۹۶) بکار گرفته شد. آنها دریافتند که با عایق نمودن، بستن جلوی سپر و ایجاد یک محفظه فشار پر شده از دوغاب می‌توان جبهه کار تونل را پایدار نمود. گرایل Grauel در سال ۱۹۱۲ برای اولین بار موفق به ساخت این سپر شد و بین سال‌های ۱۹۵۹ تا ۱۹۶۰ اولین سپر دوغابی به منظور ساخت تونلی با قطر ۳/۳۵ متر بکار گرفته شد [۲۲]. در شکل ۲-۷ نمایی شماتیک از این سپر دیده می‌شود.

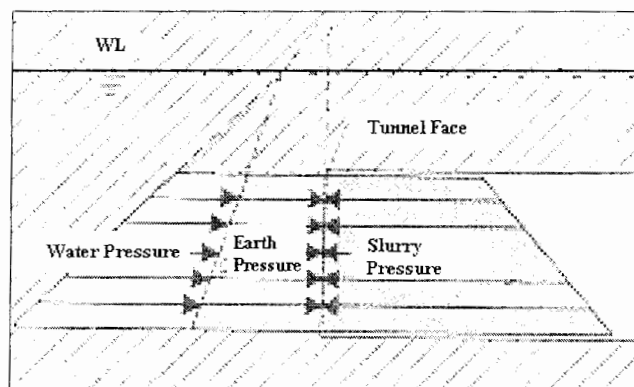


شکل ۲-۷- نمای شماتیک از یک سپر دوغابی [۱۴]

### ۲-۹-۲-۱- نگهداری جبهه کار

زیر سطح ایستابی و در شن و ماسه‌های سست، نگهداری جبهه کار با دوغاب مزایای بسیاری دارد. در این شرایط هوای فشرده مناسب نمی‌باشد. زیرا خشک کردن عملاً امکان‌پذیر نبوده و افت فشار هوا نیز زیاد می‌باشد.

در روش دوغابی از یک سیال تحت فشار برای پایدارسازی جبهه کار استفاده می‌شود. دوغاب در جبهه کار با فشار آب و فشار زمین مقابله می‌کند. در زمین‌های چسبنده نفوذناپذیر بکارگیری آب مناسب می‌باشد. در سایر موارد محلول‌های دیگر نظیر محلول آب- بنتونیت بکار گرفته می‌شود. استفاده از بنتونیت به دلیل رفتار مکانیکی، خاصیت خمیری و ظرفیت تورم آن صورت می‌گیرد. در این سیستم محلول دوغاب داخل زمین تحت فشار قرار گرفته و با ایجاد یک لایه نفوذناپذیر، آب‌بندی و پایداری جبهه کار را تأمین می‌کند. بکارگیری پلیمرها به جای بنتونیت نیز معمول می‌باشد. همانطور که در شکل ۲-۸ مشاهده می‌شود، در این روش فشاری که دوغاب به جبهه کار وارد می‌کند با وضع طبیعی سازگاری بیشتری دارد. زیرا افزایش فشار از بالا به پایین مقطع تابع همان قانونی است که بر فشار ایستابی ناشی از آب زیرزمینی حاکم است؛ لذا کاملاً موازی با آن می‌باشد. این نتیجه را نمی‌توان با هوای فشرده بدست آورد [۲۲، ۱۸].

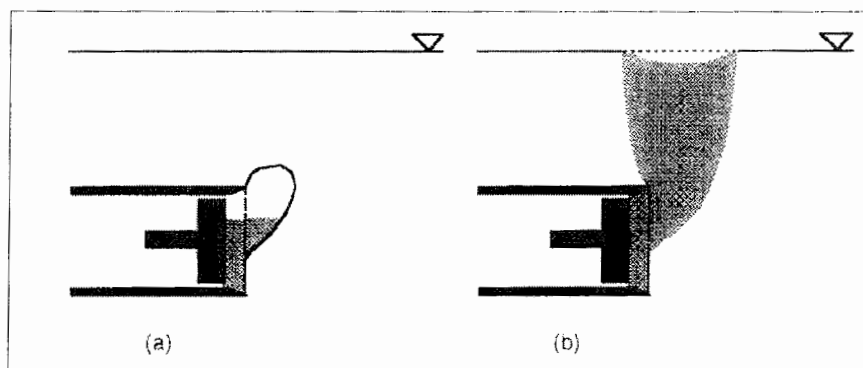


شکل ۲-۸- نگهداری جبهه کار در سپر دوغابی [۱۴]

### ۲-۹-۲-۲- اصول کار سپر دوغابی

در این روش جبهه کار تونل با استفاده از دوغاب نگهداری می‌شود. نوع محلول بکار گرفته شده بستگی به نوع زمین داشته، عموماً شامل آب و بنتونیت یا رس و در صورت نیاز سایر افزودنی‌ها می‌باشد. این محلول به داخل اتاقک حفاری در جلو جبهه کار پمپ می‌شود. محلول پرفشار داخل زمین شده و به شکل یک غشاء در سطح جبهه کار، آن را آب‌بندی می‌کند. این غشاء یک لایه نیمه‌تراوای رس یا بنتونیت می‌باشد. در این غشاء، محلول فشاری در اتاقک حفاری با فشار آب و زمین در تعادل می‌باشد.

در سپرهای دوغابی محلول نگهداری نقش واسطه انتقال مواد را نیز بر عهده دارد. زمین حفر شده بوسیله ابزار حفر، در اتاقک حفاری با محلول نگهداری مخلوط می‌شود. سپس این مخلوط به سطح زمین پمپ می‌شود. در تأسیسات جداسازی که عموماً در سطح زمین قرار می‌گیرند، محلول نگهداری از مواد حفاری شده جداسازی می‌شود. در صورت نیاز به این محلول مجدداً بنتونیت اضافه شده، سپس به جبهه کار تونل پمپ می‌شود. بزرگترین عیب سپرهای دوغابی نیاز به تأسیسات جداسازی است که این تأسیسات علاوه بر قیمت زیاد و مشکلات زیست محیطی، به فضا و انرژی زیادی نیاز دارند. از دیگر معایب این سپرها مشکلات اختلاط مواد ریز دانه با بنتونیت می‌باشد. دو مورد از مشکلاتی که در پایدارسازی جبهه کار در سپرهای دوغابی رخ می‌دهد، در شکل ۲-۹ نشان داده شده است.



شکل ۲-۹- مشکلاتی که در پایدارسازی جبهه‌کار در سپرهای دوغابی ایجاد می‌گردد [۲۴]

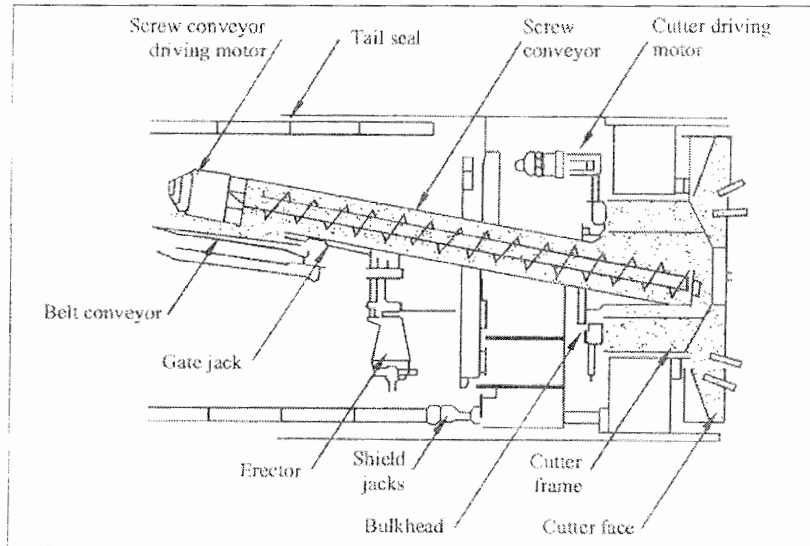
### ۲-۹-۳- سپر تعادلی با فشار زمین

توسعه سپرهای تعادلی فشار زمین در اوایل دهه هفتاد در ژاپن صورت گرفت. اولین سپر از این نوع در سال ۱۹۷۴ در ژاپن بکار گرفته شد. این سپر که در واقع ترکیبی از سپر کور و سپر دوغابی محسوب می‌شود، در سال‌های اخیر کاربرد وسیعی یافته است. اساس توسعه این سپر بر اساس سپر کور است که به منظور حفر در زمین‌های کاملاً خمیری مناسب می‌باشد.

در زمان ابداع این سپر، از سپر دوغابی بطور وسیع در زمین‌های غیر چسبنده استفاده می‌شد. با افزایش درصد مواد ریز دانه زمین در محلول نگهداری، عمل جداسازی پیچیده‌تر و پرهزینه‌تر شده، تجدید این محلول پس از طی مدت زمانی ضرورت پیدا می‌کرد. جدا از هزینه بالا و زیان‌های زیست‌محیطی، کمبود فضا در شهرهای اصلی ژاپن و مشکلات ایجاد تأسیسات جداسازی نقش مؤثری در توسعه سپرهای تعادلی داشته است. بنابراین این سپر با بکارگیری مزایای سپر کور و سپر دوغابی ابداع شد [۲۲، ۱۸]. نمایی شماتیک از این سپرها در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است.

در زمین‌های رسی می‌توان از خود زمین به عنوان ابزار نگهداری استفاده کرد. در این روش مواد کنده شده در حین حفر تونل جمع‌آوری شده و در محفظه خاصی که بلافاصله در پشت کله حفار قرار دارد، فشرده می‌شوند و تشکیل پوششی می‌دهند که نگهداری جبهه‌کار را تأمین می‌کند. این مواد فشرده شده قادر به تحمل فشار زمین و آب می‌باشند.





شکل ۲-۱۰- نمای شماتیک از یک سپر EPB [۱۴]

#### ۲-۹-۳-۱- اصول کار سپر تعادلی با فشار زمین

برخلاف سایر سپرها، پایدارسازی جبهه کار در سپر تعادلی فشار زمین بدون واسطه نگهداری ثانویه (هوای فشرده، محلول، صفحات مکانیکی) انجام می‌شود. در این روش مواد حفر شده توسط کله حفار به عنوان واسطه نگهداری بکار گرفته می‌شوند.

در صورتیکه فشار نگهداری ایجاد شده توسط مواد حفر شده در داخل اتاقک حفاری از حد تعادل بالاتر رود، محلول نگهداری و همچنین جبهه کار تونل بیشتر متراکم می‌شوند. در این زمان مواد از جلو سپر و از داخل اتاقک حفاری بوسیله یک نقاله مارپیچی یا نوار زنجیری منتقل می‌شوند. انتقال مواد می‌بایست در شرایط کنترل شده‌ای صورت گیرد تا از کاهش فشار در اتاقک حفاری و در نتیجه نشست زمین جلوگیری شود [۲۵].

#### ۲-۹-۳-۲- ویژگی‌های زمین و دامنه کاربرد سپر

شکل‌پذیری و روان‌گرایی مناسب، اصطکاک داخلی کم و نفوذپذیری کم خصوصیتی هستند که مواد حفر شده برای استفاده به منظور واسطه نگهداری باید دارا باشند. بطور معمول هیچ زمینی چنین شرایطی را قبل از حفر ندارد و بنابراین می‌بایست به آن موادی افزوده شود. مواد حفر شده از زمین از طریق نقاله مارپیچی از اتاقک حفاری تحت فشار به داخل تونل منتقل می‌شوند. افزودن مواد به نوع

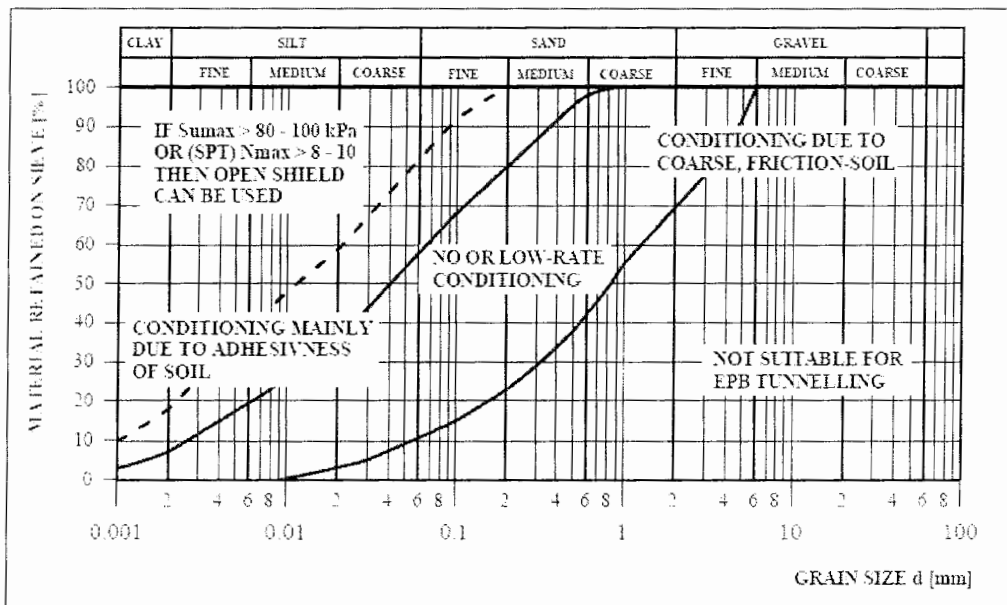
خاک و همچنین مشخصه‌های ژئوتکنیکی زمین از قبیل ابعاد ذرات، آب محتوی، حد روانی و شاخص خمیری بستگی دارد. تغییر این مشخصه‌ها بصورت ذیل است [۲۵]:

♦ افزودن آب به مواد حفر شده

♦ افزودن بنتونیت، رس یا مواد پلیمری به مواد حفر شده

♦ افزودن لای به مواد حفر شده

درصد مواد افزودنی باید در طول طراحی و انتخاب روش تونل‌سازی مشخص شود. در صورت امکان باید شرایط اولیه زمین دست نخورده باقی بماند. زیرا در صورت افزودن مقدار زیادی از مواد افزودنی، مشکل جداسازی این مواد پس از انتقال بوجود می‌آید. در صورت امکان بهتر است که افزودن این مواد در خلال حفاری جبهه‌کار و در جلوی کله حفار انجام گیرد. در این صورت از مسدود شدن دریچه‌ها جلوگیری می‌شود. در شکل ۲-۱۱ محدوده کاری سپرهای تعادلی نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۱- محدوده کاری سپر تعادلی با فشار زمین [۲۶]

زمین‌های رسی - سیلتی و سیلتی - ماسه‌ای با روان‌گرایی کم برای بکارگیری سپرهای تعادلی مناسب می‌باشند. با استفاده از مخلوط کننده‌ها در اتاقک حفاری نیز می‌توان در زمین‌های بسیار چسبنده از این سپر استفاده کرد. توجه به این موضوع مهم است که در صورت استفاده از آب در واسطه نگهداری و انتقالی در جبهه‌کار، غشاء وجود نخواهد داشت. در صورت توزیع نامتقارن فشار

نگهداری بر روی جبهه کار، هدایت سپر به سمت جلو نسبت به سپرهای دوغابی دشوارتر می‌شود. برخلاف سپرهای دوغابی، در این سپر امکان استفاده از سنگ‌شکن در جلو محفظه حفاری به دلیل آسیب رساندن به نقاله مارپیچی وجود ندارد. در زمین‌های غیر چسبنده با درصد مواد ریزدانه، سپرهای دوغابی عموماً مزایای بیشتری نسبت به سپرهای تعادلی دارند.

## ۲-۱۰- فرآیند حفر با استفاده از سپر

به جابجایی مواد از موقعیت طبیعی خود حفر گفته می‌شود. حفر می‌بایست با حداقل اغتشاش بر روی بافت زمین و کمترین میزان نشست با حداقل ضربه و تماس بر روی لایه‌های طبیعی زمین صورت گیرد. در تونل‌سازی سپری تنها جبهه کار تونل در دسترس است و مقطع تونل در پشت سپر قابل تغییر نمی‌باشد. ابعاد جبهه کار تونل بوسیله لبه‌های ابزار برنده در جلو سپر محدود می‌شود. براساس روش حفر بکار گرفته شده، ابزار حفاری با توجه به شرایط زمین انتخاب می‌شود [۱۸].

### ۲-۱۰-۱- روش‌های حفر تونل

حفاری در تونل‌سازی سپری توسط یکی از روش‌های ذیل اجرا می‌شود:

#### ۲-۱۰-۱-۱- تونل‌سازی بدون ابزار حفر

این روش در زمین‌های بسیار همگن بدون اجزای سخت بطور موفقیت‌آمیز قابل اجرا می‌باشد. خاک‌های سست همگن با مقاومت برشی پایین و رفتار خمیری بالا می‌توانند از طریق دریچه‌های تعبیه شده در جلو سپر به صورت مچاله شده داخل سپر شوند. تحت نیروی جک‌های فشاری، زمین مچاله شده و از دریچه‌های کنترل شده‌ای بر روی سیستم انتقال مواد قرار گرفته و به خارج هدایت می‌شود. به این نوع سپرها، اصطلاحاً سپر کور گفته می‌شود. در تونل‌سازی با این سپرها به منظور اجتناب از نشست سطح زمین، فشار و مقاومت سیستم نگهداری باید بیشتر از فشار زمین با رفتار خمیری باشد. به جز حفاری توسط سپر کور در خاک‌های چسبنده، مواد دانه‌ای نیز بدون ابزار حفاری قابل حفر هستند. در این روش خاک بوسیله سکوه‌های افقی محافظت شده بطور کنترل شده وارد سپر شده و از مجاری مخصوص به بیرون هدایت می‌شود.

**۲-۱-۱۰-۲- حفر دستی**

امروزه حفر دستی نقش فرعی را ایفا می‌کند. این روش تنها در طول‌های کوتاه و قطرهای کم و قابل دسترسی مورد استفاده می‌باشد. در این روش در زمین‌های پایدار از چکش‌های بادی و بیل‌های دستی استفاده می‌شود. تجربه و مهارت‌های فردی عامل مهمی در موفقیت این روش حفر می‌باشند. هر چند که حفر مکانیکی به سرعت جایگزین حفر دستی شده است، انعطاف‌پذیری حفر دستی باعث شده که در حفر مکانیزه برای جابجا نمودن و برداشتن موانعی که ماشین قادر به رفع آنها نیست، از این روش استفاده شود.

**۲-۱-۱۰-۳- حفر مکانیکی مقطعی جبهه‌کار**

حفر مکانیکی با توجه به شرایط زمین، طول مسیر و نرخ پیشروی مورد نظر به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. با توجه به روش حفر و ماشین مورد نظر ابزار حفاری مناسب انتخاب می‌شود. با انتخاب صحیح ابزار حفر با توجه به تغییرات ناپیوستگی‌ها و لایه‌های زمین می‌توان نرخ حفر با این روش را نسبت به حفر تمام مقطع افزایش داد و در هنگام مواجهه با قطعه سنگ‌های برجا بدون خرد نمودن آنها را از جبهه‌کار تونل خارج ساخت. در این روش تعویض ابزار حفر ساده است؛ زیرا می‌توان به سادگی ماشین حفر را از جبهه‌کار فاصله داد و نسبت به تعویض برش دهنده‌های مستهلک شده اقدام نمود. با ماشین‌های حفر مقطعی ایجاد مقاطع غیر دایره‌ای نیز ممکن است. مهمترین ماشینی که به این روش عمل حفر را انجام می‌دهد، ماشین حفر بازویی می‌باشد. ماشین حفار بازویی شامل یک بازوی برش‌دهنده است که بر روی یک شاسی متحرک سوار شده است. مصالح خرد شده توسط بازوهای جمع‌کننده بارگیری شده و به یک ناو زنجیری منتقل می‌شوند. حرکت مواد خرد شده در خلاف جهت جبهه‌کار تونل و از طریق ناو زنجیری بطور پیوسته به سیستم انتقال مواد خرد شده انجام می‌شود. سیستم برش این دستگاه در انواع مخروطی و طبلکی می‌باشد. کاربرد برش دهنده‌های مخروطی در سنگ سخت‌های و نوع طبلکی در زمین‌های نرم است.

**۲-۱-۱۰-۴- حفر مکانیکی تمام مقطع**

تونل‌سازان از دیرباز به این موضوع پی برده‌اند که مقطع دایره‌ای مناسب‌ترین شکل مقطع تونل می‌باشد. این موضوع منجر به توسعه ماشین حفار تمام مقطع شد. این روش حفر مزایای زیر را دارد:

- ♦ شکل جبهه‌کار در طول حفر تونل تغییرناپذیر باقی می‌ماند.
- ♦ مقطع تونل در اندازه مناسب و بدون شکست اضافی<sup>۱</sup> بدست می‌آید.
- ♦ از نظر پایداری، مقطع تونل بخصوص از نظر نصب نگهداری بهینه می‌شود.
- ♦ می‌توان به نرخ پیشروی بالا دست یافت.

در صورتیکه در اجرای طرح نیاز به تهیه ماشین جدید باشد، حفر تمام مقطع هزینه‌های زیادی را به طرح تحمیل خواهد کرد. هر چند که در حفر در زمین‌های ناهمگن با ماشین‌های حفر بخشی نرخ پیشروی تا حد زیادی به تجربه اپراتور ماشین بستگی دارد، ولی این امر در مورد ماشین‌های حفر تمام مقطع صادق نمی‌باشد. در این ماشین‌ها نرخ پیشروی براساس انتخاب ابزار و میزان نیروی حفر با توجه به شرایط زمین تعیین می‌شود. تغییر شرایط زمین در کارایی ماشین تأثیر زیادی دارد. همچنین تغییر ابزار حفر هزینه‌بر و دشوار می‌باشد.

عملکرد اصلی ماشین حفر تمام مقطع بر پایه چرخش یک کله حفار تجهیز شده به ابزار برش استوار است. کله حفار معمولاً با سرعتی ثابت می‌چرخد و بوسیله نیروی برشی پشت ماشین توسط یک سیستم جلو برنده هیدرولیکی به داخل جبهه‌کار تونل فشار داده می‌شود. در مرکز کله حفار، برش‌دهنده‌ها تمرکز بیشتری داشته و در این بخش عموماً از برش‌دهنده‌های دیسکی استفاده می‌شود. قسمت اصلی جبهه‌کار معمولاً با برش‌دهنده‌هایی از نوع دیسکی یا غلطشی حفر می‌شود. برش‌دهنده‌های لبه‌ای بر لبه خارجی کله حفار نصب می‌شوند که هدف از بکارگیری آنها کندن و حفر تونل به اندازه مورد نیاز است. از آنجایی که کار انجام شده توسط چنین برش‌دهنده‌هایی زیاد می‌باشد، مقاومت آنها در برابر شرایطی که موجب افزایش نرخ ساییدگی می‌شود، ضروری است.

## ۲-۱۰-۱-۵- حفر هیدرولیکی

در سال ۱۸۷۴ روش حفر با جت‌های کنترل شده سیال ابداع شد. این جت‌ها به منظور حفر در سپر باز مورد استفاده قرار گرفتند. امکان استفاده از این روش در زمین‌های سست جریانی میسر نبود. در سال ۱۹۷۸ با توسعه هیدروشیلد، محلول مناسبی به منظور حفر در زمین‌های سست تهیه شد. این مایع که به منظور نگهداری و انتقال بکار گرفته شد، نقش ابزار حفر را نیز بر عهده داشت. جت‌ها در طول جبهه‌کار و عمود بر جهت پیشروی نوسان می‌کنند. میزان فشار، قطر آبفشان و سرعت گردش

آبفشان‌ها نرخ پیشروی را تعیین می‌کنند. دوره برش به سختی زمین و میزان موانع موجود در محدوده حفر بستگی دارد. به منظور اجتناب از حفر کنترل نشده می‌بایست جت‌ها در داخل سپر قرار گیرند. بنابراین پوسته سپر عمق محدوده حفر را تعیین می‌کند. در این روش، حفر تونل تنها به مقاطع دایره‌ای محدود نمی‌شود.

با استفاده از جت‌های آب با فشار بالا (بیش از ۶۰۰ بار) می‌توان موانع موضعی را منهدم کرد. به منظور کنترل جت‌های فشار بالا و جلوگیری از آسیب‌های احتمالی، از سیستم هدایت مکانیکی استفاده می‌شود. در زمین‌های چسبنده، جت‌های سیال فشار متوسط جهت حفر و تمیز نمودن ابزار حفر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۸].

### ۲-۱۰-۲- انتقال مواد حفاری شده

با استفاده از تجهیزات انتقال، مواد حفر شده از جبهه کار به سطح زمین منتقل می‌شوند. با توجه به نوع سپر بکارگرفته شده، محتوی مواد حفاری شده متفاوت است. بنابراین روش‌های متفاوتی به منظور انتقال مواد، مورد نیاز می‌باشد [۱۸]:

- ♦ انتقال خشک برای موادی که دارای آب نمی‌باشند همانند سپرهای باز و هوای فشرده
- ♦ انتقال دوغابی برای موادی که با محلول نگهداری مخلوط شده‌اند همانند سپرهای دوغابی
- ♦ انتقال مواد بصورت خمیری همانند سپرهای تعادل فشار زمین که به این روش، انتقال خمیری گفته می‌شود.

تعیین یک سیستم خاص انتقال مواد برای هر یک از سپرها امکان‌پذیر نیست. با توجه به جنس زمین و وجود یا عدم وجود آب و همچنین نوع مواد افزودنی هنگام حفر، نوع انتقال‌دهنده تعیین می‌شود.

### ۲-۱۰-۲-۱- آماده‌سازی مواد حفر شده برای انتقال

خصوصیات مختلف مواد حفر شده، تجهیزات متفاوت انتقال را می‌طلبد. ابعاد اجزاء جامد و میزان همگن بودن مواد حفر شده اهمیت زیادی دارد. در صورتیکه خصوصیات مواد با توجه به سیستم حمل و نقل انتخاب شده مناسب نباشد، نصب تجهیزات خاصی مورد نیاز می‌باشد که از جمله این تجهیزات موارد ذیل قابل ذکر است:

- ♦ چکش حفر به منظور خرد کردن موانع موجود در جبهه کار تونل
- ♦ آیفشان‌های تزریق مایع در محفظه حفاری جهت انتقال دوغابی و خمیری
- ♦ بازوهای شستشو دهنده و ورزدهنده نصب شده در داخل محفظه حفاری
- ♦ سنگ‌شکن در جلوی نوار نقاله

## ۲-۱۰-۲-۲- انتقال مواد به بیرون محدوده جبهه کار تونل

روش‌های انتقال مواد به خارج جبهه کار براساس خصوصیات مواد حفاری شده و نوع روش نگهداری انتخاب می‌گردند. چهار روش عمده به شرح ذیل است [۱۸]:

### الف - نوار نقاله

رایج‌ترین روش حمل مواد در سپرها، استفاده از نوار نقاله است. این روش حمل در سپرهای باز و هوای فشرده بیشترین کاربرد را دارد. مواد بعد از کنده شدن از جبهه کار، به روش‌های مختلف بر روی نوار منتقل می‌شوند. یکی از این روش‌ها انتقال دستی است. روش دیگر استفاده از نوار نقاله در پایین‌ترین قسمت تونل است که بیل مکانیکی و یا بازوی حفاری بعد از حفر، مواد را بر روی نوار نقاله می‌ریزند و بدین طریق مواد خارج می‌شوند. در دستگاه‌های تمام مقطع بر روی کله حفار دستگاه جعبه‌هایی تعبیه می‌شود که مواد کنده شده را در هنگام چرخش در خود جمع کرده و بر روی نوار منتقل می‌کنند. اما در سپرهای کور، نوار نقاله در زیر دریچه کنترل و تخلیه مواد قرار می‌گیرد و هنگام پیشروی و زمانی که دریچه باز است مواد بر روی نوار نقاله ریخته شده و به قسمت عقب منتقل می‌شوند. توسط هر یک از روش‌های بالا که مواد به نوار منتقل شوند، بعد از طی طول قسمت پشتیبانی سپر، مواد در کامیون یا واگن‌ها بارگیری شده و برای تخلیه به خارج از تونل منتقل می‌شوند.

### ب - نقاله زنجیری

نقاله زنجیری از نظر ماهیت و نوع عملکرد تفاوت چندانی با نوار نقاله ندارد. اما ماهیت زنجیری و فلزی آن کمک می‌کند تا در مواردی همانند حمل مواد با شیب بیشتر و انتقال مواد چسبنده که نوار نقاله محدودیت دارد، کارآمد باشد. نقاله زنجیری در شاتل‌ها، دستگاه‌های حفار بازویی، بیل‌های مکانیکی و سپرهای کور بکار می‌رود.

### ج- نقاله مارپیچی

این روش که معمولاً با یک نوار نقاله یا نقاله زنجیری و یا حتی پمپ دوغابی همراه است، در سپرهای تعادلی بکار می‌رود. این روش حمل مواد علاوه بر انتقال مواد در هر شیب و جهتی، مزیت بسیار بزرگی دارد که باعث استفاده از آن در دستگاه‌های تعادل فشار زمین شده است. مزیت مزبور کنترل مواد و کنترل فشار در اتاقک فشار می‌باشد.

### د- انتقال دوغابی

استفاده از این روش برای انتقال مواد در دستگاه‌هایی که نگهداری جبهه کار توسط یک سیال حفاری انجام می‌شود، مرسوم است. در این روش سیال حفاری در اتاقک پشت کله حفار توسط یک پمپ تحت فشار قرار می‌گیرد. سپس مواد حفر شده به همراه سیال توسط پمپ دیگری که در پایین دستگاه قرار گرفته توسط یک رشته لوله به خارج از تونل منتقل می‌شوند و در آنجا توسط سرندها و هیدروسیکلون‌ها، سیال حفاری از مواد جدا شده و توسط خط لوله دیگری به جبهه کار منتقل می‌شود. از آنجا که قطر ذرات حفر شده با توجه به محدودیت قطر لوله و پمپ و نیز حمل توسط سیال، باید در محدوده خاصی باشد، لذا یک گریزلی و سنگ‌شکن در جلوی پمپ تعبیه می‌شود.

## ۲-۱۰-۳- ناتراواسازی و فرآیندهای تزریق در تونل‌سازی سپری

بخش مهمی از ماشین سپر شامل تجهیزات تزریق می‌باشد. تزریق در سپرهای هوای فشرده، دوغابی و فشار تعادلی زمین که به روش قطعه‌گذاری تونل را نگهداری می‌کنند، حائز اهمیت است. تزریق مانع از ورود آب به محدوده سپر شده و از نشست‌های احتمالی جلوگیری می‌کند. با آب‌بند نمودن دنباله سپر به همراه سایر تمهیدات، نگهداری تونل تأمین می‌شود. در این زمینه نصب تجهیزات تزریق به منظور تزریق ملات و دوغاب در پشت پوشش اهمیت زیادی دارد. استفاده از تزریق یک راهکار مناسب برای تونل‌سازی در زمین‌های مشکل‌آفرین به منظور فائق آمدن بر شرایط پیش‌بینی نشده و آماده‌سازی زمین برای بکارگیری سپر می‌باشد [۱۸]:

### ۲-۱۰-۳-۱- آب‌بند کردن پشت سپر

در تونل‌سازی سپری به هنگام قطعه‌گذاری، یک حلقه که اصطلاحاً حلقه واکنش نامیده می‌شود، در پشت دنباله سپر باقی می‌ماند. این حلقه در محیط بیرونی به زمین و در محیط درونی به حلقه‌های



نگهداری محدود می‌شود. آب‌بند پشت سپر نقش جدا کننده سپر از حلقه پشتیبان را بر عهده دارد. طراحی ارتفاع آب‌بند با توجه به حداقل عرض حلقه پشتیبان صورت می‌گیرد. ضخامت حلقه پشتیبان به طور معمول بین ۷۰ تا ۱۲۰ میلیمتر می‌باشد. در فضاهاى بیش از ۲۵۰ میلیمتر از بتن‌ریزی تزریقی استفاده می‌شود.

آب‌بند سپر به منظور آب‌بند نمودن درز موجود در بین دنباله سپر و محیط بیرونی سگمنت‌های نگهداری بکار می‌رود. این تجهیزات باید قابلیت تحمل فشار زیاد ناشی از فشار آب و زمین را داشته باشند.

آب‌بندها انواع گوناگونی دارند از جمله موارد ذیل را می‌توان نام برد:

- ♦ آب‌بندهای پلاستیکی
  - ♦ برس‌های سیمی
  - ♦ بتن‌ریزی تزریقی با نگهدارنده انتهایی
- در سپر حفار تونل‌های متروى شیراز از آب‌بندهای سیمی استفاده شده است.

## ۲-۱۰-۳-۲- روش‌های تزریق

در حین پیشروی سپر، فضای باقیمانده بین زمین و قوس بیرونی سگمنت‌های نگهداری با تزریق تحت فشار توسط دوغاب پر می‌شود. در این عمل اهداف ذیل دنبال می‌شوند:

- ♦ قرارگیری صحیح سگمنت‌ها در محل خود و جلوگیری از وارد شدن تنش خمشی و بار زیاد به آنها
- ♦ باقی ماندن تنش زمین در وضعیت طبیعی خود و کنترل نشست سطح زمین
- ♦ جلوگیری از تماس مستقیم سگمنت‌های نگهداری با زمین
- ♦ ناتراواسازی نگهداری تونل

برخی از روش‌های تزریق به شرح ذیل است [۱۸]:

### الف- تزریق از داخل حفره‌های سگمنت‌های نگهداری

در این روش، تزریق از داخل سگمنت‌های نگهداری و عموماً در دو مرحله انجام می‌شود. تزریق اولیه به منظور احاطه نمودن سگمنت‌ها جهت جلوگیری از نشست آنی بکار می‌رود. در صورتیکه تزریق اولیه کافی نباشد، باعث بروز مشکلاتی در جریان حفر تونل می‌گردد. بدین جهت از تزریق ثانویه استفاده می‌شود. با استفاده از تزریق ثانویه، فضاهای خالی باقیمانده در اطراف تونل پر می‌شوند.

این فضاها می‌توانند در اثر نشست و کاهش حجم مواد تزریق شده اولیه بوجود آمده و یا از ابتدا وجود داشته باشند. عموماً سیستم تزریق ثانویه در انتهای سیستم پشتیبان و به فاصله ۴۰ تا ۱۰۰ متری سپر قرار می‌گیرد. بکارگیری فشار زیاد در این تزریق منجر به تراکم مجدد زمین حفر شده اطراف تونل می‌گردد.

### ب- تزریق از طریق دنباله سپر

استفاده از این روش در زمین‌های فاقد چسبندگی به منظور جلوگیری سریع از نشست زمین دارای مزیت بیشتری می‌باشد. بکارگیری این روش مستلزم استفاده از آببندهای پیشرفته برس سیمی، پلاستیکی و بتن‌ریزی تزریقی با نگهدارنده انتهایی می‌باشد. در این روش فضای ایجاد شده بلافاصله توسط تزریق پر می‌شود. تزریق ثانویه می‌تواند به منظور جلوگیری از نشست در مراحل بعد صورت گیرد.

### ۲-۱۰-۴- قطعه‌گذاری<sup>۱</sup>

همانگونه که اشاره شد در تونل‌سازی سپری با مقاطع دایره‌ای از قطعه‌گذاری استفاده می‌شود. در این روش قطعات پیش‌ساخته در پشت سپر نصب می‌شوند و نگهداری دنباله سپر توسط این قطعات تأمین می‌شود. این قطعات به وسیله بازو در محل خود قرار می‌گیرند. از آنجا که قطر کله حفار کمی بیشتر از قطر بدنه سپر است، بعد از نصب قطعات پوششی بین دیواره خارجی تونل و زمین، یک حلقه یا فضای خالی بوجود می‌آید. این فضا می‌بایست سریعاً با تزریق پر شود. با استفاده از لاستیک‌های مصنوعی و برخی مواد شیمیایی این قطعات کاملاً آب‌بند می‌شوند.

### ۲-۱۱- مزایا و معایب تونل‌سازی سپری

در صورت انتخاب سپر مناسب، تونل‌سازی سپری به عنوان روشی مناسب برای حفاری در زمین‌های نرم پیشنهاد می‌شود. تونل‌سازی سپری در شرایط نامناسب زمین برای مسیرهای طولانی هنگامیکه نرخ پیشروی زیادی مورد نظر باشد و یا مقررات سخت‌گیرانه‌ای در مورد نشست سطح زمین وجود داشته باشد، یک جایگزین مناسب فنی و همچنین اقتصادی برای سایر روش‌های تونل‌سازی

می‌باشد. بکارگیری مناسب تونل‌سازی سپری هنگامی امکان‌پذیر است که در طول طراحی در کنار مزایا، معایب آن نیز مورد توجه قرار گیرد. با برخی تدابیر اقتصادی در مورد تونل‌هایی که با سپر هدایت می‌شوند، در بسیاری از موارد، تونل‌سازی سپری نسبت به ساخت تونل با روش کند و پوش و یا روش‌های سنتی با صرفه اقتصادی بهتری انجام می‌شود.

### ۲-۱۱-۱- مزایای تونل‌سازی سپری

از مزایای تونل‌سازی سپری موارد ذیل را می‌توان نام برد:

- ♦ مکانیزه بودن و نرخ پیشروی بالا
- ♦ حفر تمام مقطع در یک مرحله و ایجاد مقطع دقیق برای تونل
- ♦ حداقل تأثیر بر سازه‌های سطحی و نشست کم سطح زمین
- ♦ ایمنی بالا برای پرسنل
- ♦ روش مناسب ساختمانی زیست محیطی، ثابت ماندن سطح آب زیرزمینی و آلودگی صوتی بسیار کم
- ♦ کیفیت بالا، آستر بندی بصورت اقتصادی
- ♦ حذف نگهداری موقت

### ۲-۱۱-۲- معایب تونل‌سازی سپری

از معایب تونل‌سازی سپری موارد ذیل قابل ذکر هستند:

- ♦ سرمایه‌گذاری بسیار زیاد اولیه
  - ♦ زمان طولانی آشنایی با دستگاه
  - ♦ دشوار و پرهزینه بودن تجهیز و آماده‌سازی دستگاه
  - ♦ اقتصادی بودن تنها در مسیرهای طولانی
  - ♦ عدم کارایی مناسب در هنگام تغییر ناگهانی شرایط زمین
  - ♦ عدم شکل‌پذیری برای تونل‌هایی با مقاطع مختلف
- بطور خلاصه می‌توان بارزترین معایب تونل‌سازی سپری را هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار بالا و انعطاف‌پذیری بسیار کم این روش ذکر نمود.

## ۱۲-۲- مسائل اصلی و مهم در سیستم EPBS متروی شیراز

با توجه به اینکه در ساخت تونل‌های دوقلوی متروی شیراز از دو دستگاه EPB ساخت شرکت NFM فرانسه استفاده شده است، در ذیل به اختصار به بررسی مسایل اصلی و مهم در این دو سپر پرداخته شده است [۲۱].

### ۱-۱۲-۲- قسمت‌های اصلی دستگاه

همانطور که در شکل ۱۲-۲ نشان داده شده است، قسمت‌های اصلی دستگاه EPB تونل‌های دوقلوی متروی شیراز عبارتند از:

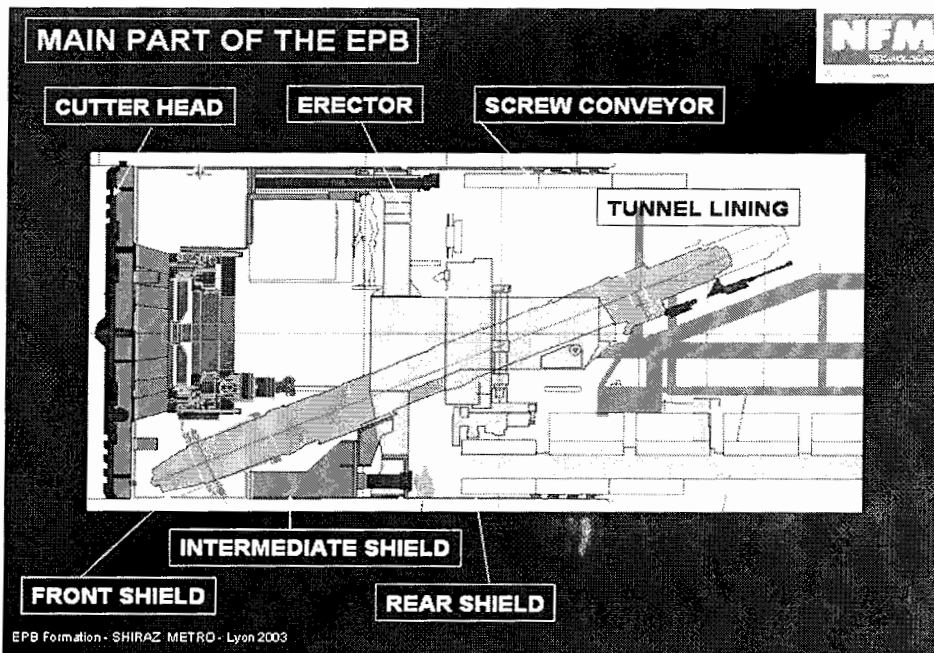
- ♦ کله حفار یا Cutter Head که وظیفه حفر را بر عهده دارد. سپر شامل سه قسمت Rear Shield، Intermediate Shield و Front Shield است و وظیفه ایجاد فضای کار و حفاظت از قسمت‌های اصلی دستگاه را بر عهده دارد.
- ♦ نقاله ماریچی<sup>۱</sup> که وظیفه حمل خاک از محفظه حفاری و تنظیم فشار اتاقک حفاری را بر عهده دارد.
- ♦ Erector که وظیفه نصب سگمنت‌ها را بر عهده دارد.

### ۲-۱۲-۲- تنظیم فشار در اتاقک حفاری

برای تنظیم فشار در داخل اتاقک حفاری، خروج مصالح حفاری شده با تنظیم سرعت چرخش نقاله ماریچی کنترل می‌شود؛ یعنی تنظیم فشار با کنترل میزان خروجی مصالح امکان‌پذیر است. هرچند که از طریق باز و بسته کردن دریچه نقاله ماریچی<sup>۲</sup> و یا تنظیم آن هم امکان کنترل خروج مصالح حفاری شده و در نتیجه کنترل فشار وجود دارد، اما بهتر است از راه حل اول یعنی تنظیم سرعت چرخش نقاله ماریچی استفاده شود.

<sup>۱</sup> - Screw Conveyor

<sup>۲</sup> - Screw Gate

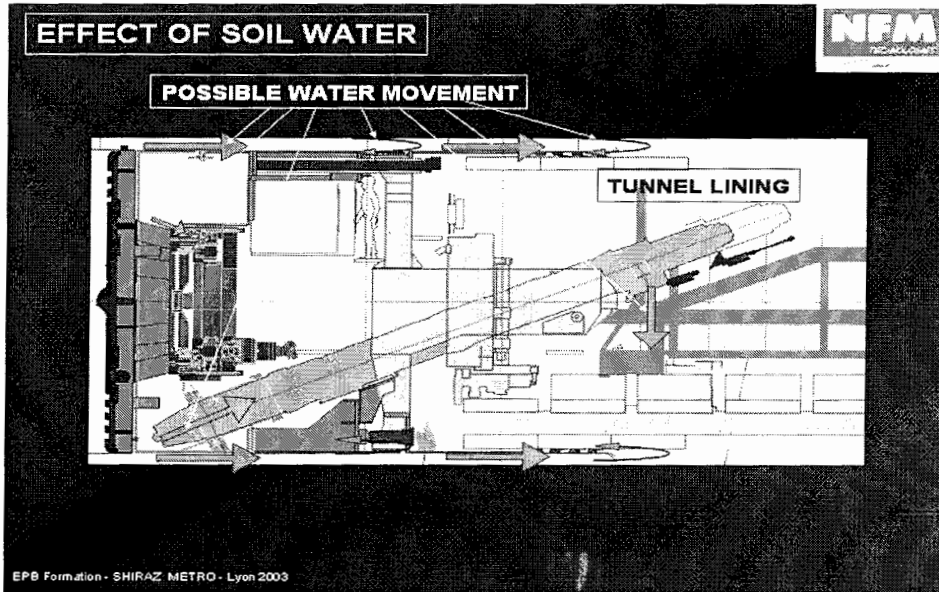


شکل ۲-۱۲- قسمت‌های اصلی دستگاه EPB تونل‌های دوقلوی متروی شیراز [۲۱]

### ۲-۱۲-۳- آب‌بندی دستگاه

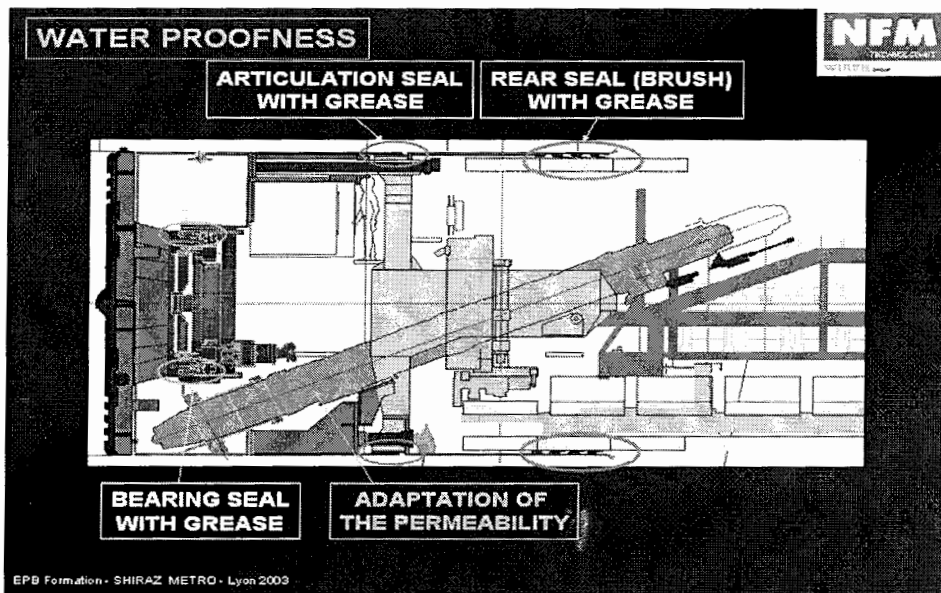
با توجه به شکل ۲-۱۳ محل‌هایی که احتمال ورود آب به داخل دستگاه وجود دارد، مشخص می‌شوند. این قسمت‌ها شامل داخل نقاله مارییچی و دریچه آن، محل مفصل دستگاه<sup>۱</sup>، فاصله بین سپر و سگمنت‌ها در انتهای دستگاه<sup>۲</sup> و قسمت یاتاقان<sup>۳</sup> اصلی دستگاه می‌باشند.

1 - Articulation Joint  
2 - Tail Shield  
3 - Bearing



شکل ۲-۱۳- محل‌هایی که احتمال نفوذ آب به درون دستگاه EPB وجود دارد [۲۱]

با توجه به اینکه نشت آب به داخل دستگاه و تونل ایجاد مشکل می‌کند، بنابراین در این محل‌ها تمهیدات خاصی جهت آب‌بندی دستگاه پیش‌بینی می‌شود. همانطور که در شکل ۲-۱۴ ملاحظه می‌شود یاتاقان اصلی دستگاه، مفصل بین دو سپر و فاصله بین سپر و سگمنت‌ها بوسیله تزریق گریس آب‌بندی یا ماستیک آب‌بندی می‌شوند.



شکل ۲-۱۴- آب‌بندی محل‌های نفوذ آب به درون دستگاه EPB [۲۱]

آب‌بندی نقاله مارپیچی نیز با تنظیم نفوذپذیری مصالح حفاری شده که در داخل آن حرکت می‌کنند، ممکن می‌شود. بدین صورت که محل‌هایی برای تزریق بنتونیت در داخل نقاله مارپیچی پیش‌بینی شده که در مواقع لزوم می‌توان با تزریق بنتونیت نفوذپذیری مصالح داخل نقاله مارپیچی را کاهش داده و آب‌بندی این قسمت را تضمین نمود.

### ۲-۱۲-۴- تخلیه مصالح حفاری شده

اعمال فشار و چرخش کله حفار دستگاه باعث می‌شود تا خاک حفاری شده به پشت کله حفار یا در واقع اتاقک فشار منتقل شود. آب موجود در زمین و همچنین آب و فومی که از طریق دستگاه وارد اتاقک فشار و جبهه کار می‌شوند، باعث می‌گردند که خاک و مصالح حفاری شده در پشت کله حفار و در اتاقک فشار بصورت خمیری و گل در بیایند. در پشت کله حفار سه بازوی استوانه‌ای<sup>۱</sup> وجود دارد که به مخلوط شدن مصالح با آب و فوم کمک می‌کنند. مصالح مخلوط شده از طریق نقاله مارپیچی به داخل دستگاه هدایت شده و از طریق دریچه آن روی تسمه نقاله ریخته می‌شوند. تسمه نقاله نیز مصالح را تا انتهای قسمت پشتیبانی دستگاه هدایت کرده و از آنجا در واگن‌ها تخلیه می‌کند.

### ۲-۱۲-۵- کاهش اصطکاک بین دستگاه و زمین

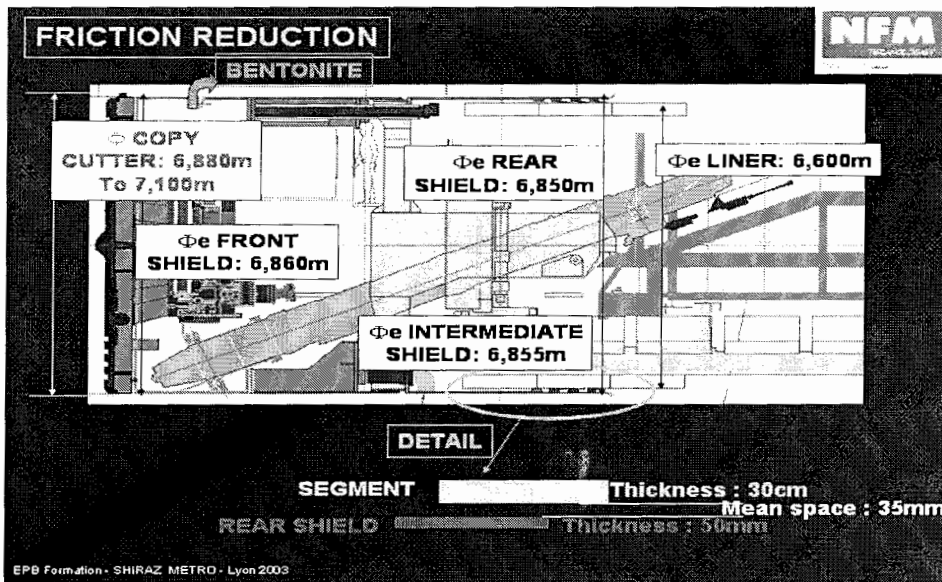
به علت تماس با خاک و زمین، روی سطح سپر اصطکاک زیادی ایجاد می‌شود که نیروی بسیار زیادی را طلب می‌کند و حتی ممکن است در زمین‌هایی که خورندگی دارند، باعث فرسایش سطح سپر شود. همچنین خاصیت الاستیسیته و ارتجاعی بودن خاک باعث می‌شود تا خاک پس از حفر شدن تمایل به جمع شدن و کاهش قطر تونل داشته باشد که این مسأله باعث تشدید چسبندگی می‌گردد. برای مقابله با این مشکل چند راه حل وجود دارد:

الف) سپر را کمی بصورت مخروطی می‌سازند که قطر انتهای آن به مقدار بسیار جزئی از جلوی آن کمتر باشد. به عنوان نمونه می‌توان به دستگاه حفار نشان داده شده در شکل شماره ۲-۱۵ اشاره نمود. همانطور که مشاهده می‌شود قطر حفاری در این دستگاه ۶/۸۸۰ متر، قطر سپر ابتدایی<sup>۲</sup> برابر ۶/۸۶۰ متر، قطر سپر میانی<sup>۳</sup> برابر ۶/۸۵۵ متر و قطر سپر انتهایی برابر با ۶/۸۵۰ متر است.

<sup>۱</sup> - Mixing Arm

<sup>۲</sup> - Front Shield

<sup>۳</sup> - Intermediate Shield



شکل ۲-۱۵- تفاوت قطر قسمت‌های مختلف سپر برای کم کردن اصطکاک بین زمین و دستگاه [۲۱]

ب) برای کم کردن اصطکاک بین جداره دستگاه و زمین، بین این فاصله بنتونیت تزریق می‌شود. در واقع در قسمت‌هایی از پوسته سپر ابتدایی محل‌هایی برای تزریق بنتونیت پیش‌بینی می‌شود.

## ۲-۱۲-۶- قسمت پشتیبانی<sup>۱</sup>

قسمت پشتیبانی دستگاه با طول کل ۹۲/۶۰ متر شامل دو قسمت زیر می‌باشد که در شکل

۲-۱۶ نشان داده شده است:

الف) پل ارتباطی<sup>۲</sup>

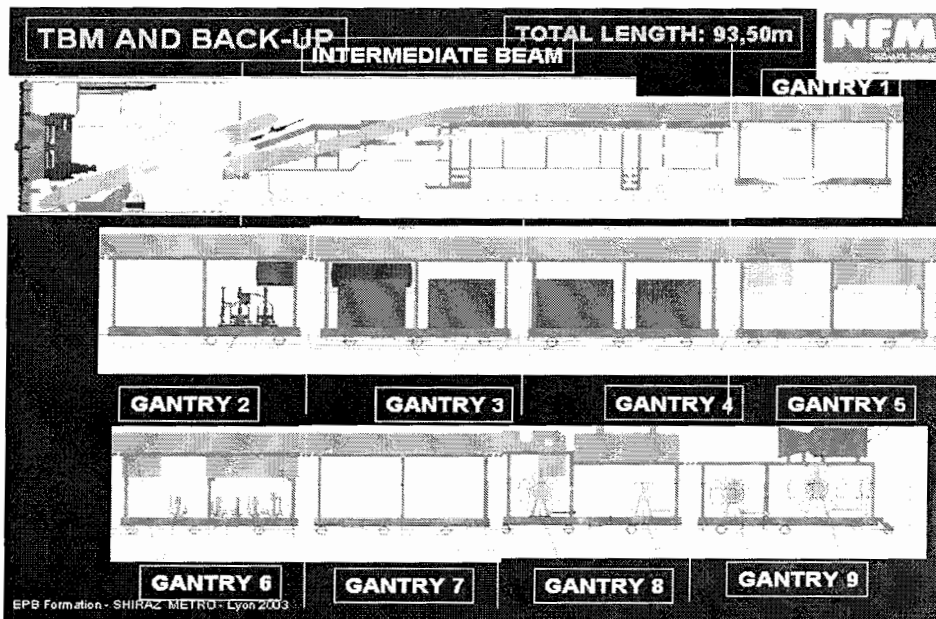
ب) مجموعه Gantryها که روی ریل حرکت می‌کنند و وظیفه حمل قسمت‌های مختلف همانند انواع الکتروموتورها، پمپ‌ها و مخازن هیدرولیک، کمپرسورها، ترانسفورماتورها و غیره را بر عهده دارند.

پل ارتباطی حد واسط بین سپر و Gantryها است که روی چرخ رولیک حرکت می‌کند و از یک طرف به انتهای سپر و از طرف دیگر به Gantry اول متصل است. وظیفه اصلی این قسمت به غیر از اتصال این قسمت‌ها، ایجاد فضای مناسب جهت نصب ریل و تراورس‌های سیستم حمل و نقل و همچنین انتقال سگمنت‌ها به جلوی دستگاه است.

<sup>۱</sup> - Back up

<sup>۲</sup> - Intermediate Beam or Connection Beam





شکل ۲-۱۶- قسمت‌های مختلف پشتیبانی دستگاه حفار EPB [۲۱]

## ۲-۱۳- مبانی انتخاب نوع دستگاه TBM متروی شیراز

همانطور که قبلاً نیز عنوان شد، نوع و مشخصات کلی هر دستگاه حفار تونل بر اساس مشخصات زمین مورد حفاری در هر تونل و بر مبنای مشخصات هندسی تونل مورد نظر تعیین می‌شود. بدین مفهوم که برای هر پروژه دستگاهی خاص طراحی می‌شود که فقط در شرایط ژئوتکنیکی آن پروژه و پروژه‌های مشابه قابل استفاده است [۲۱].

## ۲-۱۳-۱- نوع کله حفار و ابزار برنده

با توجه به اینکه جنس زمین مسیر تونل‌های متروی شیراز خاکی و از نوع سیلت و رس ریز دانه و بدون مقاومت زیاد می‌باشد، دستگاه TBM از نوع دستگاه‌های مخصوص زمین‌های نرم و خاکی انتخاب شده است و کله حفار و ابزار برنده آن بر همین اصل طراحی شده‌اند. در واقع انتخاب Drag & Knife Bit به عنوان ابزار برنده بر همین مبنا بوده است. در ضمن قابلیت چرخش در دو جهت (بنابراین قرینه بودن نسبت به دو جهت چرخش) در این دستگاه لحاظ شده است که این قابلیت به علت لزوم چرخش دستگاه در دو جهت برای جلوگیری از غلطیدن سپر ایجاد شده است.

## ۲-۱۳-۲- نوع دستگاه

چون عمده مسیر تونل‌های متروی شیراز در زیر سطح ایستابی قرار دارد و جنس زمین آن نیز رس و سیلت می‌باشد، بنابراین جبهه‌کار را باید به طریقی حفاظت کرد. با توجه به جنس خاک، قطر تونل‌ها و وضعیت سطح ایستابی، همچنین با توجه به ملاحظات اقتصادی و محدودیت‌های طرح، بهترین گزینه استفاده از دستگاه‌های سپر تعادل فشار خاک معرفی شده است. این نوع دستگاه‌ها بیشترین کاربری را در زمین‌های سست و زیر سطح ایستابی دارند و بیشترین محدوده تغییرات وضعیت زمین‌های سست و خاکی (حتی زمین‌های سنگی) را پوشش می‌دهند. قابل ذکر است دستگاه‌های EPB معمولاً در حفر زمین‌های خاکی توأم با قطعات سنگی محدودیت دارند. چون در این حالت عموماً ابزار برنده آنها بر مبنای خاک طراحی می‌شوند (همانند دستگاه شیراز)، ثانیاً حمل مصالح حفاری شده از داخل نقاله ماریپچی محدودیت اندازه قطعات حفر شده را ایجاد می‌نماید. با توجه به اینکه در مطالعات انجام طرح ساخت تونل‌های متروی شیراز وجود لایه‌ها و یا بولدرهای سنگی در مسیر تونل‌های مورد حفاری با دستگاه حفار منتفی است، بنابراین دستگاه حفار نیز بر همین مبنا ساخته شده و در آن تمهید خاصی جهت حفر زمین‌های سنگی یا دارای بولدرهای سنگی بزرگ دیده نشده است.

فصل سوم

مدل سازی عددی تونل های دوقلوی متروی شیراز  
جهت تعیین حداقل فشار جبهه کار

### ۳-۱- مقدمه

این فصل به مدل سازی عددی تونل های دوقلوی متروی شیراز توسط نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL می پردازد. این نرم افزار یک برنامه کامپیوتری سه بعدی اجزاء محدود می باشد که برای انجام آنالیز تغییر شکل ها و بررسی پایداری انواع مختلف تونل در خاک و سنگ مورد استفاده قرار می گیرد. به منظور آشنایی با این نرم افزار، مختصری در مورد نحوه کارکرد آن و اصول روش اجزاء محدود شرح داده خواهد شد. همچنین با توجه به اهمیت محاسبه فشار جبهه کار، در این فصل به بررسی فشار جبهه کار در تونل های دوقلوی متروی شیراز پرداخته شده است.

### ۳-۲- روش اجزاء محدود

در سال های اخیر، روش اجزاء محدود به یکی از متداول ترین روش های عددی در حل مسایل مختلف مهندسی تبدیل شده است. این روش که در بسیاری از رشته ها کاربرد وسیعی دارد، اولین بار در سال ۱۹۴۰ میلادی در طراحی بدنه هواپیما بکار رفت. برای اولین بار واژه اجزاء محدود در سال ۱۹۵۶ میلادی توسط تورنر<sup>۱</sup> و همکارانش بکار گرفته شد. از آن به بعد افزایش فزاینده ای در مورد مطالب مربوط به این روش به وقوع پیوست [۲۷].

در حالت کلی، هر پدیده طبیعی فیزیکی تابع یک معادله دیفرانسیلی می تواند توسط روش اجزاء محدود مدل شود. مشتق گیری مستقیم معادلات بار-جابجایی تطابق نزدیکی با روش سختی<sup>۲</sup> بررسی سازه های قابی<sup>۳</sup> دارد [۲۷].

سازه قابی شکل، مسأله ای با تعداد محدودی درجه آزادی است. در روش موسوم به روش سختی، رابطه بین نیروها، تغییر مکان ها و چرخش ها در نقاط اتصال یا گره قاب فرمول بندی می شود. به عنوان

<sup>۱</sup> - Turner

<sup>۲</sup> - Stiffness Method

<sup>۳</sup> - Framed Structures

مثال در مورد یک قاب فضایی هر یک از مفصل‌ها شش درجه آزادی دارند که عبارتند از سه تغییر مکان و سه چرخش. اگر قاب تعداد  $n$  مفصل آزاد داشته باشد، تعداد درجات آزادی آن  $6n$  خواهد بود و بنابراین برای تعیین تعداد مجهولات  $6n$  معادله سختی مورد نیاز است. در مقابل این وضعیت، یک جسم دو یا سه بعدی بینهایت نقطه دارد که هر کدام دو یا سه درجه آزادی دارند که مرکب از جابجایی در امتداد دو یا سه محور مورد نظر است. در چنین حالتی، تعداد معادلات سختی نیز بینهایت است و بنابراین نمی‌توان مسأله را با روش‌های معمولی حل کرد. از سوی دیگر، اگر تعداد محدودی گره<sup>۱</sup> انتخاب کنیم که در عین حال تعداد آنها آنقدر باشد که بتوان مسأله را حل کرد، در این صورت مسأله قابل حل است و می‌توان وضعیت تغییر شکل جسم را بطور تقریبی بدست آورد. این بحث در واقع مبانی روش اجزاء محدود را تشکیل می‌دهد [۲۷].

در روش اجزاء محدود، ساختار مورد مطالعه به قطعه‌های کوچکتری تقسیم می‌شود که هر کدام المان<sup>۲</sup> نام دارد. همچنین فرض می‌شود که المان‌ها در نقاط مشخصی که گره نام دارند به یکدیگر متصل می‌شوند. در این گره‌ها، جابجایی‌ها محاسبه می‌شوند. بدین ترتیب جسمی که بینهایت درجه آزادی دارد، با جسمی شبیه‌سازی می‌شود که تعداد درجات آزادی آن دو تا سه برابر تعداد گره‌های فرضی است. واضح است که هر چه تعداد گره‌ها زیادتر باشد، حل مسئله دقیق‌تر و در عین حال مشکل‌تر است. با اعمال تعدادی فرضیات، جابجایی‌ها در هر نقطه در داخل المان به جابجایی گره‌ها مرتبط می‌شوند. در واقع در روش اجزاء محدود، جابجایی‌ها متغیرهای اصلی را تشکیل می‌دهند. با استفاده از میدان جابجایی‌ها در داخل المان، می‌توان کرنش‌ها را محاسبه کرد. با مشخص شدن کرنش‌ها و با توجه به رابطه تنش-کرنش، تنش‌ها محاسبه می‌شوند [۲۸]. جزئیات بیشتر روش اجزاء محدود در پیوست آورده شده است.

### ۳-۳- نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL

نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL یک برنامه کامپیوتری سه‌بعدی اجزاء محدود می‌باشد که برای انجام آنالیز تغییرشکل‌ها و بررسی پایداری انواع مختلف تونل در خاک و سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش ساده ورود اطلاعات که بصورت گرافیکی است، کاربر را به تولید سریع مدل‌های

<sup>۱</sup> - Node

<sup>۲</sup> - Element

پیچیده اجزاء محدود قادر می سازد و خروجی نرم افزار امکان نمایش جزئیات نتایج محاسباتی را فراهم کرده است. این برنامه محاسبات را بصورت کاملاً خودکار انجام می دهد و بر اساس روش های قدرتمند عددی پایه گذاری شده است [۱۲].

این برنامه گزینه هایی مخصوص روش های تونل سازی سپری و NATM<sup>۱</sup> دارد، اما توانایی مدل کردن سایر انواع تونل و موضوعات ژئوتکنیکی را نیز دارا می باشد. این نرم افزار شامل چهار زیرمجموعه برنامه ورودی، برنامه محاسبات، برنامه خروجی و برنامه ترسیم منحنی می باشد.

### ۳-۳-۱- نکات کلی مدل سازی توسط نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL

برای آنالیز سه بعدی یک پروژه، در ابتدا باید یک مدل دوبعدی از مقطع عرضی آن ساخته شود. مدل مقطع عرضی یک ارائه دوبعدی از مسایل واقعی سه بعدی است و شامل نقاط، خطوط و کلاستر<sup>۲</sup> می باشد. یک مدل مقطع عرضی باید تقسیم بندی لایه های متمایز خاک در زیر سطح، موارد ساختمانی، مراحل ساخت و بارگذاری ها را شامل شود. مدل باید به قدر کافی بزرگ انتخاب شود تا تأثیر مرزها بر نتایج مسأله کاهش یابد. سه نوع از اجزاء تشکیل دهنده یک مدل مقطع عرضی در ذیل شرح داده شده است [۱۲]:

**الف- نقاط:** نقاط شکل ابتدا و انتهای خطوط هستند که می توانند برای نشان دادن موقعیت بولت ها، نقاط نیرو، نقاط پایداری و به منظور جداسازی مش های اجزاء محدود مورد استفاده قرار گیرند.

**ب- خطوط:** خطوط برای متمایز کردن فیزیکی مرزهای هندسی، مرزهای مدل، ناپیوستگی های هندسی همانند دیوارها و پوشش ها، جدایی لایه های متمایز خاک و مراحل ساخت مورد استفاده قرار می گیرند. یک خط می تواند شامل چندین کارکرد یا خاصیت باشد.

**ج- کلاستر:** کلاسترها مناطقی هستند که کاملاً توسط خطوط محصور شده اند. نرم افزار PLAXIS بصورت خودکار این نواحی را بر اساس خطوط هندسی ورودی می شناسد. در داخل یک کلاستر، خصوصیات خاک بصورت همگن است. بنابراین کلاسترها می توانند به قسمت هایی از لایه های خاک نسبت داده شوند. رفتارهای مربوط به یک کلاستر برای تمام المان ها در آن کلاستر بکار برده می شوند.

<sup>۱</sup> - New Austrian Tunnelling Method

<sup>۲</sup> - Cluster

بعد از ایجاد یک مدل مقطع عرضی، مش‌بندی دوبعدی انجام می‌شود. یک مش دوبعدی اجزاء محدود از ۶ گره ساخته می‌شود. مثلث‌ها بصورت خودکار و بر اساس ترکیب کلاسترها و خطوط در مدل هندسی بوجود می‌آیند. اگر مش دوبعدی رضایتبخش باشد، بعد سوم بوسیله تعیین مختصات  $Z$  در صفحه عمودی توسعه می‌یابد که برای ساخت مدل سه‌بعدی مورد نیاز می‌باشد. برای ساخت یک مدل سه‌بعدی، دو مؤلفه دیگر نیز مورد نیاز است که در ذیل به شرح آنها پرداخته شده است.

**صفحات  $Z$ <sup>۱</sup>:** صفحات  $Z$ ، صفحات مقطع عرضی عمودی با مختصات  $Z$  متفاوت می‌باشند که برای ساخت مدل سه‌بعدی اجزاء محدود از مدل دوبعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تمامی صفحات  $Z$  یکسان هستند، اما فاصله آنها ممکن است توسط تعریف مختصات  $Z$ های ورودی متغیر باشد. چنانچه فاصله بین دو صفحه  $Z$  متوالی بسیار زیاد باشد، بطور خودکار متوسط فاصله بین صفحات  $Z$  در جریان مراحل ایجاد مش‌بندی سه‌بعدی با عنوان Sub Plane در نظر گرفته می‌شود. از صفحات  $Z$  برای فعال کردن یا بی اثر کردن بارهای نقطه‌ای، بارهای خطی و صفحه‌ای و یا بولت‌ها استفاده می‌شود و می‌توان از آنها برای مدل‌سازی همگرایی در پوشش تونل‌ها بهره جست.

**Slice:** حجم بین دو صفحه مجاور است که می‌توان از آن برای فعال کردن یا بی اثر کردن حجم خاک، صفحات، بارگذاری خطی، بارهای توزیع شده، کرنش حجمی یا فشار آب استفاده کرد. در مدل‌سازی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز هر Slice برابر ۱۰ متر پیشروی در نظر گرفته شده است. همچنین فشار جبهه‌کار در صفحات  $Z$  اعمال خواهد شد. در یک مش سه‌بعدی اجزاء محدود، سه جزء وجود دارد که در ذیل توضیح داده شده است.

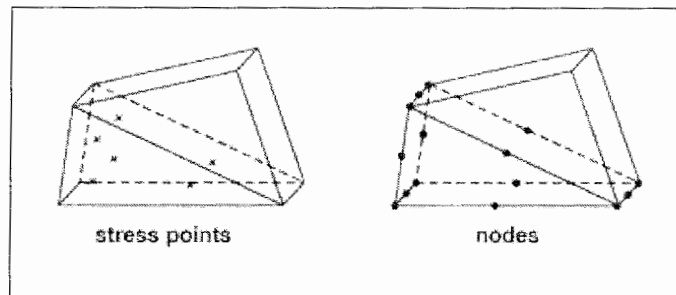
**المان:** در هنگام تولید مش‌ها، Slice‌ها به المان‌های گوه‌ای ۱۵ گره‌ای تقسیم می‌شوند. این المان‌ها از رویه‌های مثلثی ۶ گره‌ای همانند مش‌های دوبعدی و رویه‌های چهارضلعی ۸ گره‌ای در جهت  $Z$  تشکیل شده‌اند. در مجموع المان‌های حجمی که بطور کلی در مدل کردن خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند، همساز المان‌های صفحه‌ای ۸ گره‌ای و المان‌های مشترک ۱۶ گره‌ای هستند که قادرند اثر متقابل رفتار سازه و خاک را مدل کنند.

**گره:** المان‌های گوه‌ای که در برنامه PLAXIS 3D TUNNEL استفاده می‌شوند، شامل ۱۵ گره هستند. المان‌های همجوار بوسیله گره‌های مشترکشان به یکدیگر متصل می‌شوند. در مدت محاسبات

<sup>۱</sup> - Z-Planes

اجزاء محدود، جابجایی های  $U_x$ ،  $U_y$  و  $U_z$  در گره ها محاسبه می شوند. همچنین برای ایجاد منحنی نیرو-جابجایی باید چندین گره را از قبل انتخاب نمود.

**نقاط تنش<sup>۱</sup>:** در محاسبه تنش ها و کرنش ها در نقاط انتگرال گیری گوس، نقاط تنش نسبت به گره ها سریعتر محاسبه می شوند و ترجیح دارند. یک المان گوه ای ۱۵ گره ای، شامل شش نقطه تنش می باشد که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. برای تولید مسیر تنش ها یا ترسیم نمودار تنش - کرنش باید چندین نقطه تنش را از قبل انتخاب نمود [۱۲].



شکل ۳-۱- گره ها و نقاط تنش در المان های گوه ای ۱۵ گره ای [۱۲]

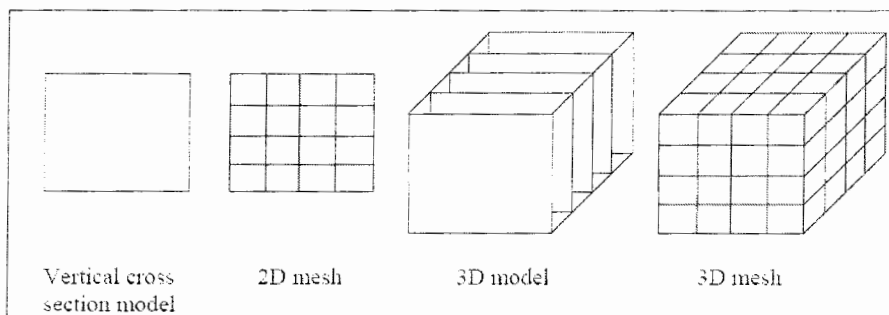
### ۳-۳-۲- اطلاعات ورودی

به منظور انجام یک آنالیز سه بعدی اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL باید یک مدل سه بعدی ایجاد نمود و خواص مواد و مصالح و شرایط مرزی را در آن لحاظ کرد. برای ایجاد یک مدل سه بعدی در ابتدا باید یک مدل از مقطع عرضی در صفحه X-Y ساخته شود که این مدل ترکیبی از نقاط، خطوط و سایر اجزاء می باشد. بعد از ساخت مدل مقطع عرضی یا مدل دوبعدی، مش بندی دوبعدی اجزاء محدود برای این مدل انجام می شود. سپس مدل سه بعدی توسط مشخص نمودن مختصات مربوط به جهت Z در جهت عمود بر مدل دوبعدی ساخته می شود. مدل سه بعدی از صفحات مساوی و موازی در جهت Z و Slice ها تشکیل می شود. همانطور که در بالا ذکر شد یک Slice به عنوان حجم بین دو صفحه متوالی Z تعریف می شود. مدل سه بعدی توسط مش بندی دوبعدی در جهت Z بوجود خواهد آمد. پس از مش بندی سه بعدی، نرم افزار اجازه تغییر هندسی در جهت Z را نخواهد داد. به هر حال پس از مش بندی و در هنگام تعریف مراحل محاسبات می توان

<sup>۱</sup> - Stress Point



بارگذاری‌ها و هندسه مدل را در صفحات  $Z$  و  $Slice$ ها فعال و یا غیرفعال کرد. در شکل ۳-۲ ایجاد مدل سه‌بعدی و مش‌بندی اجزاء محدود نشان داده شده است.

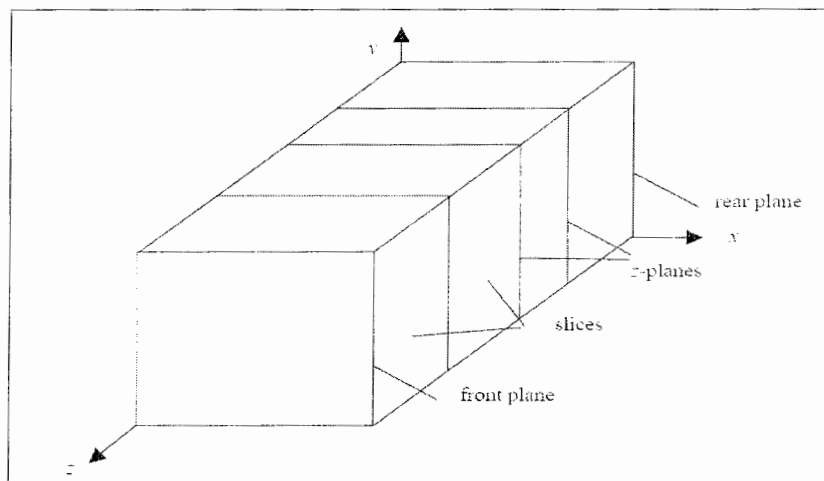


شکل ۳-۲- ایجاد مدل سه‌بعدی و مش‌بندی اجزاء محدود [۱۲]

### ۳-۳-۳- موضوعات هندسی

ایجاد مدل سه‌بعدی اجزاء محدود با ایجاد یک مدل مقطع عرضی عمودی آغاز می‌شود. مدل مقطع عرضی عمودی نشان‌دهنده مقطع عرضی عمودی اصلی مسأله می‌باشد که شامل تمام موضوعاتی است که در هر سطح مقطع از مدل سه‌بعدی وجود دارند؛ به عنوان مثال اگر یک دیوار فقط در یک قسمت از مدل سه‌بعدی وجود داشته باشد، باید در مدل مقطع عرضی دوبعدی نشان داده شود. یک مدل مقطع عرضی شامل نقاط، خطوط و کلاسترها می‌باشد. علاوه بر این اجزاء اصلی، موضوعات ساختمانی یا شرایط خاص را می‌توان با هدف شبیه‌سازی لاینینگ تونل، دیواره‌ها، صفحات، عکس‌العمل بین سازه- خاک و بارها به مدل مقطع عرضی اضافه کرد.

بعد از ایجاد مقطع عرضی باید خصوصیات مواد و مصالح ساخته شده و به اجزاء هندسی متناظر ارجاع داده شوند. بعد از ایجاد کامل مدل مقطع عرضی و ارجاع خصوصیات مواد و مصالح به اجزاء آن، می‌توان مش‌های اجزاء محدود را تولید کرد. در ابتدا مش‌بندی دوبعدی انجام می‌گیرد. در صورت رضایت‌بخش بودن مش‌بندی دوبعدی، توسعه مدل در جهت  $Z$  توسط تعریف مختصات واحد  $Z$  برای هر صفحه عمودی که برای ایجاد مدل سه‌بعدی لازم است، انجام می‌گیرد. در شکل ۳-۳ تعریف صفحات  $Z$  و  $Slice$ ها نشان داده شده است.



شکل ۳-۳- تعریف صفحات Z و Slice ها [۱۲]

### ۳-۳-۱- صفحات<sup>۱</sup>

صفحات موضوعات هندسی هستند که برای مدل‌سازی سازه‌های شبه‌دو بعدی نازک با یک سختی پیچشی معین (یا مقاومت خمشی) و با یک صلیبیت نرمال در یک مدل سه‌بعدی استفاده می‌شوند. در این نرم‌افزار صفحات برای شبیه‌سازی تأثیر دیواره‌ها، صفحات، نگهداری یا پوشش‌هایی که در جهت Z توسعه یافته‌اند، استفاده می‌شوند. مثال‌هایی از سازه‌های ژئوتکنیکی که در آن صفحات کاربرد دارند، در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است.

### ۳-۳-۲- ژئوگریدها<sup>۲</sup>

ژئوگریدها سازه‌های شبه‌دو بعدی نازک با یک سختی نرمال هستند که سختی خمشی ندارند. ژئوگریدها فقط می‌توانند نیروهای کششی را تحمل کنند و تحمل نیروهای فشاری را ندارند (به عنوان مثال می‌توان کابل‌های مهار را نام برد). در این نرم‌افزار از ژئوگریدها غالباً برای مدل‌سازی تقویت خاک استفاده می‌شود.

### ۳-۳-۳- صفحات مشترک<sup>۳</sup>

صفحات مشترک برای مدل‌سازی عکس‌العمل بین سازه و خاک موسوم به عکس‌العمل سازه- خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین می‌توان صفحات مشترک را همراه خطوط هندسی

<sup>۱</sup> - Plates

<sup>۲</sup> - Geogrids

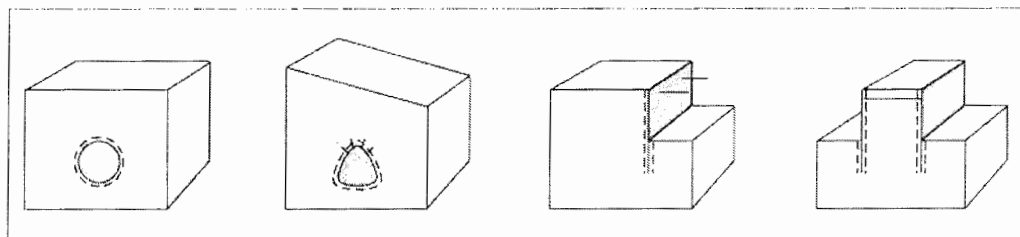
<sup>۳</sup> - Interfaces

و تونل‌ها برای شبیه‌سازی صفحات ناتراوا استفاده کرد. در شکل ۳-۴ نمونه‌هایی از ساختارهای ژئوتکنیکی که شامل صفحات مشترک می‌باشند، نشان داده شده است.

یک مورد مشخص از کاربرد صفحات مشترک را می‌توان در مدل‌سازی عکس‌العمل بین پوشش تونل و خاک اطراف آن دانست که این صفحه مشترک واسط بین یک جسم نرم و یک جسم بسیار سخت است. عکس‌العمل بین این دو بوسیله انتخاب مقادیر مناسب برای فاکتور کاهش نیرو در صفحات مشترک که با نام  $R_{inter}$  نشان داده می‌شود، صورت می‌گیرد. این فاکتور نسبت مقاومت سطح مشترک (اصطکاک دیواره و چسبندگی) به مقاومت خاک (زاویه اصطکاک و چسبندگی) می‌باشد.

### ۳-۳-۴- تونل‌ها

تونل‌ها موضوعات هندسی هستند که برای ایجاد مدل مقطع عرضی تونل‌های دایره‌ای و غیردایره‌ای بکار می‌روند. مقطع عرضی یک تونل ترکیبی از خطوط و قوس‌ها می‌باشد که می‌توان بصورت دلخواه صفحات مشترک و پوششی (لاینینگ و یا سایر ابزار نگهداری تونل) را برای آن انتخاب کرد.



شکل ۳-۴- موضوعات ژئوتکنیکی که در آنها صفحات، بولت‌ها و صفحات مشترک کاربرد دارند [۱۲]

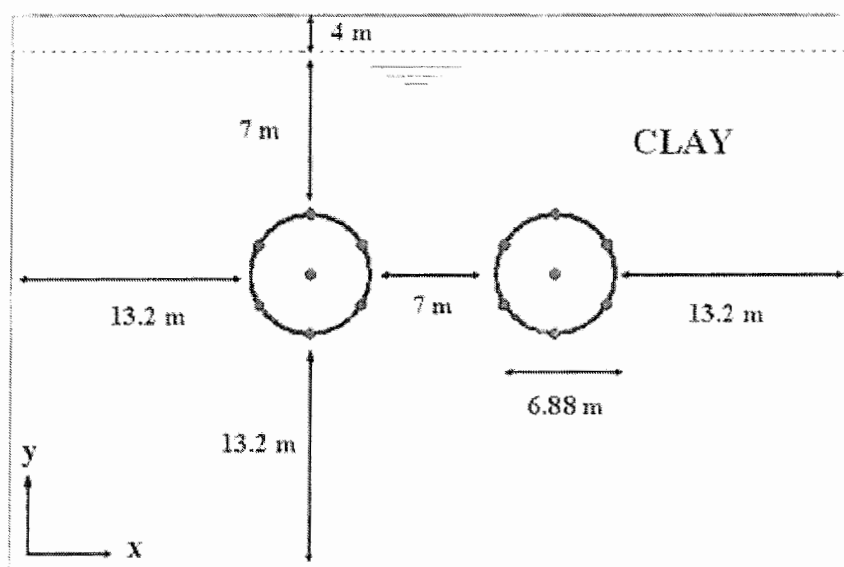
### ۳-۴- مدل‌سازی عددی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز

مدل‌سازی عددی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز پس از تعیین هندسه مقطع عرضی و خواص مواد و مصالح، توسط نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL انجام خواهد شد.

#### ۳-۴-۱- هندسه تونل‌ها و خواص مواد و مصالح مسیر و موضوعات ساختمانی

حفاری تونل‌ها توسط دو دستگاه EPB Shield انجام می‌شود که این دستگاه‌ها ۸/۶ متر طول و ۶/۸۶ متر قطر دارند. در منطقه مورد مطالعه که حد فاصل ایستگاه شماره یک و ایستگاه شماره دو

مسیر خط یک می‌باشد، سطح ایستایی در عمق ۴ متری سطح زمین ثبت شده است [۲۹]. بنابراین با توجه به عمق حفاری تونل‌ها در این منطقه، تاج تونل در ۷ متری زیر سطح آب‌های آزاد و در ۱۱ متری زیر سطح زمین قرار دارد. مدل ایجاد شده ۴۷ متر عرض، ۵۰۰ متر طول در جهت Z و ۳۱ متر ارتفاع دارد. برای اجتناب از تأثیر شرایط مرزی، مرزهای مدل از سمت چپ و راست و همچنین از طرف پایین تقریباً دو برابر قطر تونل‌ها در نظر گرفته شده‌اند که مدل به اندازه کافی بزرگ می‌باشد. در شکل ۳-۵ هندسه مقطع عرضی تونل نشان داده شده است.

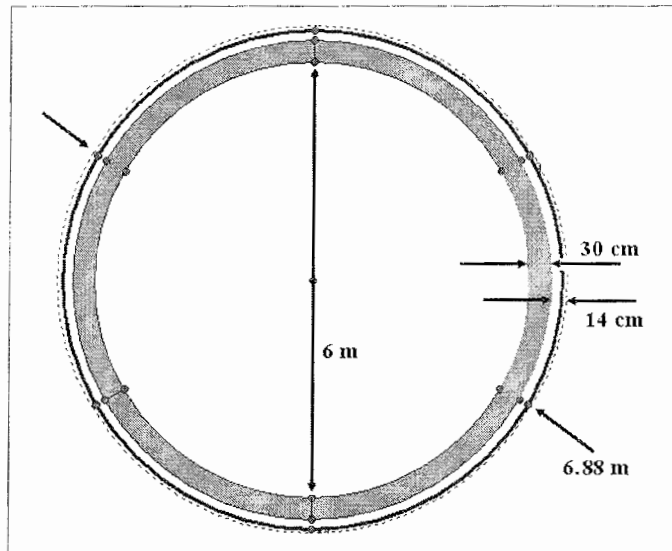


شکل ۳-۵- هندسه مقطع عرضی تونل

همانطور که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است قطر حفاری تونل‌ها برابر ۶/۸۸ متر می‌باشد. برای نگهداری تونل‌ها از سگمنت‌های پیش‌ساخته بتنی با ضخامت ۳۰ سانتیمتر استفاده می‌شود. از شعاع ۳/۴۴ متر حفاری، ۳ متر شعاع نهایی تونل پس از پوشش، ۳۰ سانتیمتر قطر سگمنت‌های بتنی و ۱۴ سانتیمتر تزریق دوغاب پشت سگمنت‌های بتنی می‌باشد. دوغاب تزریق شده در پشت سگمنت‌های بتنی نقش نگهداری تونل را بر عهده ندارد و وظیفه آن آب‌بند کردن تونل می‌باشد. با توجه به اینکه مدل‌سازی این دوغاب تزریقی به علت ضخامت بسیار کم توسط نرم‌افزار ممکن نیست، از مدل‌سازی آن صرف نظر خواهد شد.

همانطور که در فصل یک بیان شد، عمده خاک مسیر از جنس رس با خاصیت خمیری پایین و در برخی موارد همراه با میان‌لایه‌های ماسه‌ای و سیلتی می‌باشد. با توجه به اینکه جنس غالب

خاک‌های مسیر رس می‌باشد، از خصوصیات رس برای مدل‌سازی خاک‌های مسیر استفاده خواهد شد. در جداول ۱-۳، ۲-۳ و ۳-۳ خواص مواد و مصالح پوشش بتنی، دستگاه EPB و خاک‌های مسیر تونل آورده شده است که در طی مدل‌سازی از این خواص استفاده خواهد شد.



شکل ۳-۶- قطر حفاری، ضخامت لاینینگ و دوغاب تزریقی پشت سگمنت‌های بتنی

برای مدل‌سازی رفتار خاک از مدل معروف موهر - کولمب به عنوان اولین تقریب از رفتار واقعی خاک استفاده خواهد شد. این مدل الاستیک - کاملاً پلاستیک احتیاج به پنج پارامتر اساسی ورودی دارد [۱۲] : مدول یانگ (E)، ضریب پواسون (ν)، چسبندگی (c)، زاویه اصطکاک داخلی (φ) و زاویه اتساع (Ψ).

جدول ۱-۳- خواص مواد و مصالح سگمنت‌های بتنی [۲۹]

واحد	مقدار	پارامتر
-	الاستیک	نوع رفتار
kN/m	$7/80 \times 10^5$	سختی نرمال (EA)
kN <sup>2</sup> /m	$5/85 \times 10^3$	سختی خمشی (EI)
m	۰/۳۰	ضخامت معادل (d)
kN/m/m	۷/۲۰	وزن (w)
-	۰/۲۰	ضریب پواسون (ν)

جدول ۲-۳- خواص مواد و مصالح دستگاه های EPB [۲۹]

واحد	مقدار	پارامتر
-	الاستیک	نوع رفتار
kN/m	$۸/۲۰ \times ۱۰^۶$	سختی نرمال (EA)
kNm <sup>۲</sup> /m	$۸/۳۸ \times ۱۰^۴$	سختی خمشی (EI)
m	۰/۳۵	ضخامت معادل (d)
kN/m/m	۳۸/۱۵	وزن (w)
-	۰	ضریب پواسون (ν)

جدول ۳-۳- خواص مواد و مصالح خاک های مسیر منطقه مورد مطالعه [۲۹]

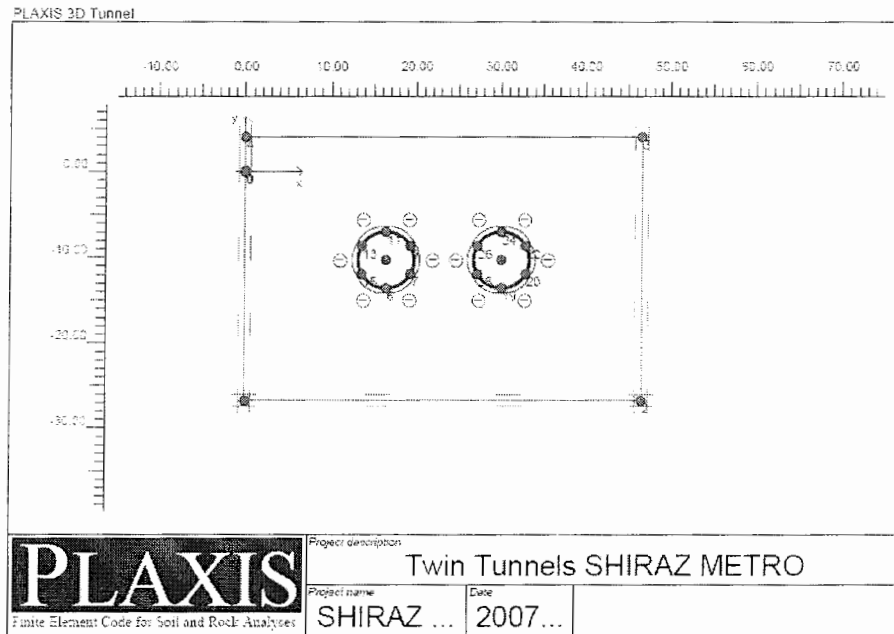
واحد	مقدار	پارامتر
-	موهر و کولمب	مدل
kN/m <sup>۳</sup>	۱۶/۵	وزن مخصوص بالای سطح ایستایی ( $\gamma_{unsat}$ )
kN/m <sup>۳</sup>	۱۹/۵	وزن مخصوص زیر سطح ایستایی ( $\gamma_{sat}$ )
kN/m <sup>۲</sup>	$۳ \times ۱۰^۴$	مدول یانگ (E)
-	۰/۳۵	ضریب پواسون (ν)
kN/m <sup>۲</sup>	۲/۵	چسبندگی (C)
°	۳۲	زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ )
°	۰	زاویه اعوجاج ( $\psi$ )
-	۱	ضریب کاهش نیرو در سطوح مشترک ( $R_{inter}$ )
-	۰/۶۳	ضریب جانبی فشار زمین ( $K_0$ ) ( $k = \sigma_h / \sigma_v$ )

### ۳-۴-۲- مدل سازی تونل ها

اولین قدم در مدل سازی تونل ها توسط نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL ساخت یک پروژه جدید و ایجاد مدل مقطع عرضی می باشد که این مدل بصورت دوبعدی خواهد بود. پس از ساخت مدل مقطع عرضی و ایجاد شرایط مرزی، خواص مواد و مصالح به خاک و موضوعات هندسی مربوط ارجاع داده شده و سپس مش بندی دوبعدی انجام می شود. بعد از طی این مراحل، مدل قابلیت گسترش در بعد سوم یا جهت Z را دارا می باشد.

همانطور که در شکل ۳-۷ مشاهده می شود، مدل مقطع عرضی با ابعاد واقعی ساخته شده است. برای اجتناب از تأثیر شرایط مرزی، فاصله دیواره تونل ها با دیواره مدل دو برابر قطر تونل ها در نظر

گرفته شده است. برای ایجاد شرایط مرزی، شرایط تکیه گاه غلتکی افقی در کف، شرایط تکیه گاه غلتکی عمودی در جهات عمودی و شرایط گیرداری چرخشی برای خط تونل ها در صفحه تقارن ایجاد شده است. ارجاع خواص مواد و مصالح در این مرحله صورت می گیرد.

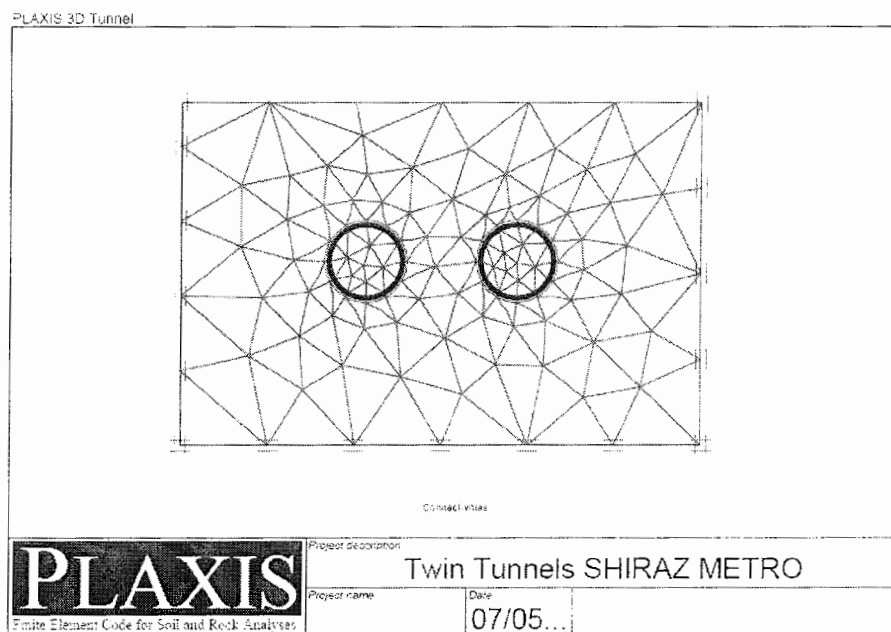


شکل ۳-۷- مدل مقطع عرضی تونل های دوقلوی متروی شیراز

با توجه به تفاوت خصوصیات مکانیکی خاک و سازه، چسبندگی و اصطکاک که اصطلاحاً خواص نیرو نامیده می شوند در ناحیه برهم کنش بین خاک و سازه نسبت به خاک های مجاور کمتر می باشند. این کاهش با استفاده از یک صفحه مشترک کاهنده چسبندگی و اصطکاک مدل خواهد شد. همانطور که صفحات مشترک در مدل مقطع عرضی دوبعدی وجود دارند، در تمامی Slice های مدل سه بعدی نیز وجود خواهند داشت. به هر حال صفحه مشترک کاهنده اصطکاک و چسبندگی فقط در Slice هایی استفاده می شود که تونل در آن قسمت موجود باشد. صفحه مشترک کاهنده نیرو ضخامت صفر دارد، اما برای نشان دادن اتصال بین مش های گوناگون در مدل مقطع عرضی دارای یک ضخامت معین قراردادی می باشد.

پس از ایجاد مدل مقطع عرضی و ایجاد شرایط مرزی، تولید مش های دوبعدی صورت می گیرد. در این نرم افزار مش بندی بصورت خودکار انجام می شود. در مدل سازی تونل های دوقلوی متروی شیراز

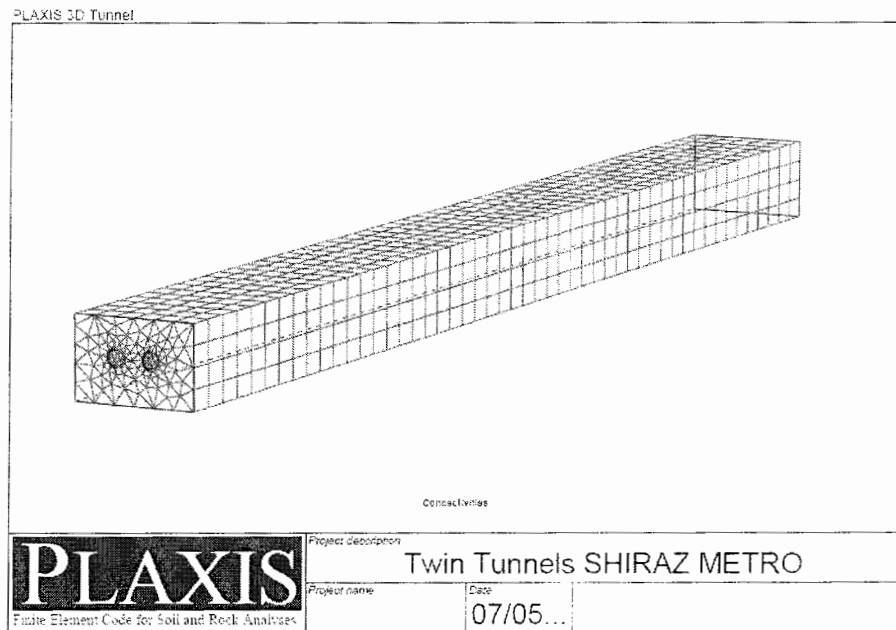
با توجه به طول زیاد مدل در جهت Z که برابر ۵۰۰ متر می‌باشد، از مش‌های درشت استفاده شده است. در شکل ۳-۸ مش‌های تولید شده اجزاء محدود نشان داده شده است.



شکل ۳-۸- مش‌بندی دوبعدی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز

پس از مش‌بندی دوبعدی، مدل در جهت Z امتداد خواهد یافت. امتداد مدل در جهت Z توسط تعریف صفحات Z انجام خواهد شد. تعداد پنجاه صفحه Z با فواصل ۱۰ متری از یکدیگر تعریف شده و مش‌های سه‌بعدی تولید خواهند شد. در شکل ۳-۹ مش‌بندی سه‌بعدی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز نشان داده شده است. پس از مش‌بندی سه‌بعدی باید سطح ایستابی و تنش‌های اولیه را در مدل وارد کرد. بدین منظور با توجه به اطلاعات قبلی سطح ایستابی در ۴ متری زیر سطح قرار داده می‌شود. بعد از تعیین سطح ایستابی و محاسبه فشار منفذی، محاسبه تنش‌های اولیه انجام می‌شود. در شکل ۳-۱۰ محاسبه فشار منفذی و در شکل ۳-۱۱ محاسبه تنش‌های برجا در تونل‌های دوقلو نشان داده شده است.

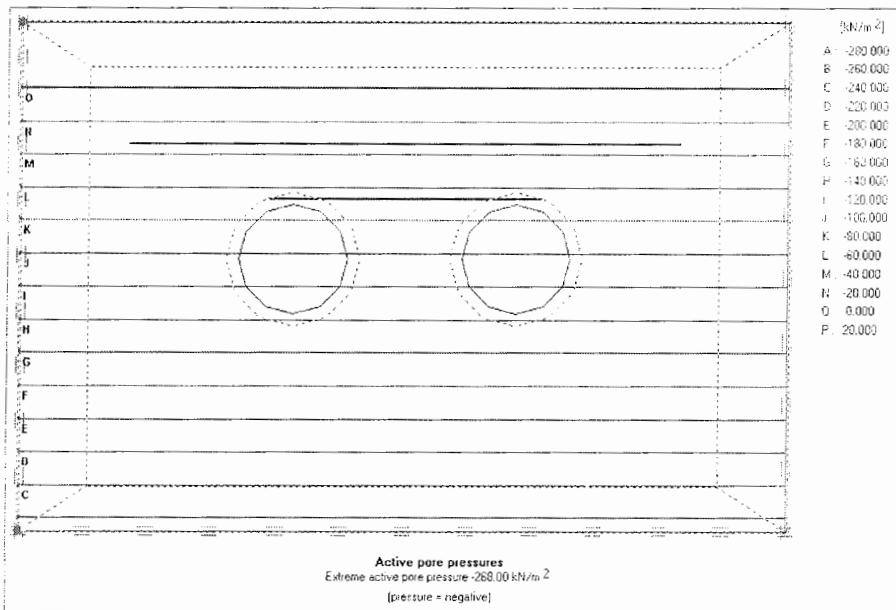




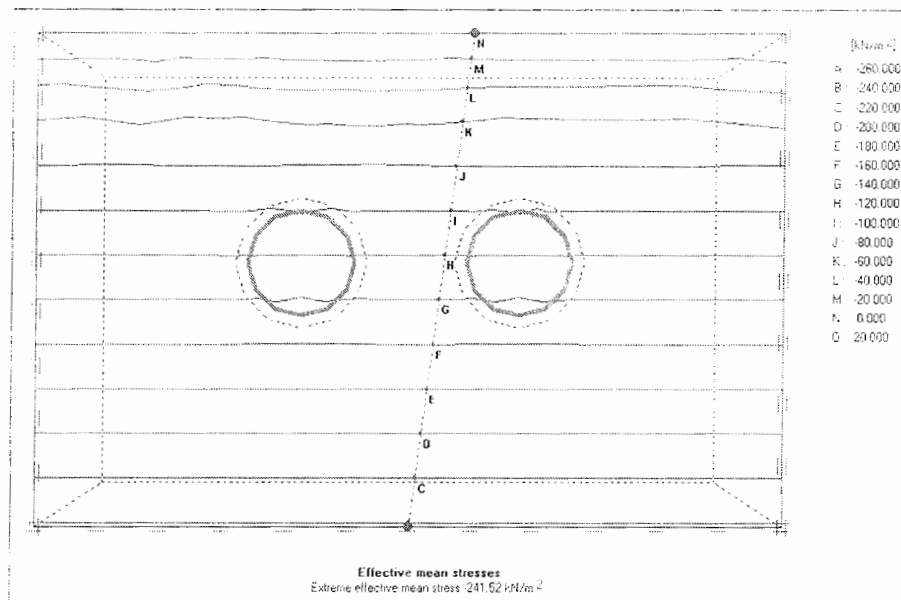
شکل ۳-۹- مش بندی سه‌بعدی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز

### ۳-۵- محاسبه فشار جبهه‌کار

یکی از اقدامات اصلی تونل‌سازی در زمین‌های نرم، نگهداری کامل خاک برای به حداقل رسانیدن تغییرشکل‌ها در بالای تونل در حین ساخت و پس از ساخت است. این مسأله بویژه در محیط‌های شهری برای جلوگیری از آسیب رسیدن به سازه‌های سطحی حایز اهمیت زیادی است. در شرایطی که آب زیرزمینی وجود دارد، باید از جریان آب به سوی جبهه‌کار تونل جلوگیری شود؛ چرا که ممکن است باعث ناپایداری در جبهه‌کار و متعاقباً نشست سطح شود.



شکل ۳-۱۰- محاسبه فشار منفذی در تونل‌های دوقلوی متروی شیراز



شکل ۳-۱۱- محاسبه تنش‌های اولیه در تونل‌های دوقلوی متروی شیراز

همانطور که در فصل قبل ذکر شد، هنگامیکه از ماشین EPB برای حفر تونل استفاده می‌شود، نگهداری شعاعی و ضد آب ابتدا بوسیله سپر و سپس بلافاصله توسط سگمنت‌های بتنی ایجاد می‌گردد. اما در جبهه‌کار تونل، نگهداری مکانیکی همراه با حفر ممکن نیست و از راه‌های غیر مستقیمی در نگهداری جبهه‌کار استفاده می‌شود. بدین منظور از دوغاب تحت فشار در سپر دوغابی و از ترکیب خاک حفاری شده به همراه افزودنی‌های مختلف در سپر EPB استفاده می‌شود [۳۰]. به

فشار مورد نیاز برای نگهداری جبهه‌کار، فشار جبهه‌کار گفته می‌شود. این فشار باید بر طبق خصوصیات خاک، عمق تونل و فشار آب بین یک مقدار حداقل و حداکثر محدود باشد. حداقل فشار جبهه‌کار بر اساس نیاز به جبران فشار آبی که به جبهه‌کار وارد می‌شود تعیین می‌گردد. در صورتی که فشار جبهه‌کار بسیار کم باشد، سبب ریزش جبهه‌کار به درون تونل خواهد شد. همچنین در صورتی که فشار جبهه‌کار بسیار زیاد باشد، ممکن است سبب خروج ناگهانی جبهه‌کار به خارج شود که در یک زمان کم تغییر شکل‌های بزرگی در سطح زمین بوجود خواهد آمد که اصطلاحاً گسیختگی فعال روی خواهد داد.

### ۳-۵-۱- تحلیل پایداری جبهه‌کار تونل

در طی سی سال گذشته روش‌های مختلفی برای آنالیز پایداری جبهه‌کار تونل‌های حفر شده در زمین‌های نرم پیشنهاد شده است. مبنای بیشتر روش‌ها، تونل‌سازی با مقطع دایره‌ای می‌باشد که در خاک همگن حفر گردیده است. پارامترهای اصلی حاکم در بررسی پایداری جبهه‌کار تونل در بیشتر روش‌ها عبارتند از:

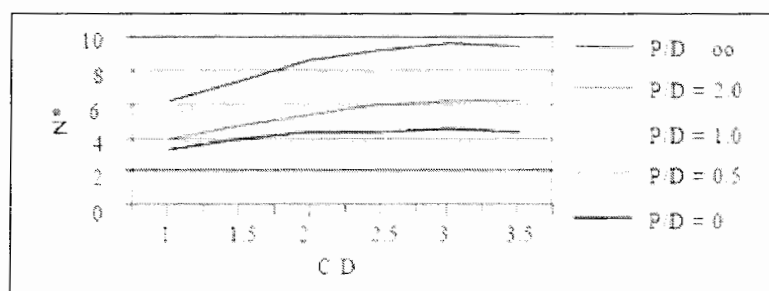
- ♦ قطر تونل (D)
  - ♦ فاصله زمین تا طاق تونل (C)
  - ♦ وزن مخصوص خاک ( $\gamma$ )
  - ♦ سربار ناشی از سازه‌های موجود در سطح زمین ( $\sigma_s$ )
  - ♦ فشار اعمال شده در سطح جبهه‌کار تونل در صورت نیاز ( $\sigma_T$ )
  - ♦ مقاومت برشی خاک ( $C_u$ ) و یا ( $C', \phi'$ )
- معیار پایداری جبهه‌کار تونل در خاک‌های ریزدانه رسی با ضریب اضافه بار<sup>۱</sup> ( $N$ ) نشان داده شده و بصورت ذیل تعریف می‌شود [۳۱].

$$N = \frac{\sigma_s + \gamma H - \sigma_T}{C_u} \quad (1-3)$$

که در این رابطه H فاصله سطح زمین تا محور تونل می‌باشد.

<sup>۱</sup> - Over load Factor

بر اساس مطالعات انجام شده توسط میر<sup>۱</sup> و کیمورا<sup>۲</sup> مقدار حدی ضریب اضافه بار ( $N^*$ ) نسبت به عبارات  $P/D$  و  $C/D$  متغیر است (در این عبارت  $P$  طول بدون پوشش در پشت جبهه‌کار است که در تونل‌سازی سپری به دلیل اینکه هیچ قسمت از تونل بدون پوشش نیست، مقدار  $P$  صفر می‌باشد). شکل ۳-۱۲ مقادیر حدی ضریب اضافه بار ( $N^*$ ) را نسبت به  $C/D$  برای مقادیر مختلف  $P/D$  نشان می‌دهد. در تونل‌هایی که ضریب اضافه بار از مقدار حدی آن (شکل ۳-۱۲) بیشتر باشد، جبهه‌کار تونل ریزشی است و احتیاج به نگهداری دارد. محاسبه مقدار این فشار با انتخاب مناسب پارامترهای مربوطه در نقاط مختلف مسیر و بر اساس راه‌حل‌های ارائه شده امکان‌پذیر است.



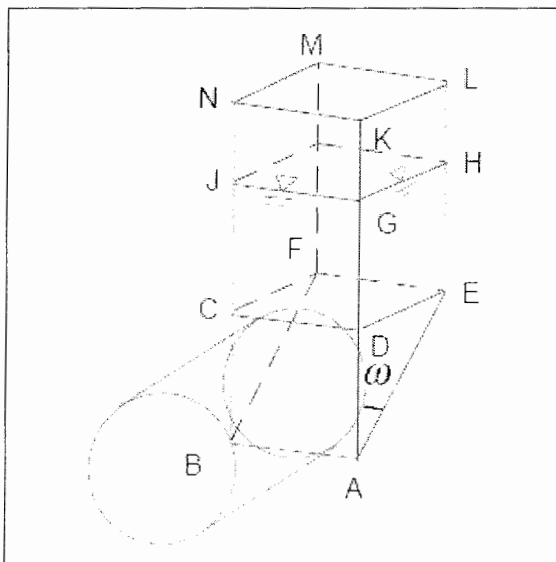
شکل ۳-۱۲- مقدار حدی ضریب اضافه بار [۱۴]

### ۳-۵-۲- محاسبه فشار جبهه‌کار به روش تعادل حدی گوه

اساس روش تعادل گوه، آنالیز تعادل حدی یک جسم خاکی گوه‌ای شکل در جبهه‌کار تونل است که بوسیله یک حجم خاکی مطابق شکل ۳-۱۳ بارگذاری شده است. این گوه و جسم سیلو شکل با شکست‌های مشاهده شده در واقعیت شباهت نزدیکی دارد. در مدل گوه، باری که بر روی گوه ناشی از روباره اعمال می‌شود کمتر از بار وزن مرده روباره است و با افزایش عمق این اثر بیشتر ظاهر خواهد شد. این پدیده که اثر قوسی خاک نامیده می‌شود، بدلیل چسبندگی و اصطکاک خاک با خاک اطراف سیلو پدید می‌آید [۳۰].

<sup>۱</sup> - Mair

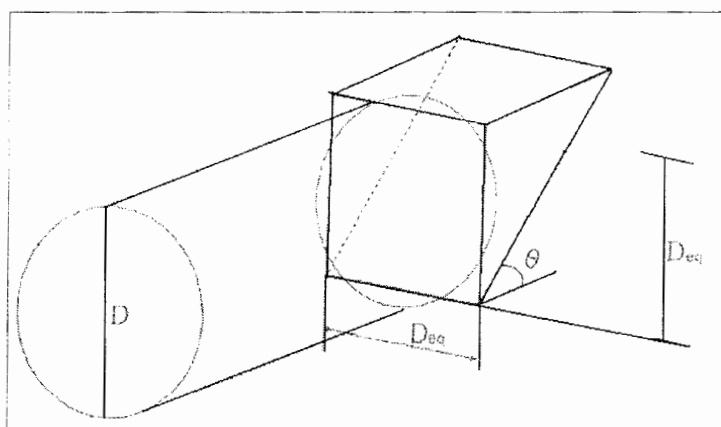
<sup>۲</sup> - Kimura



شکل ۳-۱۳- گوه بارگذاری شده بوسیله سیلوی خاک [۳۰]

### ۳-۵-۳- آنالیز گوه

به منظور محاسبه فشار جبهه کار می توان از آنالیز گوه بر اساس تئوری تعادل حدی استفاده کرد، با این فرض که یک سطح شکست بصورت دلخواه در جلوی جبهه کار ایجاد می شود. مکانیسم ساده شکست در حالت سه بعدی مطابق شکل ۳-۱۴ می باشد.



شکل ۳-۱۴- مکانیسم شکست در آنالیز گوه [۳۲]

شکل ۳-۱۵ نیروهای اعمالی بر گوه را نشان می دهد. نیروی برشی بر روی سطح لغزش جانبی ( $T_1$ ) و نیروی برشی بر روی سطح لغزش عمودی ( $T_2$ ) به ترتیب بر اساس روابط ۳-۲ و ۳-۳ محاسبه می شوند [۳۲].

$$T_1 = C_1 + N_1' \tan \Phi' = C' \frac{D_{eq}^2}{\sin \theta} + N_1' \tan \Phi' \quad (۲-۳)$$

$$T_2 = C_2 + N_2' \tan \Phi' = c' \frac{D_{eq}^2}{2 \tan \theta} + k_0 \frac{\gamma' D_{eq}^3}{6 \tan \theta} \tan \Phi' \quad (۳-۳)$$

که در این روابط:

$D_{eq}$ : قطر معادل تونل

$\gamma'$ : وزن مخصوص غوطه وری خاک

$C'$ : چسبندگی خاک

$\Phi'$ : زاویه اصطکاک داخلی

$\theta$ : زاویه شکست

$K_0$ : ضریب فشار خاک در حالت سکون

در این روش به منظور محاسبه  $K_0$  از رابطه Jaky's استفاده شده است [۳۲]:

$$K_0 = 1 - \sin \Phi' \quad (۴-۳)$$

با نوشتن روابط تعادل در جهت عمودی، نیروی نرمال وارد بر سطح جانبی لغزش،  $N_1'$  طبق رابطه ۳-۵ بدست می آید [۳۲]:

$$N_1' = (W' - C_1' \sin \theta - 2T_2 + S.F_z) \frac{\cos \Phi'}{\cos(\theta - \Phi')} \quad (۵-۳)$$

که در این رابطه:

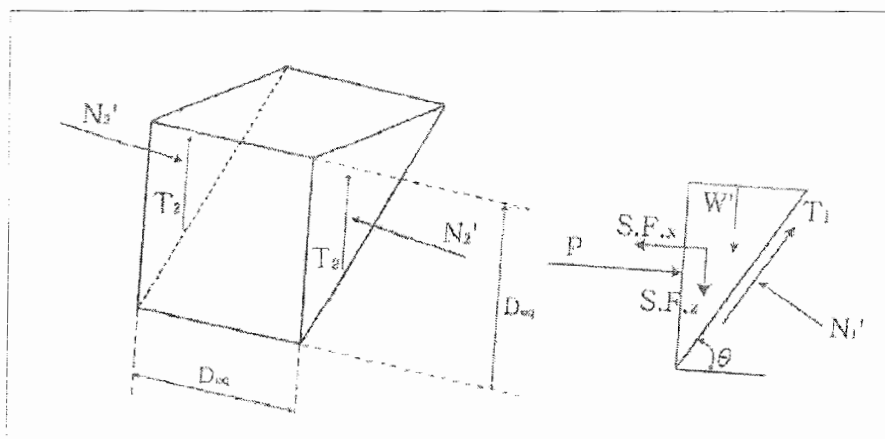
$W'$ : وزن غوطه وری گوه

$S.F$ : نیروی نشت آب

با نوشتن رابطه تعادل نیروها در جهت افقی می توان نیروی لازم جهت نگهداری جبهه کار تونل و سپس فشار نگهداری بوسیله تقسیم این نیرو بر سطح اعمال نیرو بدست آورد (رابطه ۳-۶) [۳۲]:

$$\sigma_T = \left[ \frac{N_1'}{\cos \Phi'} \sin(\theta - \Phi') - C_1' \cos \theta + S.F_x \right] / D_{eq}^2 \quad (۶-۳)$$

حداقل فشار نگهداری مورد نیاز، به روش سعی و خطا با تغییر دادن مقدار زاویه  $\theta$  برای محاسبه ماکزیمم  $\sigma_T$  بدست می آید.



شکل ۳-۱۵- نیروهای عمل کننده بر روی گوه در جبهه‌کار [۳۲]

### ۳-۵-۳-۱- تنش‌های قائم در بالای گوه

یکی از مهمترین اثراتی که باید در هنگام استفاده از مدل گوه در محاسبه مطمئن فشار نگهداری حداقل وارد شود، اثر قوس خاک است. آنچه که از نتایج آزمایش‌های سانتریفوژ انجام شده توسط چمبون<sup>۱</sup> (۱۹۹۴) مشاهده می‌شود، این است که کل حجم خاک بالای گوه بصورت برابر روی گوه اعمال نمی‌شود، بلکه بخشی از آن به خاک‌های مجاور منتقل می‌شود [۳۳]. اثر بار عمل کننده بر روی قسمت بالای گوه،  $G_s$  کمتر از کل وزن خاک بالای گوه است. اثر قوسی توسط ترزاقی در آزمایش در پیچه مشاهده و بکار گرفته شده است. ترزاقی تکه باریکی از خاک را همچنانکه در شکل ۳-۱۶ دیده می‌شود، مدل کرد. این باریکه بوسیله تنش  $\sigma'_{v,a}$  که ناشی از وزن مؤثر خاک بالای آن است ( $\gamma'z$ ) بارگذاری می‌شود. در طول جوانب این باریکه سیلو شکل نیروی ناشی از تنش برشی،  $\tau$  اعمال می‌شود، که بخشی از بار را به خاک مجاور منتقل می‌کند. معادله تعادل برای این باریکه به عرض  $2a$  و به طول واحد بدین صورت است [۳۴]:

$$2a\sigma'_{v,a} + 2a\gamma' dz - 2\tau dz = 2a(\sigma'_{v,a} + d\sigma'_{v,a}) \quad (7-3)$$

با فرض:

$$\tau = C' + K\sigma'_{v,a} \tan \Phi' \quad (8-3)$$

خواهیم داشت:

$$\frac{d\sigma'_{v,a}}{dz} = \gamma' - \frac{C' + K\sigma'_{v,a} \tan \Phi'}{a} \quad (9-3)$$

<sup>۱</sup> - Chambon

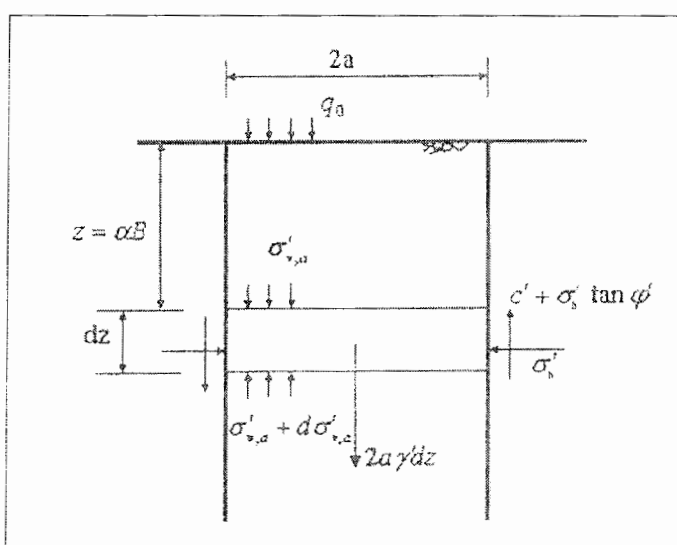
با اعمال شرایط مرزی  $\sigma'_{v,a} = q_0$  برای  $z = 0$ :

$$\sigma'_{v,a} = \frac{a\gamma' - C'}{K \tan \Phi^{(i)}} \left[ 1 - e^{-k \tan \Phi \frac{z_L}{a}} \right] + q_0 e^{-k \tan \Phi \frac{z_L}{a}} \quad (10-3)$$

که در این روابط:

$q_0$ : بار اعمال شده بر روی سطح زمین

$Z_L$ : عمق لایه‌ای که در آن تنش محاسبه می‌شود.



شکل ۳-۱۶- قوس خاکی در مدل ترزاقی [۳۴]

### ۳-۵-۴- محاسبه حداقل فشار مورد نیاز برای نگهداری جبهه‌کارهای تونل‌های

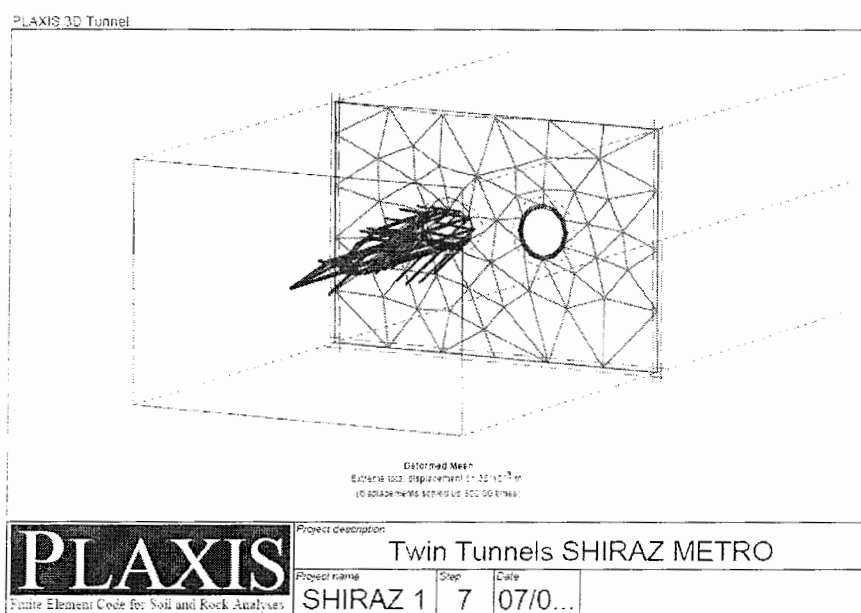
#### دوقلوی متروی شیراز

در عمل فشار جبهه‌کار بین یک مقدار کمینه و بیشینه تعیین می‌شود. فشاری که در عملیات استفاده می‌شود نباید از این محدوده کمتر یا بیشتر باشد. زیرا استفاده از فشار کمتر منجر به ریزش غیر قابل کنترل خاک به داخل اتاقک حفاری خواهد شد که در نتیجه ممکن است نشست‌های بزرگی در سطح زمین رخ دهد. استفاده از فشار بیشتر نیز ممکن است منجر به جابجایی خاک به سمت بالا و آسیب رسیدن به سازه‌های سطحی شود؛ همچنین باعث استهلاک بیشتر ماشین و فشرده شدن زیاد خاک درون اتاقک حفاری و در نتیجه ایجاد قوس خاکی در جلوی نقاله ماریپیچی در سیستم فشار تعادلی زمین می‌شود. میزان واقعی فشار نگهداری در جبهه‌کار بستگی به موارد متعددی از جمله

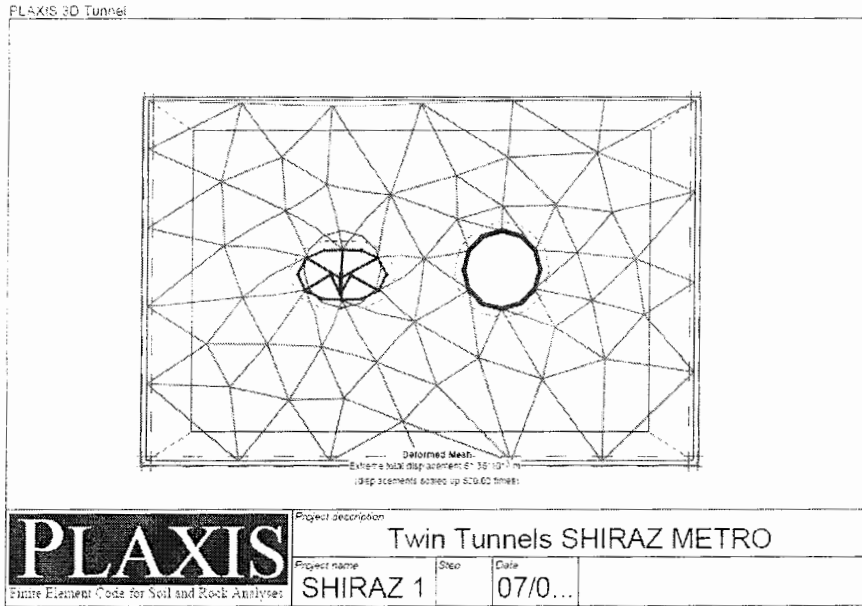


مشخصات خاک مسیر تونل، شرایط آب‌های زیرزمینی، روش حفر، اندازه قطر تونل و ارتفاع روباره دارد [۳۵].

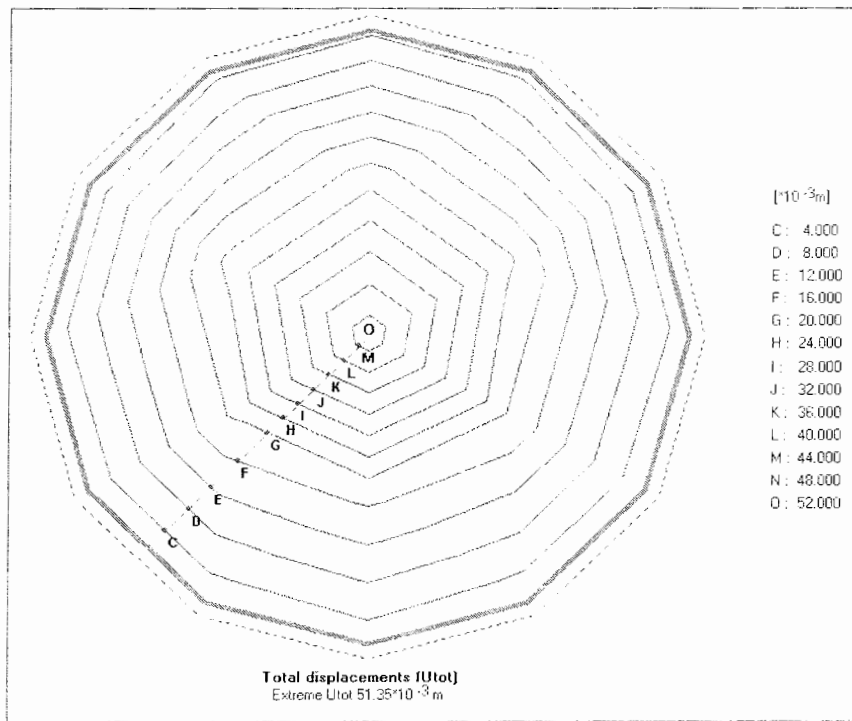
در این قسمت حداقل فشاری که برای پایدارسازی جبهه‌کار تونل‌های دوقلوی متروی شیراز نیاز است، توسط نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL بدست آمده است. به منظور یافتن حداقل فشار مورد نیاز برای نگهداری جبهه‌کارها توسط این نرم‌افزار، ابتدا یک مقدار تقریبی وارد می‌شود. در طول پروسه اجرای محاسبات توسط نرم‌افزار، از این فشار تقریبی تا مرحله ریزش جبهه‌کار کاسته شده و در مرحله ریزش فشار ثبت خواهد شد. فشار بدست آمده حداقل فشار جهت نگهداری جبهه‌کارها می‌باشد. با کاهش فشار در جبهه‌کار، زمین به داخل سپر حرکت خواهد کرد که اصطلاحاً گسیختگی فعال روی می‌دهد. این ریزش جبهه‌کار به درون تونل توسط فشار آب مدل‌سازی می‌شود که در شکل ۳-۱۷ نمایش داده شده است. همچنین مش‌های تغییر شکل یافته در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳-۱۹ مشاهده می‌شود، هنگام ریزش جبهه‌کار، بیشترین جابجایی‌ها در مرکز تونل است که با حرکت به سمت سطح زمین از شدت جابجایی‌ها کاسته می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۳-۲۰ مشخص می‌شود نقاط c و o جابجایی افقی برابر دارند که جهت جابجایی‌های افقی به سمت مرکز و داخل تونل می‌باشد.



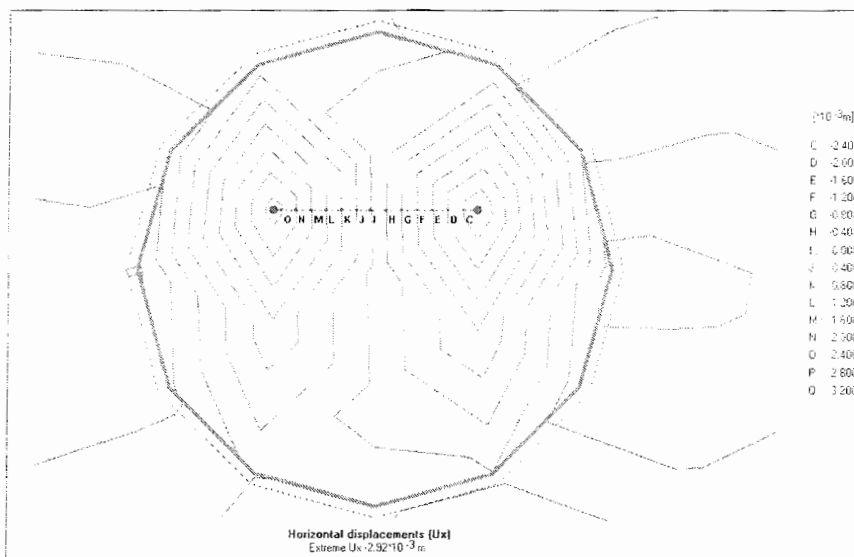
شکل ۳-۱۷- مدل‌سازی ریزش جبهه‌کار به درون تونل توسط فشار آب



شکل ۳-۱۸- مش‌های تغییر شکل یافته در اثر ریزش جبهه کار به درون تونل



شکل ۳-۱۹- جابجایی‌های کل در اثر ریزش جبهه کار به داخل تونل



شکل ۳-۲۰- جابجایی‌های افقی در جهت X در اثر ریزش جبهه‌کار به داخل تونل

با توجه به اینکه حفاری منطقه مورد مطالعه به پایان رسیده است و فشارهای استفاده شده جهت پایدار نگهداشتن جبهه‌کارها ثبت گردیده است، به جای استفاده از مقادیر تقریبی، از مقادیر واقعی برای محاسبه حداقل فشار جبهه‌کارها استفاده شده است. همانطور که در جدول ۳-۴ نشان داده شده است، فشار جبهه‌کار ثبت شده در رینگ شماره ۳۰ نگهداری که از مترای ۲۱۸/۹۲ تا ۲۲۰/۳۱ متر امتداد یافته است، در تاج تونل برابر ۱۱۰ کیلونیوتن بر متر مربع و در کف تونل برابر ۱۷۰ کیلونیوتن بر متر مربع می‌باشد.

جدول ۳-۴- فشار استفاده شده برای نگهداری جبهه‌کارها در منطقه مورد مطالعه [۲۹]

RING NO	chainage	Face Pressure(bar)			Cutter Head		Screw				
		From (m)	Top	Center	Bottom	Speed (rpm)	Torque (KNm)	Speed (rpm)	Torque (KNm)	Pressure(bar)	
										Bottom	Top
30	218.926	1.1	1.2	1.7	1.8	1075	15	11	10.2	2.6	
31	220.31	1	1.2	1.8	1.35	945	10	18	10.2	2.1	
32	221.724	1.1	1	1.3	1.6	1008	17	21	10.2	2.3	
33	223.133	1.2	1.2	1.8	1.39	841	12	13	10.2	1.9	
34	224.504	1	1	1.5	1.89	1164	20	22	10.2	2.6	
35	225.895	1.1	1	1.5	1.9	1053	14	26	10.2	2	
36	227.313	1	1	1.6	1.6	906	12	18	10.2	1.9	
37	228.724	1.1	1.1	1.6	1.7	1081	14	15	10.2	1.8	
38	230.121	1.1	1.1	1.6	1.26	855	10	19	10.2	1.9	
39	231.35	1.1	1	1.4	1.32	768	10	21	10.2	1.9	
40	232.881	1	1.1	1.5	1.32	782	9	19	10.2	1.9	

نتایج بدست آمده از مدل‌سازی در جدول ۳-۵ نشان داده شده‌اند. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود حداقل فشار برای نگهداری جبهه‌کار در تاج تونل برابر  $۸۴/۴۸$  و در کف تونل برابر  $۱۳۰/۵۶$  کیلونیوتن بر متر مربع بدست آمده است.

جدول ۳-۵- نتایج بدست آمده در محاسبه حداقل فشار جبهه‌کارهای تونل‌های دوقلوی متروی شیراز

حداقل فشار مورد نیاز ( $\text{kN/m}^2$ )	ضریب محاسبه شده توسط مدل‌سازی عددی	مقدار تقریبی ( $\text{kN/m}^2$ )	عمق (m)	
$۰/۷۶۸ * ۱۱۰ = ۸۴/۴۸$	$۰/۷۸۶$	۱۱۰	۱۱	تاج تونل
$۰/۷۶۸ * ۱۷۰ = ۱۳۰/۵۶$	$۰/۷۸۶$	۱۷۰	$۱۷/۸۶$	کف تونل

با مقایسه مقادیر بدست آمده توسط نرم‌افزار و مقادیر بکار برده شده مشخص می‌شود که اختلاف فشار بدست آمده توسط مدل‌سازی عددی و فشار بکار برده شده زیاد است که عوامل ذیل برای علت اختلاف این دو فشار قابل ذکر هستند:

- ♦ فشار بدست آمده توسط مدل‌سازی عددی، حداقل فشار لازم است که فشار جبهه‌کار نباید از این مقدار کمتر شود. در صورتیکه فشار ثبت شده فشار متوسطی است که بکار برده شده است.
- ♦ در هنگام حفاری، با توجه به شرایط دستگاه و همچنین شرایط ژئوتکنیکی محلی فشار توسط اپراتور تنظیم می‌شود و استفاده از یک فشار از پیش معین شده غیر ممکن است. با مدل‌سازی عددی فقط می‌توان یک رنج تغییرات برای فشار جبهه‌کار بدست آورد.
- ♦ منطقه مورد مطالعه اولین فاز و اولین قسمت حفاری می‌باشد؛ با توجه به عدم تجربه اپراتور جهت تنظیم فشار، از فشاری بیشتر استفاده شده است که این امر در حفاری‌های بعدی اصلاح گردیده است. به عنوان مثال فشار استفاده شده حداقل ایستگاه دوم تا چهارم قابل توجه است که در جدول ۳-۶ نشان داده شده است.

جدول ۳-۶- فشار استفاده شده برای نگهداری جبهه کارها حدفاصل ایستگاه دوم تا چهارم [۲۹]

RING NO	chainage (m)	Face Pressure(bar)			Cutter Head		Screw			
		Top	Center	Bottom	Speed (rpm)	Torque (KNm)	Speed (rpm)	Torque (KNm)	Pressure(bar)	
									Bottom	Top
560	1049.63	0.4	0.6	1.1	1.2	1319	6	20	1.3	0.7
561	1050.392	0.9	1	1.5	1.2	978	4	34	1.9	1.2
562	1051.56	0.9	1.1	1.5	1.2	1825	13	32	2.5	1
563	1053.176	0.9	1	1.5	1.2	1752	9	25	2.4	1.1
564	1056.633	1	1	1.5	1.2	1203	7	17	1.5	0.8
565	1056.019	0.8	1	1.4	1.2	1878	13	19	1.3	0.7
566	1057.4	0.9	1.2	1.5	1.2	1781	12	22	2	0.6
567	1058.833	0.8	0.9	1.6	1.2	1738	13	23	2.1	0.7
568	1060.213	1	1	1.4	1.2	1703	13	13	2.1	0.8
569	1061.636	1	1	1.4	1.2	1195	9	20	1.7	0.9
570	1063.007	1	0.9	1.1	1.2	1366	13	14	1.5	0.6

همانطور که در بالا ذکر گردید حداقل فشار برای نگهداری جبهه کار در تاج تونل برابر ۸۴/۴۸ و در کف تونل برابر ۱۳۰/۵۶ کیلونیوتن بر متر مربع بدست آمده است. فشار بدست آمده توسط مدلسازی عددی مطابقت مناسبی با فشار استفاده شده در جبهه کارهای تونل های دوقلوی متروی شیراز دارد که تأییدی بر صحت روش مورد استفاده می باشد و نشان می دهد از این روش می توان برای سایر مناطق استفاده کرد. در فصل بعد فاصله بهینه بین جبهه کارها توسط مدلسازی عددی تعیین خواهد شد.

## فصل چهارم

تعیین فاصله بهینه جبهه کارها  
در تونل های دوقلوی موازی

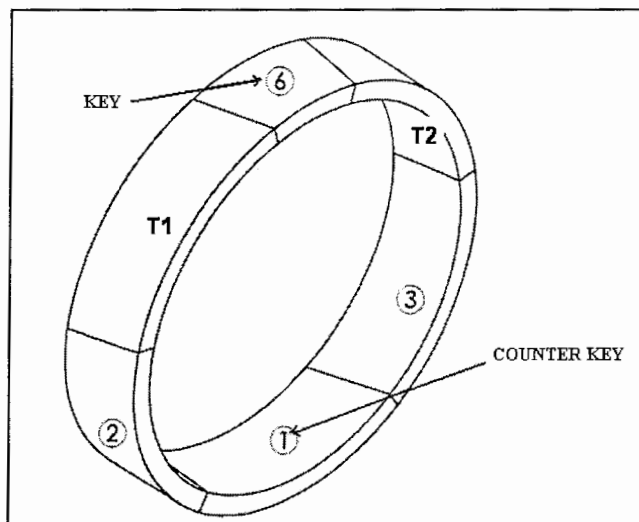
#### ۴-۱- مقدمه

در این فصل فاصله بهینه جبهه کارها در تونل‌های دوقلوی متروی شهر شیراز تعیین می‌شود. با توجه به جنس زمین، همانند فصل قبل از نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL جهت مدل‌سازی تونل‌ها استفاده خواهد شد. بدین منظور تونل‌ها با فاصله‌ای معین از یکدیگر قرار گرفته و در طی مراحل متوالی به یکدیگر نزدیک می‌شوند. در هر مرحله جابجایی‌ها، تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در نقطه‌ای خاص اندازه‌گیری خواهند شد. با بررسی نمودارهای جابجایی - نیرو و سایر نمودارهای بدست آمده، فاصله‌ای که کمترین میزان جابجایی را در نقاط مشخص شده ایجاد نماید، به عنوان فاصله بهینه مطرح خواهد شد.

#### ۴-۲- مدل‌سازی عددی

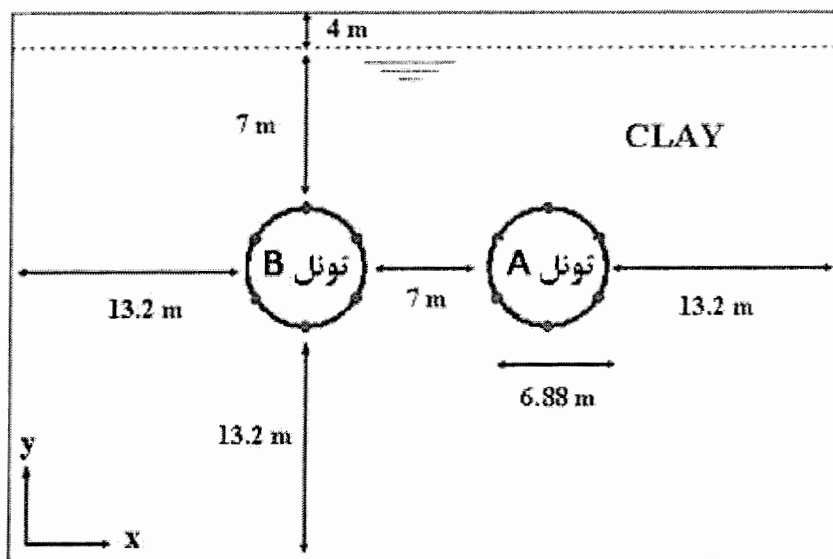
همانطور که در فصل اول مطرح گردید، با توجه به فاصله کم عرضی تونل‌ها و همچنین پیشروی نسبتاً سریع حفاری روزانه ۱۴ متر برای هر تونل و اینکه تونل‌ها در زمینی از جنس رس اشباع حفر می‌شوند، تعیین فاصله بهینه بین جبهه کارها به منظور کاهش تنش‌ها و به تعادل رساندن محیط اطراف فضای حفاری ضروری به نظر می‌رسد. همانطور که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است، پوشش تونل‌های دوقلوی متروی شیراز که با استفاده از سپر حفر می‌شوند، توسط سگمنت‌های حلقوی بتنی پیش‌ساخته ایجاد می‌شود که این سگمنت‌ها برای شکل دادن پوشش تونل در درون ماشین EPB به یکدیگر متصل می‌شوند. در هنگام نصب سگمنت‌های بتنی برای ایجاد پوشش تونل، ماشین EPB ساکن می‌ماند. پس از اینکه یک حلقه از پوشش تونل بصورت کامل نصب شد، حفاری شروع شده و تا زمان ایجاد فضای لازم برای نصب حلقه بعدی از پوشش ادامه خواهد یافت. در نتیجه می‌توان پروسه ساخت تونل را به مراحل ساخت با طول یک حلقه از سگمنت که برابر ۱/۴ متر می‌باشد، تقسیم کرد. اما با توجه به طول زیاد مدل که در جهت Z برابر ۵۰۰ متر در نظر گرفته شده و عدم توانایی نرم‌افزار

در مدل‌سازی زیاد صفحات  $Z$ ، تعداد ۵۰ قطعه ۱۰ متری در جهت  $Z$  در نظر گرفته شده و در هر مرحله حفاری یکی از این قطعات مدل خواهد شد.



شکل ۴-۱- نگهداری تونل‌های دوقلوی متروی شیراز توسط سگمنت‌های بتنی پیش‌ساخته [۲۹]

مقطع عرضی هندسه تونل مشابه شکل ۴-۲ می‌باشد. مدل دارای ۴۷ متر عرض، ۳۱ متر ارتفاع و ۵۰۰ متر طول در جهت  $Z$  می‌باشد. سطح ایستایی در ۴ متری زیر سطح قرار دارد.



شکل ۴-۲- مقطع عرضی هندسه تونل‌های دوقلوی متروی شیراز



## ۴-۲-۱- مراحل ساختمانی

برای سهولت در مدل‌سازی و تحلیل نتایج، مطابق شکل ۴-۲ تونل سمت راست با نام A و تونل سمت چپ با نام B نامگذاری شده است. برای اجتناب از تأثیر مرزها بر نتایج و فاصله کافی بین جبهه کار تونل‌ها، جبهه کار تونل A در متر ۳۰۰ و جبهه کار تونل B در متر ۵۰ متر قرار داده شده‌اند. مراحل ساختمانی در جداول ۴-۱ تا ۴-۵ نشان داده شده‌اند. همانطور که در این جداول مشاهده می‌شود، تمامی مراحل ساخت تونل در ۴۲ فاز مدل‌سازی شده است که ممکن است هر کدام از فازها چندین مرحله را شامل گردد. در اولین فاز، تونل A تا طول ۳۰۰ متر و تونل B تا طول ۵۰ متر حفاری شده‌اند و در فاز دوم حداقل فشار جبهه کار بدست آمده است. در فازهای بعد تونل B در هر فاز ۱۰ متر حفاری شده است. نگهداری تونل‌ها در ۱۰ متر ابتدایی که جبهه کار در آن قرار دارد، توسط المان‌های صفحه‌ای با خواص مواد و مصالح TBM (جدول ۳-۲) و بقیه طول تونل توسط المان‌های صفحه‌ای با خواص مواد و مصالح سگمنت‌های بتنی (جدول ۳-۳) مدل‌سازی شده است. در فاز ۲۷، جبهه کار تونل B به جبهه کار تونل A می‌رسد و در آخرین فاز که فاز ۴۲ می‌باشد، جبهه کار تونل B، ۱۵۰ متر جلوتر از جبهه کار تونل A و در متر ۴۵۰ متر قرار می‌گیرد.

جدول ۴-۱- مراحل ساختمانی مدل‌سازی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز

Plaxis - Finite Element Code for Soil and Rock Analyses							
Project description	: Twin Tunnels of SHIRAZ METRO					Date : 2007/05/30	
User name	:						
Project name	: Final Model 1.PL3					Page : 1	
Output	: Calculations list						
Identification	Phase No.	Start from	Calculation	Loading input	First	Last	Water
Initial phase	0	N/A	N/A	N/A			0
<Phase 1> A 0 - 300 & B 0 - 50	1	0	Plastic	Staged construction	1	1	1
<Phase 2> Face pressure	2	1	Plastic	Total multipliers	2	7	1
<Phase 3> B 50 - 60	3	1	Plastic	Staged construction	8	10	3
<Phase 4> B 60 - 70	4	3	Plastic	Staged construction	11	13	4
<Phase 5> B 70 - 80	5	4	Plastic	Staged construction	14	16	5
<Phase 6> B 80 - 90	6	5	Plastic	Staged construction	17	19	6
<Phase 7> B 90 - 100	7	6	Plastic	Staged construction	20	20	7
<Phase 8> B 100 - 110	8	7	Plastic	Staged construction	21	23	8
<Phase 9> B 110 - 120	9	8	Plastic	Staged construction	24	26	9

جدول ۴-۲- ادامه مراحل ساختمانی مدل‌سازی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز

Plaxis - Finite Element Code for Soil and Rock Analyses							
Project description : Twin Tunnels of SHIRAZ METRO						Date : 2007 /05/30	
User name :							
Project name : Final Model 1.PL3							
Output : Calculations list						Page : 2	
Identification	Phase No.	Start from	Calculation	Loading input	First	Last	Water
<Phase 10> B 120 - 130	10	9	Plastic	Staged construction	27	27	10
<Phase 11> B 130 - 140	11	10	Plastic	Staged construction	28	30	11
<Phase 12> B 140 - 150	12	11	Plastic	Staged construction	31	33	12
<Phase 13> B 150 - 160	13	12	Plastic	Staged construction	34	34	13
<Phase 14> B 160 - 170	14	13	Plastic	Staged construction	35	37	14
<Phase 15> B 170 - 180	15	14	Plastic	Staged construction	38	40	15
<Phase 16> B 180 - 190	16	15	Plastic	Staged construction	41	43	16
<Phase 17> B 190 - 200	17	16	Plastic	Staged construction	44	44	17
<Phase 18> B 200 - 210	18	17	Plastic	Staged construction	45	47	18
<Phase 19> B 210 - 220	19	18	Plastic	Staged construction	48	50	19

جدول ۴-۳- ادامه مراحل ساختمانی مدل‌سازی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز

Plaxis - Finite Element Code for Soil and Rock Analyses							
Project description : Twin Tunnels of SHIRAZ METRO						Date : 2007 /05/30	
User name :							
Project name : Final Model 1.PL3							
Output : Calculations list						Page : 3	
Identification	Phase No.	Start from	Calculation	Loading input	First	Last	Water
<Phase 20> B 220 - 230	20	19	Plastic	Staged construction	51	53	20
<Phase 21> B 230 - 240	21	20	Plastic	Staged construction	54	54	21
<Phase 22> B 240 - 250	22	21	Plastic	Staged construction	55	55	22
<Phase 23> B 250 - 260	23	22	Plastic	Staged construction	56	58	23
<Phase 24> B 260 - 270	24	23	Plastic	Staged construction	59	61	24
<Phase 25> B 270 - 280	25	24	Plastic	Staged construction	62	62	25
<Phase 26> B 280 - 290	26	25	Plastic	Staged construction	63	65	26
<Phase 27> B 290 - 300	27	26	Plastic	Staged construction	66	68	27
<Phase 28> B 300 - 310	28	27	Plastic	Staged construction	69	71	28
<Phase 29> B 310 - 320	29	28	Plastic	Staged construction	72	74	29

جدول ۴-۴- ادامه مراحل ساختمانی مدل‌سازی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز

Plaxis - Finite Element Code for Soil and Rock Analyses							
Project description : Twin Tunnels of SHIRAZ METRO						Date : 2007/05/30	
User name :							
Project name : Final Model 1.PL3							
Output : Calculations list						Page : 4	
Identification	Phase No.	Start from	Calculation	Loading input	First	Last	Water
<Phase 30> B 320 - 330	30	29	Plastic	Staged construction	75	77	30
<Phase 31> B 330 - 340	31	30	Plastic	Staged construction	78	78	31
<Phase 32> B 340 - 350	32	31	Plastic	Staged construction	79	81	32
<Phase 33> B 350 - 360	33	32	Plastic	Staged construction	82	84	33
<Phase 34> B 360 - 370	34	33	Plastic	Staged construction	85	85	34
<Phase 35> B 370 - 380	35	34	Plastic	Staged construction	86	86	35
<Phase 36> B 380 - 390	36	35	Plastic	Staged construction	87	87	36
<Phase 37> B 390 - 400	37	36	Plastic	Staged construction	88	90	37
<Phase 38> B 400 - 410	38	37	Plastic	Staged construction	91	93	38
<Phase 39> B 410 - 420	39	38	Plastic	Staged construction	94	94	39

جدول ۴-۵- ادامه مراحل ساختمانی مدل‌سازی تونل‌های دوقلوی متروی شیراز

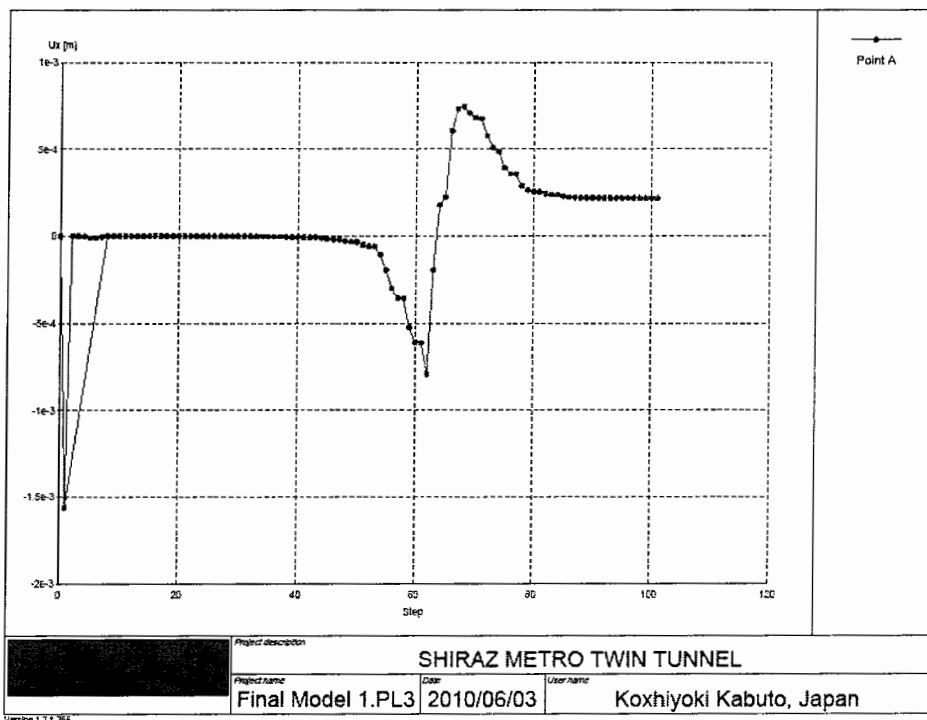
Plaxis - Finite Element Code for Soil and Rock Analyses							
Project description : Twin Tunnels of SHIRAZ METRO						Date : 2007/05/30	
User name :							
Project name : Final Model 1.PL3							
Output : Calculations list						Page : 5	
Identification	Phase No.	Start from	Calculation	Loading input	First	Last	Water
<Phase 40> B 420 - 430	40	39	Plastic	Staged construction	95	97	40
<Phase 41> B 430 - 440	41	40	Plastic	Staged construction	98	100	41
<Phase 42> B 440 - 450	42	41	Plastic	Staged construction	101	101	42

#### ۴-۲-۲- محاسبات

از گره‌ها برای بررسی میزان جابجایی‌ها و از نقاط تنش برای بررسی میزان تنش‌ها و کرنش‌ها استفاده می‌شود [۱۲]. همانطور که در شکل‌های ۴-۳ و ۴-۴ نشان داده شده است، برای بررسی تأثیر حفر تونل B بر تونل همجواریش یعنی تونل A، قبل از انجام محاسبات چندین نقطه در نزدیکی تونل A انتخاب شده است. بمنظور بررسی جابجایی‌ها چندین گره و برای تعیین میزان تنش‌ها و کرنش‌ها نیز چندین نقطه تنش انتخاب می‌شود.

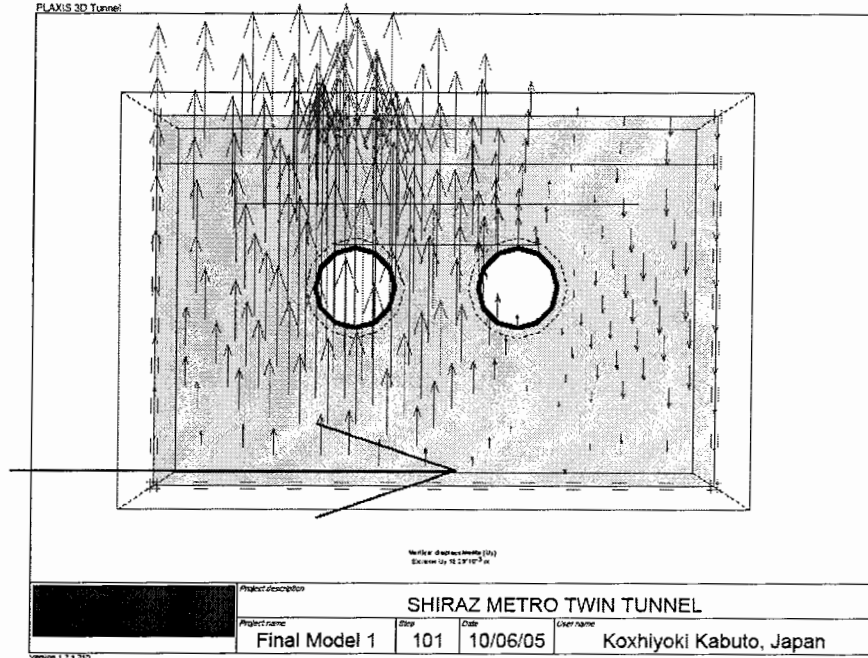
### ۴-۳- بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

برای بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و یافتن فاصله بهینه جبهه کارها، از نمودارهای مرحله - جابجایی که نشان‌دهنده میزان جابجایی‌های ناشی از حفر تونل B در جوار تونل A می‌باشد، استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود و با توجه به جداول ۴-۱ تا ۴-۵، در مرحله صفر که در اولین فاز ساخت تونل‌ها قرار دارد، یک جابجایی به سمت منفی  $X$  مشاهده می‌شود که با شروع مرحله ۲ این جابجایی دوباره به سمت صفر میل می‌کند. مراحل ۲ تا ۷ در فاز دوم تونل‌سازی قرار دارند که در این فاز حداقل فشار جبهه کار برآورد شده است. با توجه به اینکه فاز سوم تونل‌سازی نیز از فاز اول شروع شده است، تغییرات جابجایی در مرحله ۸ نیز از مرحله ۱ آغاز شده است. از مرحله ۸ که تونل B در متر ۶۰ متر قرار دارد تا مرحله ۴۷ که تونل B در متر ۲۱۰ متر قرار دارد، تغییرات جابجایی ثابت می‌باشد. از مرحله ۴۸ که تونل B در متر ۲۲۰ متر قرار دارد تا مرحله ۶۲ که این تونل در متر ۲۸۰ متر قرار گرفته است، نقطه A به سمت منفی  $X$  جابجا شده که میزان جابجایی کمتر از یک میلی‌متر می‌باشد. در مراحل ۶۲ تا ۶۸ جابجایی نقطه A به سمت قسمت مثبت محور  $X$ ها بوده است.

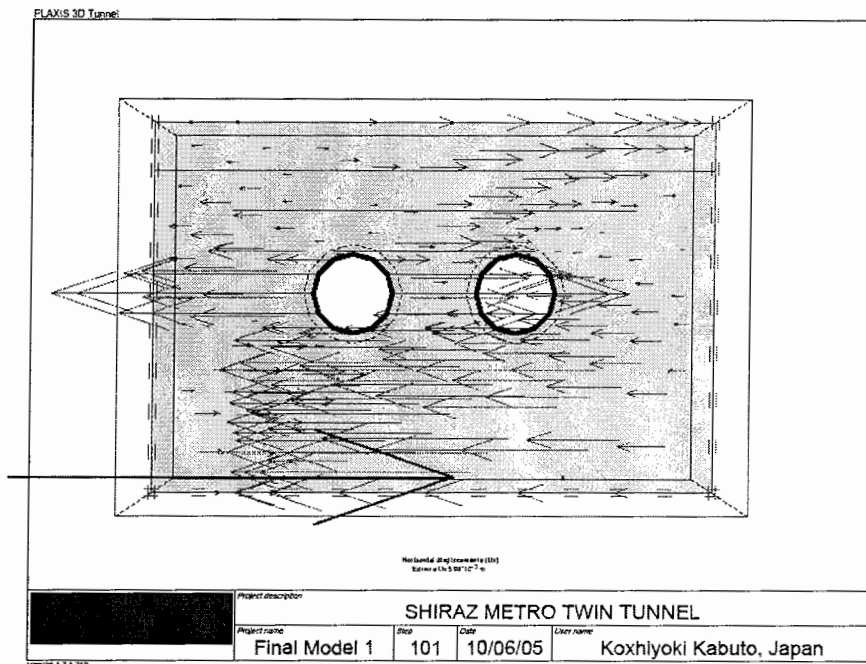


شکل ۴-۵- تغییرات جابجایی نقطه A در جهت X در اثر حفر تونل B

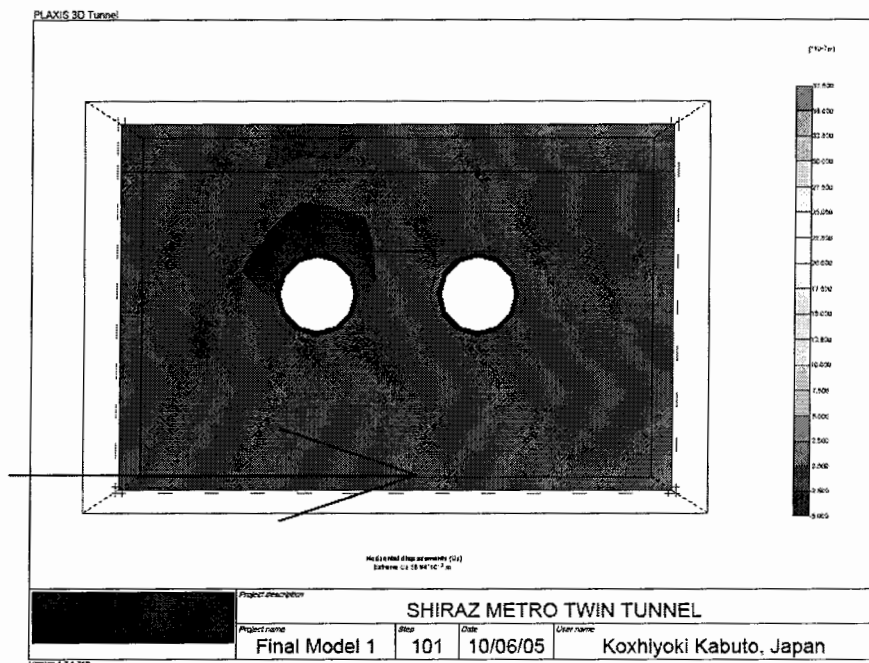
در شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۸، جابجایی‌های ایجاد شده ناشی از حفر تونل B در جهات مختلف و در شکل ۴-۹ نیز جابجایی‌های کلی ایجاد شده ناشی از حفر تونل B نشان داده شده است. در این شکل تأثیر حفر تونل B بر تونل A مشاهده می‌شود.



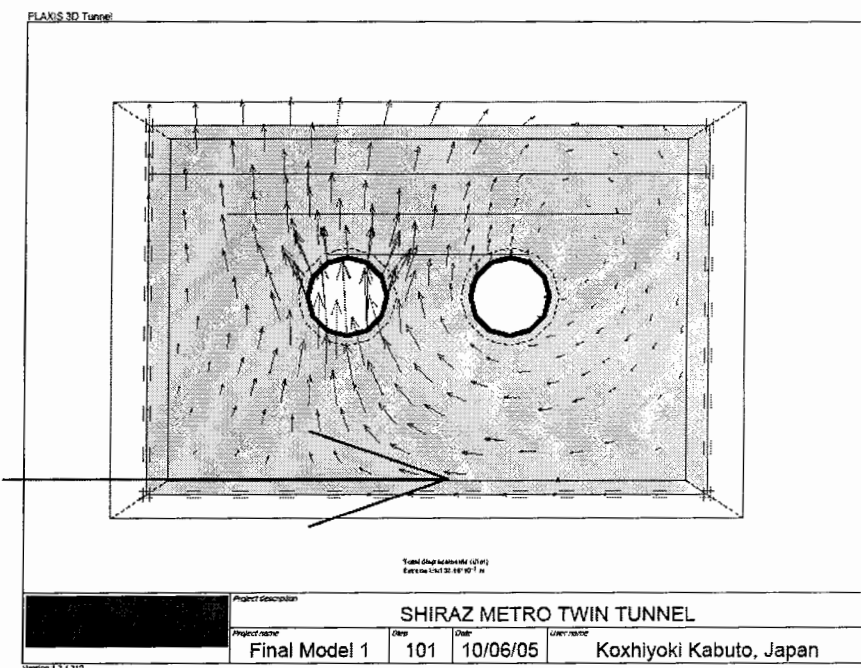
شکل ۴-۶- جابجایی‌های عمودی ایجاد شده ناشی از حفر تونل B



شکل ۴-۷- جابجایی‌های افقی ایجاد شده در جهت X ناشی از حفر تونل B



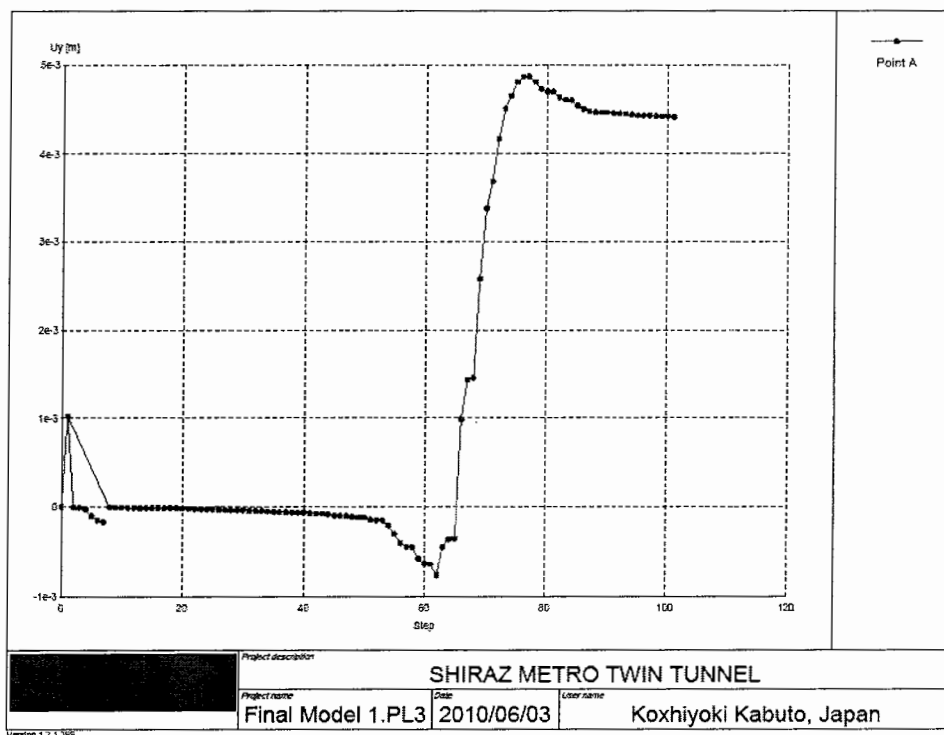
شکل ۴-۸- جابجایی‌های افقی ایجاد شده در جهت Z ناشی از حفر تونل B



شکل ۴-۹- جابجایی‌های کل ناشی از حفر تونل B

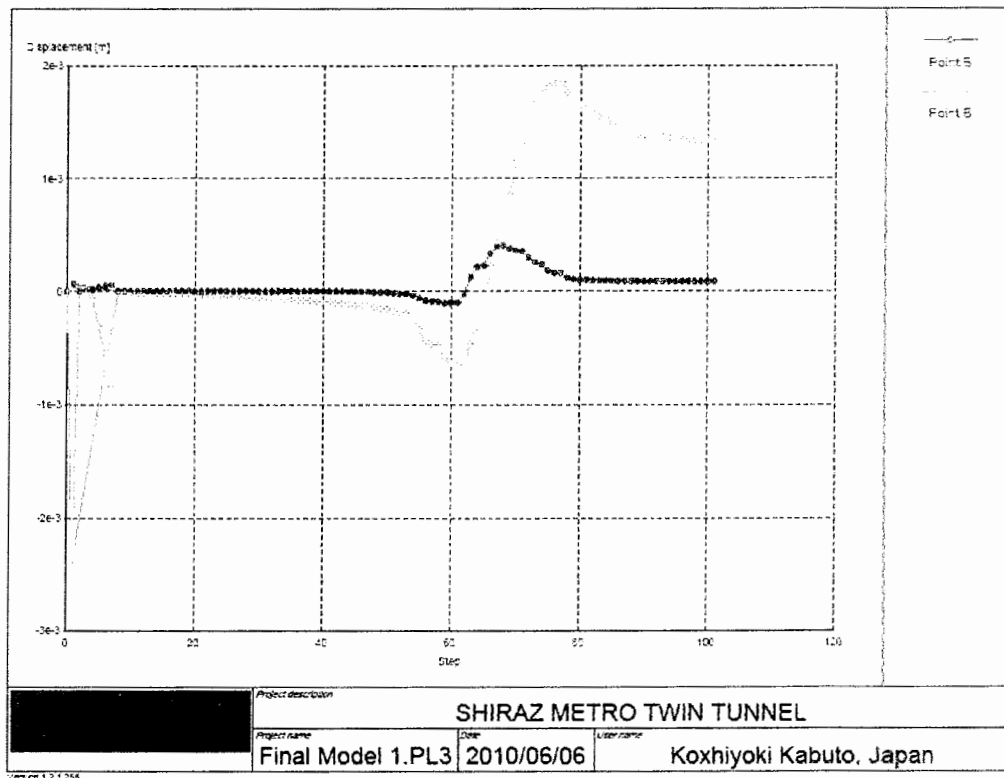
همانطور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، بیشترین جابجایی‌های ناشی از حفر تونل B در جهت افقی X و در جهت قائم Y می‌باشد. بنابراین بیشترین تأثیرات تونل B بر تونل A در این جهت‌ها بوده و در نمودارهای آتی، جابجایی‌ها در این جهت‌ها مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

در شکل ۴-۱۰ تغییرات جابجایی نقطه A (نشان داده شده در شکل ۴-۳) در جهت Y در اثر حفر تونل B نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، تغییرات جابجایی‌ها در نقطه A از مرحله ۵۲ آغاز می‌شود. با توجه به جدول ۴-۳، در مرحله ۵۲ جبهه‌کار تونل B در متر ۲۲۵ متر قرار دارد که ۷۵ متر با جبهه‌کار تونل A فاصله دارد. از مرحله ۵۲ تا ۶۲ جابجایی در حدود یک میلیمتر به سمت منفی Y مشاهده می‌شود. در مرحله ۷۷ که در متر ۳۳۰ متر قرار دارد، بیشترین جابجایی رخ داده است. در خلال این مراحل جابجایی ایجاد شده برابر ۶ میلیمتر بوده است.



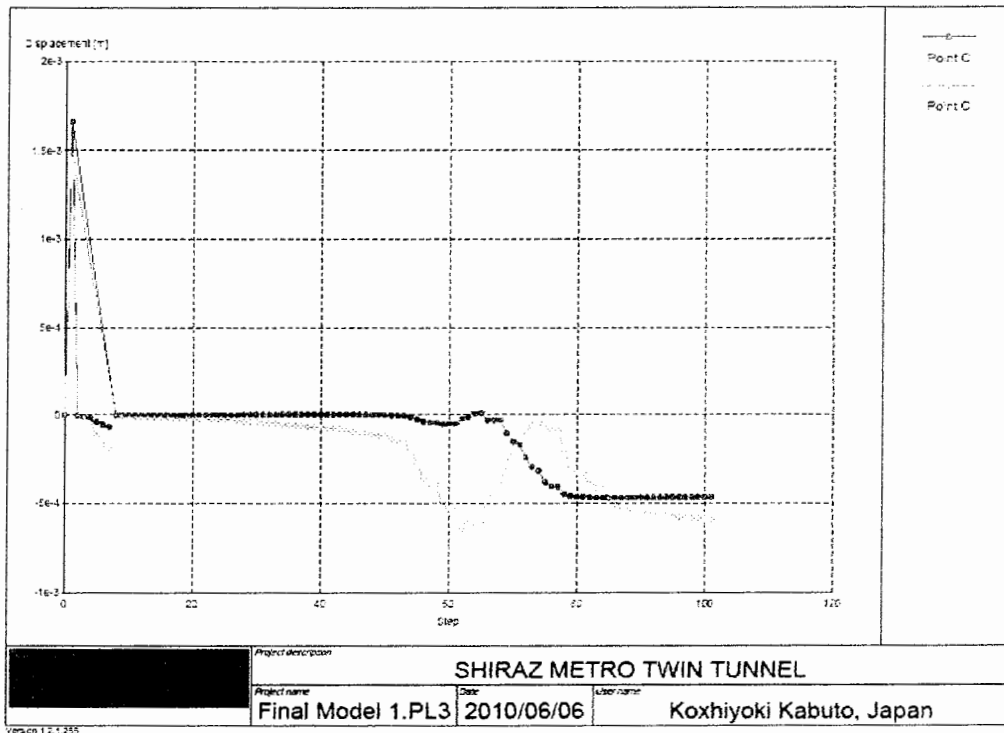
شکل ۴-۱۰ - تغییرات جابجایی نقطه A در جهت Y در اثر حفر تونل B

با توجه به شکل‌های بالا می‌توان نتیجه گرفت هنگامی که جبهه‌کار تونل B در ۷۵ متری جبهه‌کار تونل A قرار دارد، تغییرات جابجایی در نقاط بحرانی تونل A شروع شده و تا هنگامیکه جبهه‌کار تونل B، ۳۰ متر از جبهه‌کار تونل A جلوتر قرار بگیرد، این تغییرات ادامه می‌یابد. با توجه به اینکه فاصله بهینه در بین جبهه‌کار دو تونل مد نظر است، رعایت ۷۵ متر فاصله بین جبهه‌کارها ضروری به نظر می‌رسد. در شکل ۴-۱۱ تغییرات جابجایی نقطه B (نشان داده شده در شکل ۴-۳) در جهت‌های X و Y در اثر حفر تونل B نشان داده شده است.

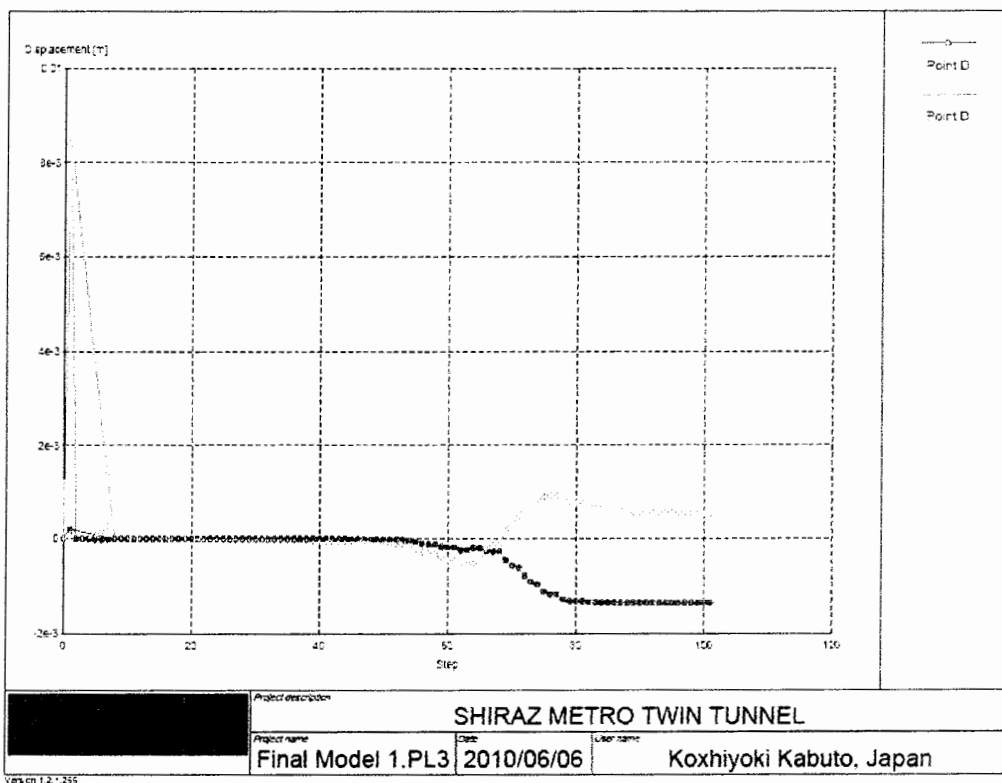


شکل ۴-۱۱- تغییرات جابجایی نقطه B در جهت‌های X (نمودار آبی رنگ) و Y (نمودار قرمز رنگ) در اثر حفر تونل B همانطور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، همانند نقطه A تغییرات جابجایی در جهت‌های X و Y از مرحله ۵۲ شروع شده است. در جهت X تغییرات جابجایی در مرحله ۸۰ به نرخ ثابتی رسیده است. همچنین در جهت Y تغییرات جابجایی در مرحله ۸۸ به ثبات رسیده است. با توجه به این شکل رعایت ۷۵ متر فاصله بین جبهه کارها ضروری به نظر می‌رسد. در شکل ۴-۱۲، تغییرات جابجایی نقطه C در جهت‌های X و Y در اثر حفر تونل نشان داده شده است. در این شکل نیز نتایج مشابه شکل ۴-۱۱ می‌باشد. در شکل‌های ۴-۱۳ تا ۴-۱۶ تغییرات جابجایی نقاط D تا G نشان داده شده است.

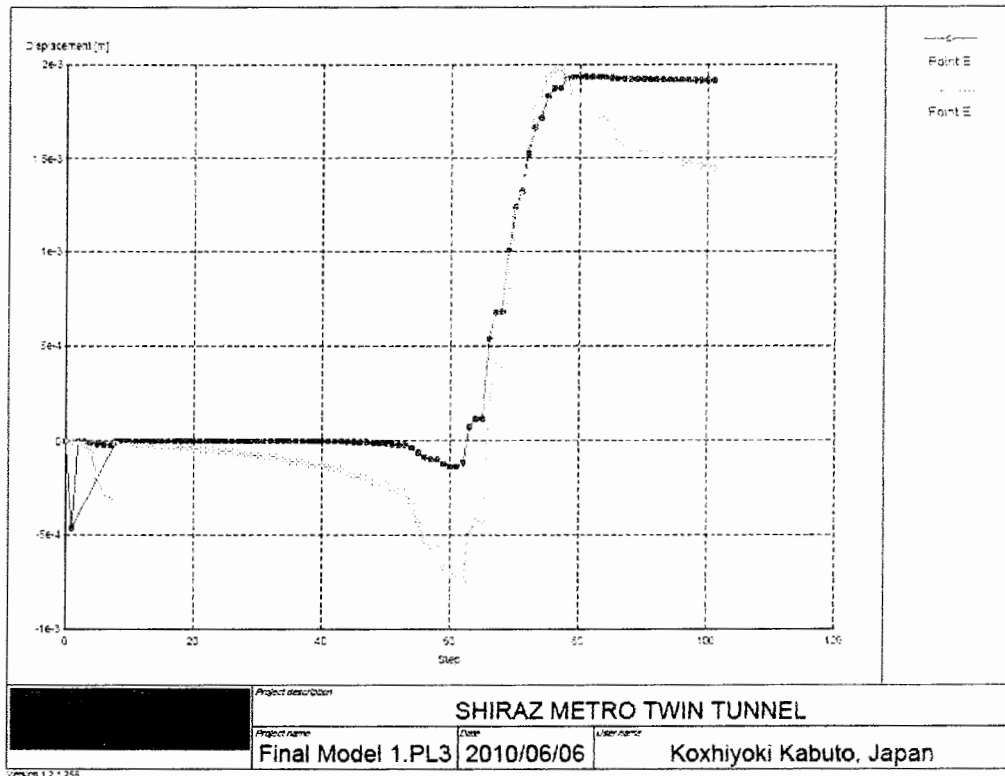




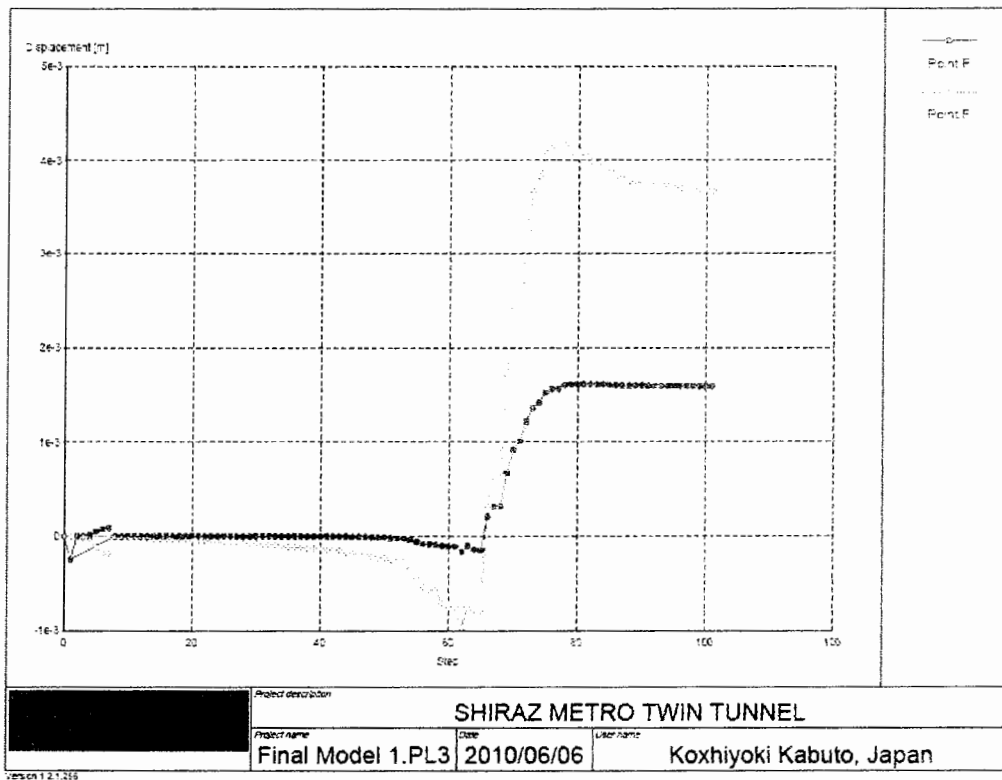
شکل ۴-۱۲- تغییرات جابجایی نقطه C در جهت X (نمودار آبی رنگ) و Y (نمودار قرمز رنگ) در اثر حفر تونل B



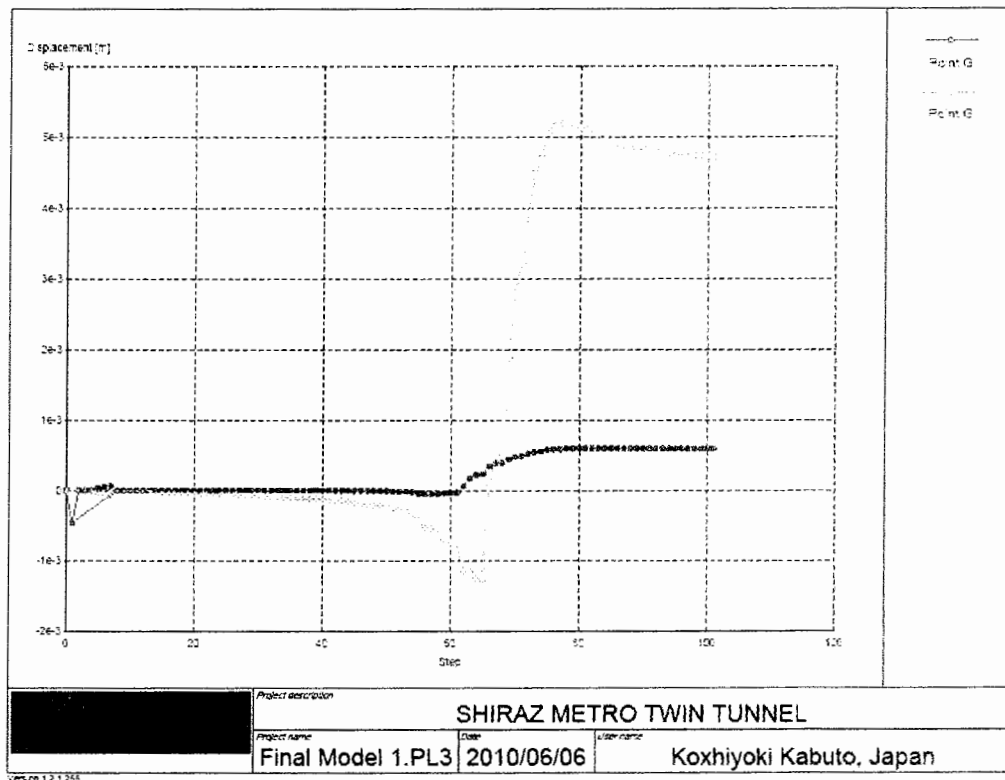
شکل ۴-۱۳- تغییرات جابجایی نقطه D در جهت X (نمودار آبی رنگ) و Y (نمودار قرمز رنگ) در اثر حفر تونل B



شکل ۴-۱۴- تغییرات جابجایی نقطه E در جهت X (نمودار آبی رنگ) و Y (نمودار قرمز رنگ) در اثر حفر تونل B

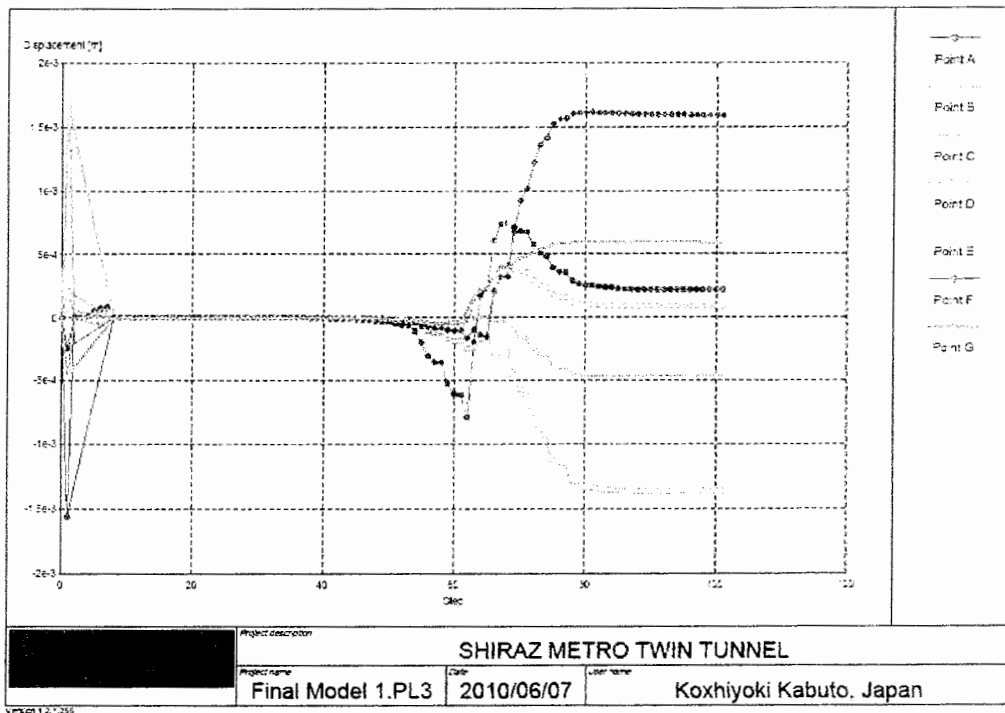


شکل ۴-۱۵- تغییرات جابجایی نقطه F در جهت X (نمودار آبی رنگ) و Y (نمودار قرمز رنگ) در اثر حفر تونل B

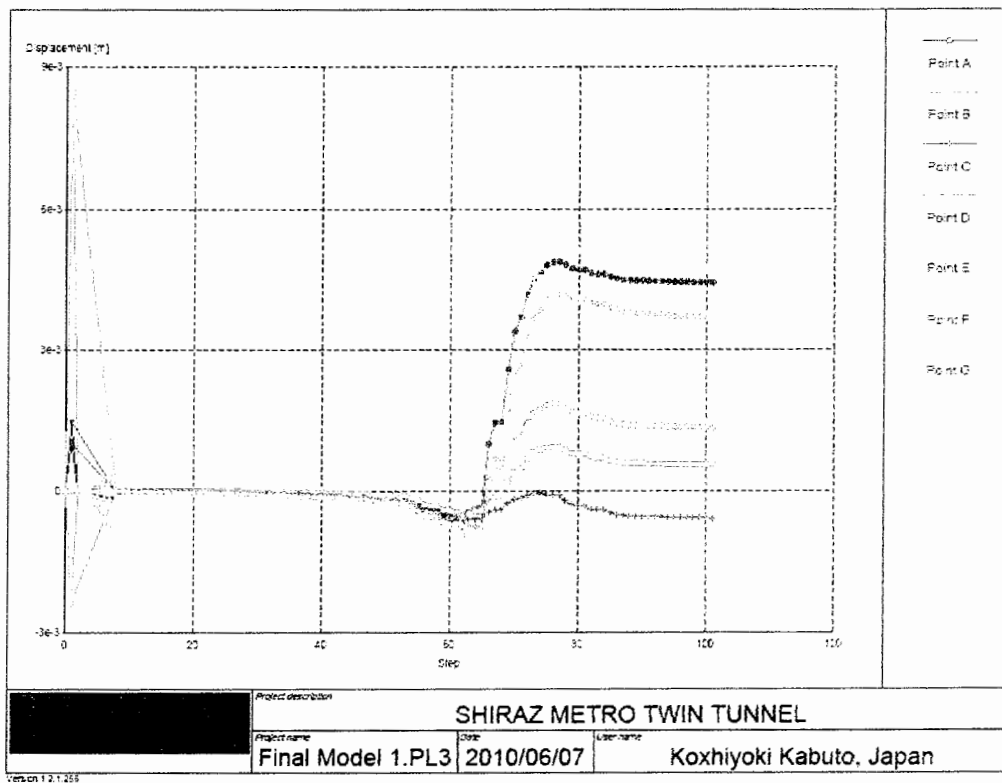


شکل ۴-۱۶- تغییرات جابجایی نقطه G در جهت X (نمودار آبی رنگ) و Y (نمودار قرمز رنگ) در اثر حفر تونل B

همانطور که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود، تغییرات جابجایی‌ها در تمامی نقاط از مرحله ۵۲ شروع می‌شود. همانطور که ذکر شد در مرحله ۵۲ جبهه کار تونل B در متر ۲۲۵ و در ۷۵ متری جبهه کار تونل A قرار دارد. با توجه به این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت رعایت حداقل ۷۵ متر فاصله در بین جبهه کار دو تونل ضرورت دارد. تغییرات جابجایی در نقاط A, B, C, D, E, F و G در جهت X در شکل ۴-۱۷ و در جهت Y در شکل ۴-۱۸ مقایسه شده است.



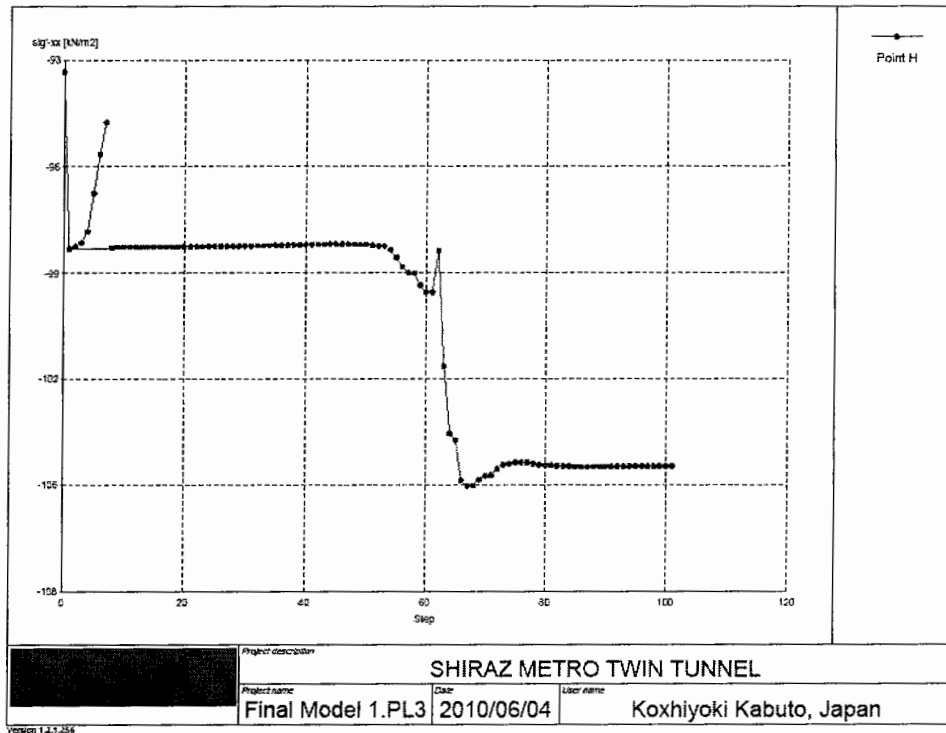
شکل ۴-۱۷- مقایسه تغییرات جابجایی نقاط A، B، C، D، E، F و G در جهت X در اثر حفر تونل B



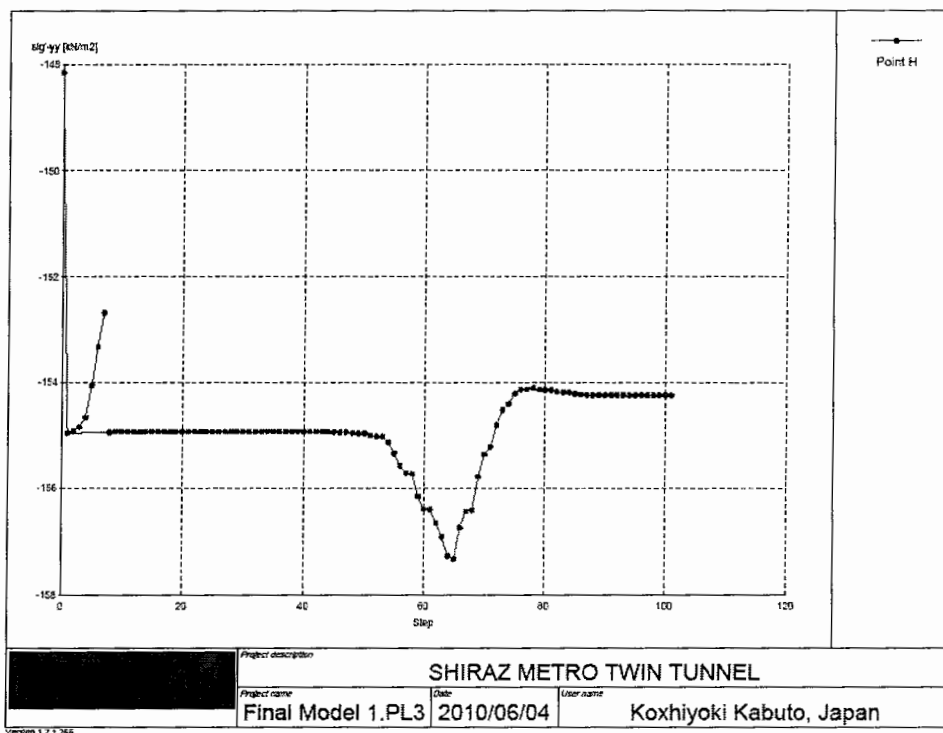
شکل ۴-۱۸- مقایسه تغییرات جابجایی نقاط A، B، C، D، E، F و G در جهت Y در اثر حفر تونل B

همانطور که در شکل ۴-۱۷ مشاهده می‌شود، مراحل آغاز و پایان تغییرات جابجایی در تمامی نقاط یکی است و تفاوت در میزان جابجایی‌ها می‌باشد. تغییرات جابجایی در تمامی نقاط از مرحله ۵۲ شروع شده و حداکثر در مرحله ۸۰ که جبهه‌کار تونل B در متر ۳۴۵ متر قرار دارد به پایان می‌رسد. این شکل نیز لزوم رعایت حداقل ۷۵ متر فاصله بین جبهه‌کارها را تأیید می‌کند.

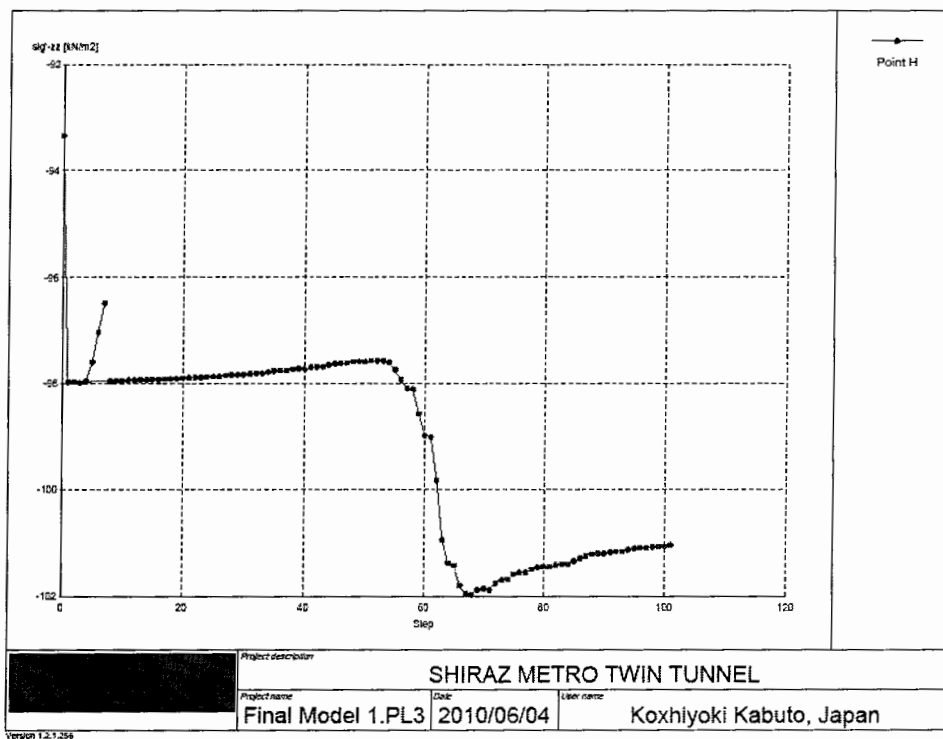
شکل ۴-۱۸ نیز صحت مطالب مذکور را تأیید می‌نماید. در این شکل حداکثر تغییرات جابجایی برای نقاط A و G با میزان جابجایی نزدیک ۶ میلیمتر می‌باشد. نقطه C نیز کمترین میزان جابجایی را دارا می‌باشد. در شکل‌های ۴-۱۹ تا ۴-۲۱ میزان تغییرات تنش ناشی از حفر تونل B در جهت‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۹ - تغییرات تنش در نقطه H در جهت X در اثر حفر تونل B

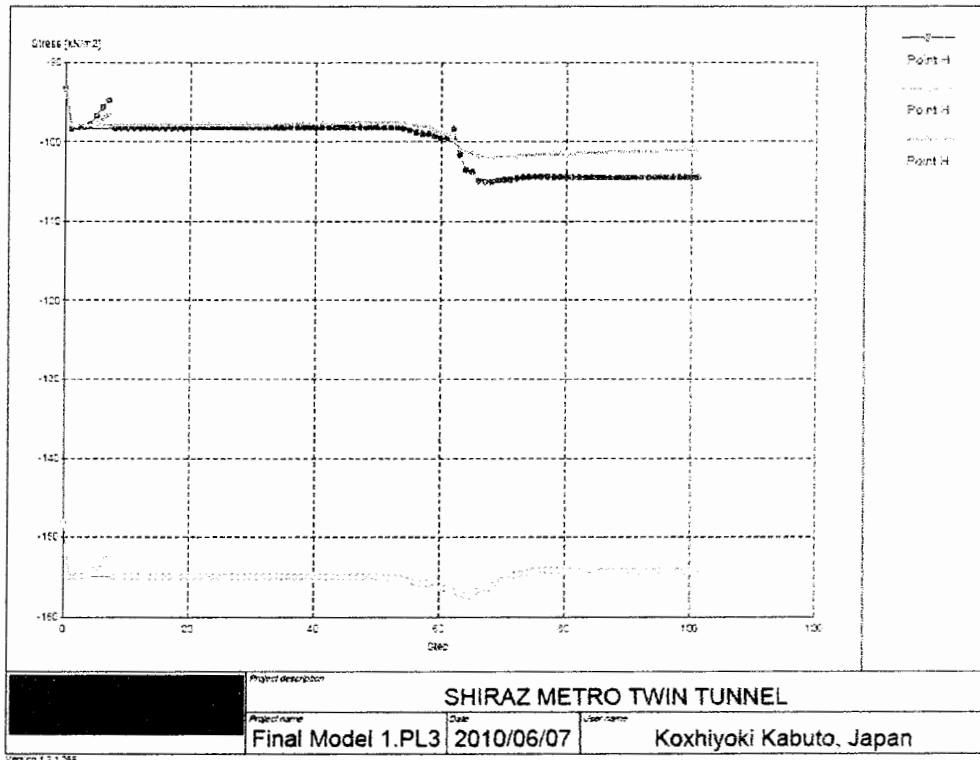


شکل ۴-۲۰- تغییرات تنش در نقطه H در جهت Y در اثر حفر تونل B



شکل ۴-۲۱- تغییرات تنش در نقطه H در جهت Z در اثر حفر تونل B

در شکل‌های فوق نیز تغییرات تنش از مرحله ۵۲ شروع شده و در مرحله ۸۰ به پایان می‌رسد. در شکل ۴-۲۲، تغییرات تنش در اثر حفر تونل B در نقطه H در جهت‌های X، Y و Z نشان داده شده است. با وجود اینکه مقدار تنش‌ها در جهت‌های X و Z نسبت به جهت Y اختلاف زیادی دارند، ولی آغاز و پایان تغییرات آنها در مراحل یکسانی رخ می‌دهد.



شکل ۴-۲۲- مقایسه تغییرات تنش در نقطه H در جهت‌های X (نمودار آبی رنگ)، Y (نمودار قرمز رنگ) و Z (نمودار سبز رنگ) در اثر حفر تونل B

#### ۴-۴- نتایج

همانطور که در فصل اول ذکر گردید، عمده هدف این مطالعه، ارائه یک روش جهت برآورد فاصله بهینه بین جبهه کارها در تونل‌های دوقلوی موازی است که بصورت موردی در تونل‌های دوقلوی متروی شیراز انجام شده است. فاصله بهینه بین جبهه کارها به عواملی همچون جنس خاک مسیر، وجود و یا عدم وجود آب، عمق تونل‌ها و روش تونل‌سازی وابسته است. واضح است که فاصله بهینه بدست آمده در منطقه مورد مطالعه، فقط در همین منطقه صادق است. اما از مدل مذکور برای سایر پروژه‌ها با خصوصیات آن مناطق می‌توان استفاده کرد. با توجه به شکل‌های فوق، فاصله ۷۵ متر به عنوان فاصله بهینه بین جبهه کارها بدست می‌آید. با رعایت این فاصله، میزان تغییرات جابجایی در نقاط بحرانی به حداقل خواهد رسید.

## فصل پنجم

# نتیجه گیری و پیشنهادات



## نتیجه‌گیری

در این تحقیق ضمن تعیین فاصله بهینه جبهه‌کارها در تونل‌های دوقلوی متروی شیراز، به بررسی اجمالی وضعیت زمین‌شناسی، نحوه حفر تونل‌های متروی شیراز، انواع روش‌های حفاری مکانیزه تونل در زمین‌های نرم و تونل‌سازی با استفاده از ماشین حفار EPB پرداخته شده است. همچنین حداقل فشار لازم جهت پایدارسازی جبهه‌کارها برآورد شده است. اهم نتایج کاربردی این تحقیق موارد ذیل را شامل می‌شود:

♦ جنس غالب خاک در منطقه مورد مطالعه از جنس رس با خاصیت خمیری پایین بوده و در بعضی موارد میان لایه‌های ماسه‌ای و سیلتی نیز در آنها وجود دارد که برای حفر تونل خاک‌های خوبی تلقی نمی‌شوند.

♦ بر اساس نتایج حاصل از گمانه‌ها، عمق سطح ایستابی از سمت شمال به جنوب افزایش می‌یابد؛ بطوریکه در محدوده گمانه BHÁ1 در میدان گل سرخ، فاصله تراز آب تا تاج تونل برابر ۵/۸ متر و میزان آب ورودی به تونل در واحد متر مربع  $26/9 \text{ L/m}^2$  بر دقیقه می‌باشد. لذا برای آب‌بند کردن و جلوگیری از هجوم آب به داخل تونل و اختلال در حفاری، طراحی پوشش مطمئن و با ضریب اطمینان بالا ضروری است.

♦ هنگام حفر تونل‌ها به علت استفاده از ماشین حفاری تونل از نوع سپر موازنه کننده فشار زمین، در موارد مواجه با خاک‌های رسی با نفوذپذیری پایین، اعمال فشار EPB مشکلی ایجاد نمی‌کند؛ ولی در مواردی که تونل‌سازی در خاک‌های با نفوذپذیری بالا همچون ماسه و شن انجام شود، اعمال فشار EPB عملاً امکان‌پذیر نخواهد بود. زیرا اعمال فشار در جبهه‌کار باعث حرکت فوم و مواد حفر شده به داخل زمین خواهد شد. جهت مقابله با اینگونه موارد، ایجاد کیک بنتونیت جهت کاهش میزان نفوذپذیری لازم می‌باشد. البته برای ایجاد کیک بنتونیت باید به ابعاد لایه ماسه‌ای و میزان نفوذپذیری توجه شود.

- ♦ فشار متعادل کننده زمین (EPB) به عواملی همچون زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی مواد دربرگیرنده سازه، عمق روباره و قطر تونل بستگی دارد.
- ♦ از تحلیل‌های عددی برای بدست آوردن حداقل فشار لازم جهت اعمال به جبهه‌کارها استفاده شده است. فشار بدست آمده در لحظه شکست یا ریزش جبهه‌کار به داخل تونل به عنوان حداقل فشار معرفی شده است. حداقل فشار در تاج تونل برابر  $84 \text{ kN/m}^2$  و در کف تونل برابر  $130 \text{ kN/m}^2$  بدست آمده است.
- ♦ در هنگام حفاری با توجه به شرایط دستگاه و همچنین شرایط ژئوتکنیکی محلی، فشار توسط اپراتور تنظیم می‌شود و استفاده از یک فشار از پیش معین شده غیر ممکن است. با مدل‌سازی عددی فقط می‌توان یک رنج تغییرات برای فشار جبهه‌کار بدست آورد.
- ♦ هر چه میزان فشار متعادل کننده زمین بالاتر باشد، به دلیل دست‌خوردگی بیشتر در زمین‌های جلوی دستگاه و تغییر خواص فیزیکی خاک، میزان نشست افزایش می‌یابد. البته این میزان در مراحل اولیه یعنی قبل از رسیدن ماشین حفار و هنگام گذر ماشین از نقطه مورد نظر و بلافاصله بعد از سگمنت گذاری شدت بیشتری دارد و بعد از این مرحله میزان نشست به مرور زمان کاهش یافته تا اینکه در نهایت به صفر خواهد رسید.
- ♦ برای یافتن فاصله بهینه جبهه‌کارها از مدل‌سازی عددی استفاده شده است که این مدل‌سازی توسط نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL انجام شده است. بمنظور یافتن فاصله بهینه بین جبهه‌کارها از نمودارهای جایجایی - مرحله که نشان‌دهنده تأثیر اندازه فاصله جبهه‌کار یک تونل بر تونل دیگر است، استفاده شده است. همچنین از نمودارهای تنش - مرحله نیز برای بررسی صحت جواب‌ها استفاده شده است.
- ♦ با توجه به نمودارهای جایجایی - مرحله، فاصله بهینه بین جبهه‌کارها ۷۵ متر بدست آمد. بدین معنی که در صورتیکه فاصله بین جبهه‌کارها از مقدار مذکور کمتر شود، تأثیر جبهه‌کارها بر یکدیگر افزایش یافته و احتمال ایجاد نشست و یا بالازدگی سطح و در نتیجه تخریب تأسیسات سطحی افزایش می‌یابد. واضح است در صورتی که فاصله بین جبهه‌کارها بیشتر از مقدار مذکور شود، از نظر فنی مناسب‌تر است؛ زیرا فضای اطراف حفاری به تعادل کامل خواهد رسید. اما فاصله

بیشتر امکان افزایش پروسه ساخت تونل از لحاظ موقعیت زمانی و مسایل مربوطه را افزایش می‌دهد.

### پیشنهادات

- ♦ در منطقه مورد مطالعه، تونل‌ها در زیر خیابان اصلی حفر می‌شوند و تأسیسات بزرگ سطحی در این منطقه وجود ندارد. با توجه به اینکه تونل‌های متروی شیراز از نقاط حساسی همانند زیر پل غدیر عبور می‌کنند، لزوم تحقیقات بیشتر در مورد تأثیر فاصله جبهه‌کارها بر سازه‌های سنگین سطحی ضروری به نظر می‌رسد.
- ♦ با توجه به عبور تونل‌های متروی شیراز از نزدیکی ارگ کریم‌خان زند که یک اثر تاریخی محسوب می‌شود، لزوم مطالعات جامع در مورد تأثیر حفر تونل‌ها بر این اثر تاریخی ضروری به نظر می‌رسد.
- ♦ با توجه به اینکه منطقه شهر شیراز از لحاظ زمین لرزه فعال می‌باشد و طبق آمارهای موجود دفعات متعدد زمین لرزه‌های بزرگ در این منطقه رخ داده است، لازم است که این موضوع در تمامی طراحی‌ها لحاظ شود.
- ♦ در این پروژه باید جهت کاربری و پایداری بهتر تونل، به نحوه سگمنت‌گذاری و اتصال آنها و همچنین تأثیر آن بر انحراف تونل و آب‌بند شدن محیط، تحقیقات بیشتری انجام گیرد.
- ♦ به منظور بررسی دقیق میزان نشست در قسمت‌هایی که سازه‌های بزرگی در طرفین تونل‌ها قرار گرفته‌اند، انجام مدل‌سازی دقیق لایه‌های خاک و تأثیر وزن سازه‌ها مهم می‌باشد.

## منابع و مراجع

- ۱- سازمان قطار شهری شیراز . ۱۳۸۱ . گزارش سیمای طرح، مسیر بلوار مدرس.
- 2- Shiraz Urban Railway Organization , [www.Shirazmetro.org](http://www.Shirazmetro.org)
- ۳- مهندسان مشاور خدمات مهندسی مکانیک خاک . ۱۳۸۱ . گزارش مطالعات ژئوتکنیک طرح قطار شهری شیراز، مسیر بلوار مدرس.
- ۴- توکلی ، ب . ۱۳۷۴ . زمین‌شناسی مهندسی . چاپ دوم . انتشارات دانشگاه پیام نور.
- ۵- ام ، برجا . ۱۳۷۷ . مکانیک خاک . جلد اول . صالح‌زاده ، حسین . چاپ سوم . انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران .
- ۶- سازمان قطار شهری شیراز . ۱۳۸۱ . گزارش سیمای طرح، ایستگاه میدان / الله.
- ۷- شاه علی، منوچهر . ۱۳۸۰ . تکنولوژی حفاری با ماشین‌آلات و تجهیزات پیشرفته . صفحه ۵۱۸ - ۵۳۳ . اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.
- 8-Launay,J.1998. *NATM versus S.C.L.* Tunnels and Tunneling International. PP.31-34.
- 9-Bickel,J.O.,Kuesel,T.R.,Elwyn,H.K.2004. *Tunnel Engineering Handbook*. Second Indian Edition.CBS publishers.
- 10-Miura,K.2003.*Design and construction of mountain tunnels in Japan*.tunneling and underground space technology,Vol.18.PP.115-126.
- 11-Karakus.M.,Fowell,R.J.2003.*Effects of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM*.Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.18.pp.513-523.
- 12-Vermmer,P.A.,Brikgreve,R.B.J.2001.*Plaxis3D tunnel Manual* .
- 13-Whittaker,B.N.,Frith,R.C.1990.*TUNNELLING*. The institution of Mining and Metallurgy ,London.
- 14-Leca,E.,Leblais,Y.,Kuhnhenh,K.2000.*Underground Works in Soils and Soft Rock Tunnelling*.
- ۱۵- گروه کنترل EPB.۱۳۸۳. *آشنایی با انواع ماشین‌آلات حفاری تونل*. گزارش بخش حفاری، شرکت ساختمانی بام‌راه.
- 16-Maild,B.,Herrenknecht,M.,Anheuser,L.1996.*Mechanised Shield Tunnelling*. Emst & Sohn.

۱۷- طاهری، عباس، طاهری، علی. ۱۳۸۰. کارگاه آموزشی حفاری و تونلسازی مکانیزه و روش لوله‌رانی. مهندسین مشاور زمین فن آوران.

18-Kurihara,K.,Kawata,H.,Konishi,J.1995.*Current practice of shield tunneling methods-A survey on Japanese shield tunneling*. Underground construction in soft ground, Balkema,Rotterdam.PP.329-336.

19-Walter,C.2001.*Immersed tunnel settlements,Part 1: nature of settlements*. Tunnelling and Underground Space Technology.

20- Kasper,T.,Meschke,G.2005.*On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunneling*.Tunnelling and Underground Space Technology.

21- Wirth-NFM.2003.*Earth Pressure Balance formation of Shiraz Metro*.lyon

22-Hanamura,T.1996. *State of the art of the Japanese TBM Technology- New Developments, tunnel Boring Mechanics*. Wagner,H & Schvltter,A.International Congress on Mechanized Tunnelling.Italy.

23-Babenderede,S.,Babenderede,L.1996. *Experiences in Mechanized Tunneling,Tunnel Boring Machine*.Wagner,H & Schvltter,A.International Congress on Mechanized Tunnelling.Italy.

24-Anagnostou,G.,Kovarl,K.1994. *The Face Stability of Slurry-shield-driven Tunnels*. Tunnelling and Underground Space Technology,Vol. 9, No. 2, pp. 165-174.

25- Herrknecht,M.,Rehn,U.2003.*Earth pressure balance shield technology*.Internet.

26- Lars Langmaack.2002.*Advanced Technology of Soil Conditioning in EPB Shield Tunnelling*. MBT International,Zurich.

27-Pande,G.N.,Beer,G.,Williams,J.R.1990.*Numerical Methods in Rock Mechanics*. John, W.,Sons.L.

۲۸- ولی‌پور گودرزی، فرزاد. ۱۳۷۷. کاربرد روش المان‌های محدود در مهندسی ژئوتکنیک. چاپ اول. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۲۹- گروه کنترل EPB. ۱۳۸۴. اطلاعات ژئوتکنیک مسیر خط یک و گزارشات روزانه حفاری. شرکت ساختمانی بام راه.

30-Anagnostou,G.,Kovarl,K.1996.*Face Stability in Slurry and EPB Shield Tunneling*. Proceedings International Symposium Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground.Mair,R.Taylor.R.London.

31-Borms,B.,Bennermark,H.1967.*Stability of clay at vertical opening*. ASCE Jourdan of the soil Mechanics and Foundation Division.

- 32-Molee,I.,Woonam,S.2004.*Effect of seepage force on tunnel face stability reinforced with multi-step pipe grouting*.Department of civil Engineering Korea University.
- 33-Skempton,A.W.1959.*Cast in-situ bored piles in London Clay*. pp.153-173.*Geotechnique*.volume9.
- 34-Broere,W.2001.*Tunnel face stability new CPT Applications*.ph.D thesis.Delft university press.
- 35-Anagnostou,G.,Kovari,K.1996.*Face Stability Conditions with Earth-Pressure Balanced Shields*. Tunnelling and Underground Space Technology,Volume 11.

فصل ششم

# پیوست

(روش اجزاء محدود)

## ۶-۱- مقدمه

این فصل به توصیف روش اجزاء محدود به یک فرم ساده می‌پردازد که با مسائل ژئوتکنیکی در زمینه‌های مهندسی و عملیات تونل‌سازی سر و کار دارد. آشنایی با مفاهیم و اصول این روش به شناخت نحوه عملکرد نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL که بر اساس این روش پایه‌گذاری شده است، کمک شایانی خواهد نمود.

در سال‌های اخیر، روش اجزاء محدود به یکی از متداول‌ترین روش‌های عددی در حل مسائل مختلف مهندسی تبدیل شده است. این روش که در بسیاری از رشته‌ها همانند مکانیک جامدات، مکانیک سیالات، بیومکانیک، الکتروسیسته و مغناطیس، انتقال حرارت، نیمه هادی‌ها و موارد مشابه کاربرد وسیعی دارد، اولین بار در سال ۱۹۴۰ میلادی در طراحی بدنه هواپیماها بکار رفت. برای نخستین بار واژه اجزاء محدود در سال ۱۹۵۶ میلادی توسط "تورنر"<sup>۱</sup> و همکارانش بکار گرفته شد [۲۷].

در حالت کلی هر پدیده طبیعی فیزیکی تابع یک معادله دیفرانسیلی می‌تواند توسط روش اجزاء محدود از طریق اصول حساب دیفرانسیلی مدل شود. مشتق‌گیری مستقیم معادلات بار-جابجایی تطابق نزدیکی با روش صلبیت<sup>۲</sup> بررسی سازه‌های قابی<sup>۳</sup> دارد [۲۷]. سازه قابی شکل، مسئله‌ای با تعداد محدودی درجه آزادی است. در روش موسوم به روش سختی، رابطه بین نیروها، تغییر مکان‌ها و چرخش‌ها در نقاط اتصال یا گره قاب فرمول‌بندی می‌شود. به عنوان مثال در مورد یک قاب فضایی، هر یک از مفصل‌ها شش درجه آزادی دارند: سه تغییر مکان و سه چرخش. اگر قاب  $n$  مفصل آزاد داشته باشد، تعداد درجات آزادی آن  $6n$  خواهد بود و بنابراین برای تعیین تعداد مجهولات،  $6n$  معادله سختی مورد نیاز است. در مقابل این وضعیت، یک جسم دو یا سه بعدی بینهایت نقطه دارد که هر کدام دو یا

<sup>۱</sup> - Turner

<sup>۲</sup> - Stiffness Method

<sup>۳</sup> - Framed Structures

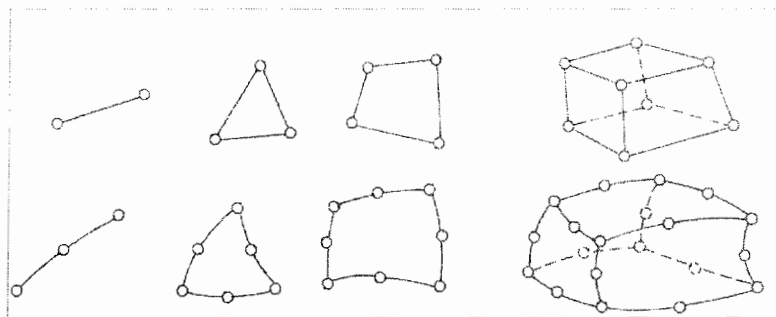


سه درجه آزادی دارند که مرکب از جابجایی در امتداد دو یا سه محور مورد نظر است. در چنین حالتی، تعدد معادلات سختی نیز بینهایت است و بنابراین مسئله را نمی‌توان با روش‌های معمولی حل کرد. از سوی دیگر، اگر تعداد محدودی گره<sup>۱</sup> انتخاب شود که در عین حال تعداد آنها آنقدر باشد که مسئله قابل حل باشد، در این صورت مسئله قابل حل است و می‌توان وضعیت تغییر شکل یافته جسم را بطور تقریب بدست آورد. این بحث در واقع مبانی روش اجزاء محدود را تشکیل می‌دهد.

در روش اجزاء محدود، ساختار مورد مطالعه به قطعه‌های کوچکتری تقسیم می‌شود که هر کدام المان<sup>۲</sup> نام دارد. همچنین فرض می‌شود که المان‌ها در نقاط مشخصی که گره نام دارند به یکدیگر متصل شده که در این نقاط جابجایی‌ها محاسبه می‌شوند. بدین ترتیب جسمی که بینهایت درجه آزادی دارد، با جسمی شبیه‌سازی می‌شود که تعداد درجات آزادی آن دو تا سه برابر تعداد گره‌های فرضی است. واضح است که هر چه تعداد گره‌ها زیادتر باشد، حل مسئله نیز دقیق‌تر و در عین حال مشکل‌تر است. با اعمال تعدادی فرضیات، جابجایی‌ها در هر نقطه در داخل المان به جابجایی گره‌ها مرتبط می‌شوند. در واقع در روش اجزاء محدود، جابجایی‌ها متغیرهای اصلی را تشکیل می‌دهند. با استفاده از میزان جابجایی‌ها در داخل المان، می‌توان کرنش‌ها را محاسبه نمود. با مشخص شدن کرنش‌ها و با توجه به روابط تنش-کرنش، تنش‌ها محاسبه می‌شوند.

## ۶-۲- روش اجزاء محدود دوبعدی

در مسائل دوبعدی، جسم مورد مطالعه به اجزای کوچکتری به شکل مثلث، مستطیل و یا چهار ضلعی‌هایی با اضلاع مستقیم یا منحنی‌وار تقسیم می‌شود که این اجزاء کوچکتر تحت عنوان المان نامیده می‌شوند. در شکل ۶-۱ انواع اصلی المان‌های محدود نشان داده شده است [۲۸].



شکل ۶-۱- انواع اصلی المان‌های محدود [۲۸]

<sup>۱</sup> -Node

<sup>۲</sup> -Element

المان‌هایی که در ردیف پایین شکل ۶-۱ نشان داده شده‌اند، علاوه بر گوشه‌ها در وسط اضلاع نیز دارای گره هستند که اصطلاحاً به این المان‌ها، المان‌های سهمی‌وار<sup>۱</sup> گفته می‌شود. این نامگذاری بدین علت است که برای تعیین میزان جابجایی در هر نقطه از داخل این المان‌ها، از قانون درونیابی سهمی استفاده می‌شود. المان‌های خطی برای مدلسازی ساختارهایی همچون میل‌مه‌ارها، تیرها، پایه‌ها و آسترکاری انعطاف‌پذیر تونل‌ها بکار می‌روند. این المان‌ها در مقابل خمش دارای مقاومت و یا سختی نیستند.

بسیاری از نرم‌افزارهای تجاری موجود در زمینه تحلیل تنش در تونل‌ها، مجموعه‌ای از المان‌ها با شکل‌های متفاوت را در اختیار دارند که در هر مورد می‌توان المان مناسب را انتخاب کرد. برای مدلسازی رفتار پوشش داخلی تونل‌ها، استفاده از المان‌هایی موسوم به المان‌های خمشی صفحه‌ای مناسب است، اما این المان‌ها در همه نرم‌افزارها رایج وجود ندارند. معمولاً المان‌های دوبعدی نازک می‌توانند به جای المان‌های خمشی صفحه‌ای مورد استفاده قرار بگیرند [۲۷].

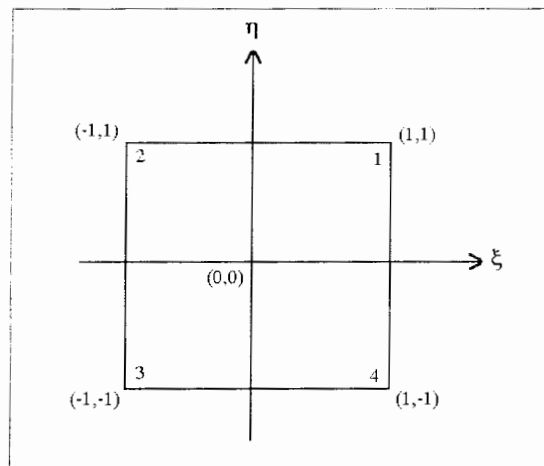
### ۶-۲-۱- مش اجزاء محدود

نخستین گام در بررسی روش اجزاء محدود، ایجاد مش اجزاء محدود است. انتخاب مش اختیاری است. تعداد کلی المان‌ها و گره‌های مورد نیاز در یک مسئله به عواملی همچون دقت مورد نیاز، هزینه محاسبات و نحوه آماده‌سازی داده‌ها بستگی دارد. در حالت کلی به کمک تعداد محدودی از المان‌های سهمی‌وار می‌توان به نتایج مطلوب دست یافت. از سوی دیگر لازم نیست که مش حتماً یکنواخت باشد؛ به بیان دیگر این الزام وجود ندارد که المان‌ها همگی هم اندازه باشند. به عنوان یک قاعده کلی می‌توان گفت که وقتی تغییرات شدیدتری در وضعیت تنش‌ها مورد انتظار باشد، المان‌ها را باید کوچکتر انتخاب کرد. بنابراین در حالت کلی استفاده از المان‌های کوچکتر مناسب‌تر است. از دیدگاه تئوری هر یک از المان‌ها می‌توانند خواص متفاوتی داشته باشند. ولی بهتر است مش اجزاء محدود بگونه‌ای طراحی شود که هر المان فقط در یک زون قرار گیرد، یعنی شامل دو نوع مصالح مختلف نشود [۲۷].

<sup>۱</sup>-Parabolic Element

۶-۲-۲- توابع شکل<sup>۱</sup>

همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد، جابجایی‌ها در گره‌ها محاسبه می‌شوند. میزان جابجایی در هر نقطه داخل المان به میزان جابجایی گره‌ها ( $\delta$ ) توسط تابعی موسوم به تابع شکل مربوط می‌شود. برای تشریح این مطلب، مطابق شکل ۶-۲ المان مربعی شکلی که چهار گره دارد در نظر گرفته می‌شود. در این شکل ۱۱ و  $\xi$  به عنوان محورهای مختصات المان بوده و مبدأ مختصات نیز بر مرکز مربع منطبق است. این انتخاب تعمدی است؛ زیرا هر المان چهارضلعی با هر شکل یا اندازه از هر دستگاه مختصات می‌تواند با انتقال سیستم مختصات به المان نشان داده شده در شکل ۶-۲ تبدیل شود. نحوه این انتقال در بخش ۶-۲-۳ بررسی خواهد شد. طول اضلاع مربع ۲ واحد در نظر گرفته شده و محورهای ۱۱ و  $\xi$  بگونه‌ای مدرج شده‌اند که نقاط المان نسبت به آنها در مختصات  $\pm 1$  واقع شوند و با تغییر مبدأ می‌توان آنها را به مختصات عمومی  $x$  و  $y$  تبدیل کرد. در این حالت مقدار جابجایی در هر نقطه از المان به مختصات  $(u, v)$  از رابطه (۶-۱) بدست می‌آید که در این رابطه عبارت  $(u_1, v_1, \dots, u_4, v_4)$  نشانگر جابجایی در گره‌ها و  $N_1, N_2, N_3$  و  $N_4$  بترتیب توابع شکل مربوط به گره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ می‌باشند [۲۷].



شکل ۶-۲ المان مربعی شکل با چهار گره [۲۷]

<sup>۱</sup> -Shape Functions

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

توابع شکل  $N_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 4$ ) با  $N_i(\xi, \eta)$ ، توابع مختصات برای نقاطی هستند که جابجایی آنها مجهول است. توابع شکل باید این خاصیت را داشته باشند که وقتی مختصات گره  $i$  ام در آن جایگزین می‌شود،  $N_i$  می‌بایست برابر واحد شده و برای  $N_{j \neq i}$  می‌بایستی برابر صفر شود که این امر از رابطه ۱-۶ بخوبی پیداست. توابع شکل زیر مورد بررسی قرار خواهند گرفت:

$$N_1 = \frac{(1+\xi)(1+\eta)}{4} \quad (2-6)$$

$$N_2 = \frac{(1-\xi)(1+\eta)}{4}$$

$$N_3 = \frac{(1-\xi)(1-\eta)}{4}$$

$$N_4 = \frac{(1+\xi)(1-\eta)}{4}$$

با توجه به آنکه مختصات گره‌های ۱ تا ۴ به ترتیب  $(1, 1)$ ،  $(-1, 1)$ ،  $(-1, -1)$  و  $(1, -1)$  است، لذا این توابع شکل با معیار مذکور سازگاری دارند. بنابراین روابط (۲-۶) توابع شکل یک المان مربعی شکل را بدست می‌دهند. توابع شکل سایر المان‌های متداول در این روش را نیز به سادگی می‌توان با روش سعی و خطا بدست آورد. برای المان‌های مرتبه بالاتر می‌بایست روش‌های مختلف ریاضی را برای کسب عبارات مربوط به توابع شکل انجام داد [۲۷]. جدول ۱-۶ متداولترین المان‌های مورد استفاده در روش اجزاء محدود دوبعدی را همراه با تبدیل آنها در مختصات محلی و توابع شکل آنها ارائه می‌دهد.

### ۳-۲-۶- تبدیل مختصات

هدف اصلی تبدیل مختصات، سهولت در انتگرالگیری مقادیری است که برای محاسبه ماتریس سختی المان‌ها لازم می‌باشند. به عنوان مثال با مراجعه به شکل ۲-۶ اگر انتگرالگیری تابع  $F$  در سطح مربع مد نظر باشد، خواهیم داشت [۲۷]:

$$F = \int_1^{+1} \int_1^{+1} f(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (3-6)$$

محاسبه این انتگرال به مراتب ساده‌تر از انتگرالگیری حول سطوح نامنظم چهار ضلعی اولیه است. برای تشریح مطلب، یک عنصر چهار گوشه‌ای در سیستم مختصات عمومی در نظر گرفته می‌شود. تبدیل این چهار ضلعی به صورت یک مربع به ضلع ۲ واحد در نظر است. بدین منظور از تابع شکل استفاده نموده و فرض می‌شود که مختصات نقاط درون المان از روابط (۴-۶) بدست می‌آیند:

$$x = N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 + N_4 x_4 \quad (4-6)$$

$$y = N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 + N_4 y_4$$

این روابط را می‌توان بصورت روابط بسط نیافته (۵-۶) و (۶-۶) نیز نوشت که در این روابط  $(x_1, y_1)$ ،  $(x_2, y_2)$  و ... مختصات گره‌ها در سیستم مختصات  $x$ ،  $y$  و  $N_1$ ،  $N_2$ ،  $N_3$  و  $N_4$  توابع شکل هستند که قبلاً شرح داده شده‌اند و صریحاً از رابطه (۲-۶) بدست می‌آیند. توابع شکل هر کدام تابعی از  $\xi$  و  $\eta$  هستند. اگر مقادیر  $\xi$  و  $\eta$  مربوط به هر یک از گره‌های گوشه‌ای در رابطه (۵-۶) قرار داده شود، مختصات آن گره بدست خواهد آمد.

جدول ۶-۱- توابع شکل المان‌های مختلف یک و دوبعدی [۲۷]

شکل	شکل تبدیلی	تابع شکل
		$N_1 = 1 - 3(\xi + \eta) + 2(\xi + \eta)^2$ $N_2 = 4\xi(1 - \xi - \eta)$ $N_3 = \xi(2\xi - 1)$ $N_4 = 4\xi\eta$ $N_5 = \eta(2\eta - 1)$ $N_6 = 4\eta(1 - \xi - \eta)$
		$N_1 = \frac{(1 - \xi)(1 + \eta)}{4}$ $N_2 = \frac{(1 - \xi)(1 - \eta)}{4}$ $N_3 = \frac{(1 + \xi)(1 - \eta)}{4}$ $N_4 = \frac{(1 + \xi)(1 + \eta)}{4}$
		$N_1 = -\frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \xi - \eta)$ $N_2 = \frac{1}{4}(1 + \eta)(1 - \xi^2)$ $N_3 = -\frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta)(1 - \xi - \eta)$ $N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta^2)$ $N_5 = -\frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \xi + \eta)$ $N_6 = \frac{1}{4}(1 - \eta)(1 - \xi^2)$ $N_7 = -\frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \xi + \eta)$ $N_8 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta^2)$
		$N_1 = \frac{1 - \xi}{2}$ $N_2 = \frac{1 + \xi}{2}$
		$N_1 = -\frac{1}{2}\xi(1 - \xi)$ $N_2 = 1 - \xi^2$ $N_3 = \frac{1}{2}\xi(1 + \xi)$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

و یا :

$$x = \sum_{i=1}^4 N_i x_i \quad (6-6)$$

$$y = \sum_{i=1}^4 N_i y_i$$

اگر در این روابط مقادیر  $\xi = 0$  و  $\eta = 0$  قرار داده شود، مختصات مرکز چهار ضلعی بدست می‌آید. به سادگی می‌توان نشان داد که معادله اضلاع چهار ضلعی بصورت  $\eta = -1$  و  $\xi = -1$  و  $\eta = +1$  و  $\xi = +1$  می‌باشد. بر اساس روابط ریاضی، جز سطح  $dA$  از رابطه ذیل حاصل می‌شود:

$$dA = dx.dy = |J|d\xi d\eta \quad (7-6)$$

که در این رابطه نماد  $|J|$  نشانگر دترمینان ماتریس موسوم به ماتریکس ژاکوبین است که از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (8-6)$$

مؤلفه‌های ماتریس ژاکوبین به سادگی با مشتق‌گیری از روابط (6-6) بدست می‌آیند:

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \sum_{i=1}^4 \left( \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \right) x_i \quad (9-6)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \eta} = \sum_{i=1}^4 \left( \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right) x_i$$

$$\frac{\partial y}{\partial \xi} = \sum_{i=1}^4 \left( \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \right) y_i$$

$$\frac{\partial y}{\partial \eta} = \sum_{i=1}^4 \left( \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right) y_i$$

مقادیر  $\frac{\partial N_i}{\partial \xi}$  و  $\frac{\partial N_i}{\partial \eta}$  نیز از مشتق‌گیری توابع شکل  $N_i$  که در جدول ۶-۱ ارائه شده است، بدست

می‌آیند. در فرمول‌بندی ماتریس سختی، مشتقات توابع شکل در دستگاه مختصات کارتری یعنی  $\frac{\partial N_i}{\partial x}$

و  $\frac{\partial N_i}{\partial y}$  نیز مورد نیاز است. با استفاده از قوانین ریاضی (قانون زنجیره‌ای)، رابطه ذیل را می‌توان نوشت:

$$dN_i = \frac{\partial N_i}{\partial x} dx + \frac{\partial N_i}{\partial y} dy \quad (۱۰-۶)$$

مشتق‌گیری نسبی از رابطه (۱۰-۶) رابطه ذیل را منجر می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (۱۱-۶)$$

این رابطه را به فرم ذیل نیز می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (۱۲-۶)$$

### ۶-۲-۴- روابط جابجایی - کرنش

مؤلفه‌های کرنش  $(\varepsilon^T = \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy})$  در هر نقطه با استفاده از روابط زیر به جابجایی‌ها

مربوط می‌شوند [۲۷].

الف - تنش و کرنش صفحه‌ای<sup>۱</sup>:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (۱۳-۶)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy} = \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

(در مورد کرنش صفحه‌ای)  $\varepsilon_z = 0$

که در این روابط  $u$  و  $v$  میزان جابجایی در امتداد محورهای مختصات کارتری  $x$  و  $y$  می‌باشند.

<sup>۱</sup> -Plane Stress- Plane Strain



ب- تقارن محوری<sup>۱</sup>:

با فرض  $y$  به عنوان محور تقارن و محور  $x$  در راستای شعاعی، خواهیم داشت:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \varepsilon_{xx} \quad (\text{کرنش شعاعی}) \quad (۱۴-۶)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \varepsilon_{yy} \quad (\text{کرنش محوری})$$

$$\varepsilon_x = \frac{u}{x} = \varepsilon_{\theta} \quad (\text{کرنش حلقه ای یا مماسی})$$

با استفاده از رابطه (۱-۶) می توان مؤلفه های کرنش را بصورت تابعی از جابجایی گره ها نوشت. بدین ترتیب در مورد کرنش صفحه ای خواهیم داشت:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix} = B\delta \quad (۱۵-۶)$$

بطوری که دیده می شود، بعد ماتریس  $B$  برابر  $n \times 2$  است که در آن  $n$  تعداد گره ها در المان است. این ماتریس در عین حال شامل  $n$  زیر ماتریس  $B_i (i=1, \dots, n)$  با اندازه  $4 \times 2$  است که مؤلفه های آن به شکل ذیل است:

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۱۶-۶)$$

ضرورت تعیین  $\frac{\partial N_i}{\partial x}$  و  $\frac{\partial N_i}{\partial y}$  در بحث های قبلی، اکنون به خوبی روشن می شود.

<sup>۱</sup> -Axil-Symmetric

## ۶-۲-۵- رابطه تنش - کرنش

این رابطه حساسترین بخش مسأله است که در حالت کلی به شکل ذیل نوشته می‌شود:

$$\Delta\sigma = D_T \Delta\varepsilon \quad (۱۷-۶)$$

که در آن  $\sigma = (\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_z)^T$  بردار مؤلفه‌های تنش و  $\varepsilon$  نشانگر مؤلفه‌های متناظر کرنش است.  $D_T$  نیز یک ماتریس مربعی است که در مورد محیط‌های الاستیک مقدار آن ثابت است، اما در حالت کلی و در مورد رفتارهای غیر خطی مواد به مسیر تنش یا کرنش بستگی دارد. بطوری که دیده می‌شود، رابطه (۱۷-۶) افزایش تنش و کرنش را بیان می‌کند و بنابراین  $D_T$  نیز نشانگر ماتریس مدول مماسی مصالح است.

## ۶-۲-۶- معادلات سختی یک المان

همانند روش‌های مرسوم در تحلیل‌های ساختاری، در این مورد نیز ابتدا معادلات سختی برای

یک المان ارائه شده و آنگاه از بهم پیوستن آنها، معادله کلی ساختار حاصل می‌شود [۲۷].

یک المان مجزا از جسم در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که نیروی  $F^e$  اثر کننده بر هر یک از گره‌های آن بصورت زیر باشد:

$$F^e = \begin{bmatrix} F_{X_1} \\ F_{Y_1} \\ F_{X_2} \\ F_{Y_2} \\ \vdots \\ F_{X_n} \\ F_{Y_n} \end{bmatrix} \quad (۱۸-۶)$$

و جابجایی متناظر با هر کدام از گره‌ها  $\delta^e$  است که توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\delta^e = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (19-6)$$

بر اساس اصل کار مجازی<sup>۱</sup>، اگر جسمی به حالت تعادل باشد، کار انجام شده بوسیله نیروهای خارجی بواسطه مجموعه‌ای از تغییر مکان‌های مجازی ( $\delta^*$ ) بایستی برابر کاری باشد که بوسیله تنش‌های داخلی بواسطه کرنش‌های مجازی ( $\varepsilon^*$ ) که حاصل اعمال تغییر مکان‌های واقعی است، انجام می‌گیرد. با استفاده از این اصل خواهیم داشت:

$$(\delta^*)^T F^e = \int (\varepsilon)^T \sigma dv = \int (B \delta^*)^T \sigma dv \quad (20-6)$$

انتگرالگیری قسمت راست رابطه (۲۰-۶) روی حجم المان ( $V$ ) صورت گرفته است، اگر رابطه (۱۵-۶) را در رابطه (۲۰-۶) قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$F^e = \int B^T \Delta \sigma dv \quad (21-6)$$

باید توجه داشت که  $\delta^*$  تغییر مکان دلخواه مجازی است که حذف می‌شود تا معادله (۲۲-۶) را بدست دهد. رابطه (۲۲-۶) یک رابطه بسیار مهم است و برای محاسبه نیروهای گرهی معادل، ناشی از هر میدان تنش در حالت تعادل بکار می‌رود. همچنین رابطه (۲۱-۶) را به شکل نمودی ذیل نیز می‌توان نوشت:

$$\Delta F^e = \int B^T \Delta \sigma dv \quad (22-6)$$

که در آن  $\Delta$  معرف نمو متغیر است. با جایگذاری  $\Delta \sigma$  در رابطه (۲۲-۶) از رابطه (۱۷-۶) و با توجه به رابطه (۱۵-۶) خواهیم داشت:

$$\Delta F^e = \int B^T D_T \Delta \varepsilon dv \quad (23-6)$$

$$\Delta F^e = \int B^T D_T B \Delta \delta^e dv \quad (24-6)$$

<sup>۱</sup> -Principle of Virtual Work

$$\Delta F^e = K^e \Delta \delta^e \quad (۲۵-۶)$$

که در آن:

$$k^e = \int B^T D_T B dv \quad (۲۶-۶)$$

عبارت  $K^e$  به نام ماتریس سختی المان نامیده می‌شود. اگر  $D_T$  ثابت باشد،  $K^e$  نیز ثابت خواهد بود. اما در حالت کلی  $K^e$  معرف ماتریس سختی مماسی متغیر است و فقط به مقادیر مناسب  $\Delta \sigma$  و  $\Delta \varepsilon$  مربوط می‌شود.

در مسائل مکانیک سنگ، سنگ‌ها تحت تنش اولیه هستند. به عنوان مثال، قبل از آنکه تونلی در داخل سنگ‌ها حفر شود، توده سنگ تنش‌هایی را تحمل می‌کند که در تحلیل تنش‌ها باید در نظر گرفته شود. در این بررسی‌ها، معمولاً کرنش اولیه برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. این امر به سهولت نشان می‌دهد که تغییر شکل‌ها و کرنش‌های ناشی از اعمال بارها یا عملیات حفاری دنبال می‌شود. در بسیاری از موارد، به هنگام شبیه‌سازی حفاری‌ها، پیچ‌سنگ‌ها، تزریق و مسائل مشابه، کرنش موجود تا قبل از مرحله مورد نظر به عنوان کرنش اولیه در نظر گرفته می‌شود. به علاوه در برخی موارد، ممکن است کرنش اولیه به عللی غیر از تأثیر بارهای خارجی رخ دهد؛ به عنوان مثال ممکن است تغییرات دما، خزش، اشباع و یا مسایل مشابه آنها باشد. رابطه مشخصه (۶-۱۷) فقط برای تحلیل تنش و کرنش‌های ساختاری بکار می‌رود و شکل عمومی رابطه (۶-۱۶) به صورت زیر است:

$$\Delta(\sigma - \sigma_0) = D_T \Delta(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (۶-۲۷-الف)$$

در این رابطه  $\sigma_0$  و  $\varepsilon_0$  بترتیب تنش و کرنش اولیه می‌باشند. این رابطه به شکل زیر نیز نوشته می‌شود:

$$\Delta \sigma = D_T \Delta \varepsilon - D_T \Delta \varepsilon_0 + \Delta \sigma_0 \quad (۶-۲۷-ب)$$

اگر این رابطه در رابطه (۶-۲۲) قرار داده شود:

$$\Delta F^e = \int B^T D_T \Delta \varepsilon dv - \int B^T D_T \Delta \varepsilon_0 dv + \int B^T \Delta \sigma_0 dv \quad (۶-۲۸)$$

این رابطه را به شکل زیر نیز می‌توان نوشت:

$$K^e \Delta \delta^e = \Delta F^e + \int B^T D_T \Delta \varepsilon_0 dv - \int B^T \Delta \sigma_0 dv \quad (۶-۲۹)$$

$$K^e \Delta \delta^e = \Delta R^e \quad (۶-۳۰)$$

$$\Delta R^e = \Delta F^e + \int B^T D_T \Delta \varepsilon_0 dv - \int B^T \Delta \sigma_0 dv \quad (۶-۳۱)$$

$\Delta R^e$  نشانگر نیروهای گرهی معادل است که بر المان اثر می‌کنند. عبارتهای دوم و سوم در این رابطه بترتیب مربوط به کرنش‌ها و تنش‌های اولیه می‌باشند.  $\Delta R^e$  معمولاً تحت عنوان سمت راست<sup>۱</sup> نامگذاری می‌شود و شامل نیروهای معادل ناشی از تمام بارهای اعمالی است. فشارهای گسترده و نیروهای حجمی نیز در زمره نیروهای گرهی معادل قرار می‌گیرند و قبل از آنکه محاسبه تغییر مکان‌ها انجام گیرد، به  $\Delta R^e$  افزوده می‌شوند.

قبل از بررسی ترکیب سختی المان‌ها برای بدست آوردن سختی کلی<sup>۲</sup>، توضیح چندین ویژگی در مورد سختی المان ( $k^e$ ) لازم به نظر می‌رسد. سختی المان از رابطه (۶-۲۶) بدست می‌آید:

$$k^e = \int_V B^T D_T B dv \quad (۶-۲۶ \text{ - تکرار})$$

ماتریس  $B$  دارای بعد  $4 \times 2n$  می‌باشد که  $n$  تعداد گره‌ها در المان است. ماتریس  $B^T$  دارای بعد  $2n \times 4$  بوده و ماتریس آخری دارای بعد  $2n \times 2n$  خواهد بود. اگر مسأله سه‌بعدی باشد، ماتریس  $k^e$  دارای بعد  $3n \times 3n$  خواهد بود.

اگر و فقط اگر  $D_T$  متقارن باشد، در این صورت ماتریس سختی  $k^e$  نیز متقارن خواهد بود. در بسیاری از مسائل غیر خطی که  $D_T$  ممکن است متقارن نباشد، ماتریس‌های سختی المان و متعاقباً ماتریس سختی کلی جسم نیز متقارن نخواهد بود.

### ۶-۲-۷ - سختی کلی

در بحث گذشته رابطه سختی مربوط به یک المان از جسم ارائه شد. با استفاده از رابطه (۶-۲۶) سختی هر یک از المان‌ها محاسبه می‌شود (در مورد المان‌های ساده نظیر یک مثلث با کرنش ثابت، انتگرالگیری این رابطه بصورت تحلیلی و از طریق روش‌های ریاضی انجام می‌گیرد، اما در مورد المان‌های با مرتبه بالاتر، باید فنون انتگرالگیری عددی را بکار گرفت). برای ارائه ماتریس سختی کلی جسم، باید معادله سختی المان‌ها را با هم جمع کرد. اندازه این ماتریس متناظر با تعداد کلی درجات آزادی در تمام مش است. به عنوان مثال در مسائل دو بعدی، اندازه ماتریس دو برابر تعداد گره‌ها و در مورد مسایل سه‌بعدی سه برابر آنها است. گره‌هایی که در چند المان مشترک هستند، در معادله

<sup>۱</sup> -Right-Hand Side

<sup>۲</sup> -Global Stiffness

سختی تمام المان‌های مرتبط با گره نقش دارند. روش تلفیق معادلات سختی المان‌ها به منظور دستیابی به معادله سختی کلی، مشابه روش‌های متداول تحلیل سازه‌ها می‌باشد [۲۷].

طرف سمت راست معادلات سختی کلی نیز از تلفیق طرف‌های سمت راست بردار  $R^e$  و بر اساس اصول مکانیک سازه‌ها انجام می‌گیرد. در نهایت معادله سختی کلی به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$k\Delta\delta = \Delta R \quad (۳۲-۶)$$

که در آن  $\Delta\delta$  بردار مجهول نمو تغییر مکان گره‌ها در اثر نمو  $\Delta R$  در نیروها است. رابطه (۳۲-۶) به شکل نموی و با فرض تغییرپذیری  $k$  برای هر نمو بار نوشته شده است. اگر جسم رفتار الاستیک خطی داشته باشد،  $k$  ثابت بوده و رابطه (۳۲-۶) به شکل کلی زیر تبدیل می‌شود:

$$k\delta = R \quad (۳۳-۶)$$

### ۶-۲-۸- محاسبه نیروهای گرهی

در روش اجزاء محدود، تمام نیروها از قبیل نیروهای ناشی از وزن، دما، تنش یا کرنش‌های اولیه، فشار منفذی، پدیده‌های گریز از مرکز، اینرسی و موارد مشابه بصورت نیروهایی که در محل گره‌ها اثر می‌کنند، تبدیل می‌شوند. دربخش ۶-۲-۶ نشان داده شد که کرنش‌های اولیه  $(\Delta\varepsilon_0)$  توسط رابطه‌ای به نیروهای گرهی  $(\Delta R_{e0})$  تبدیل می‌شوند:

$$\Delta R_{e0}^e = \int B^T D_T \Delta\varepsilon_0 dv \quad (۳۴-۶)$$

و تنش‌های اولیه  $(\Delta\sigma_0)$  نیز با رابطه زیر به نیروهای گرهی  $(\Delta\sigma_{\sigma_0})$  تبدیل می‌شوند:

$$\Delta R_{\sigma_0}^e = \int B^T D_T \Delta\sigma_0 dv \quad (۳۵-۶)$$

همانطور که مشاهده می‌شود روابط (۳۴-۶) و (۳۵-۶) به صورت نموی می‌باشند.

در ذیل، به روابط مربوط به نیروهای گرهی معادل، ناشی از سایر عواملی که احتمالاً در مسائل مهندسی سنگ کاربرد دارند، اشاره شده است:

**الف - نیروهای جسمی:** نیروهای معادل ناشی از نیروهای حجمی برای یک المان

$$\left( R_h^e = \{R_{bx}, R_{by}\}^T \right) \text{ از روابط ذیل بدست می‌آیند:}$$

$$\Delta R_T^c = - \int B^T D_{T\Delta} \varepsilon_T dv \quad (39-6)$$

در این رابطه  $\Delta \varepsilon_T$  کرنش ناشی از تغییرات دما است که از رابطه ذیل حاصل می‌شود:

$$\Delta \varepsilon_T = \begin{bmatrix} a \\ a \\ 0 \\ a \end{bmatrix} \Delta \theta \quad (40-6)$$

به هنگام اعمال معادله مشخصه کلی (۵-۲۷-الف) و (۵-۲۷-ب) این کرنش نیز باید درج  $\varepsilon_0$  بصورت کرنش‌های اولیه افزوده شود.

### ۳-۶- روش اجزاء محدود سه‌بعدی

با توجه به آنچه که در مورد روش اجزاء محدود دوبعدی گفته شد، موارد مربوط به حالت سه‌بعدی طی همان مفاهیم قبلی بررسی خواهند شد [۲۷].

#### ۳-۶-۱- شکل المان‌ها

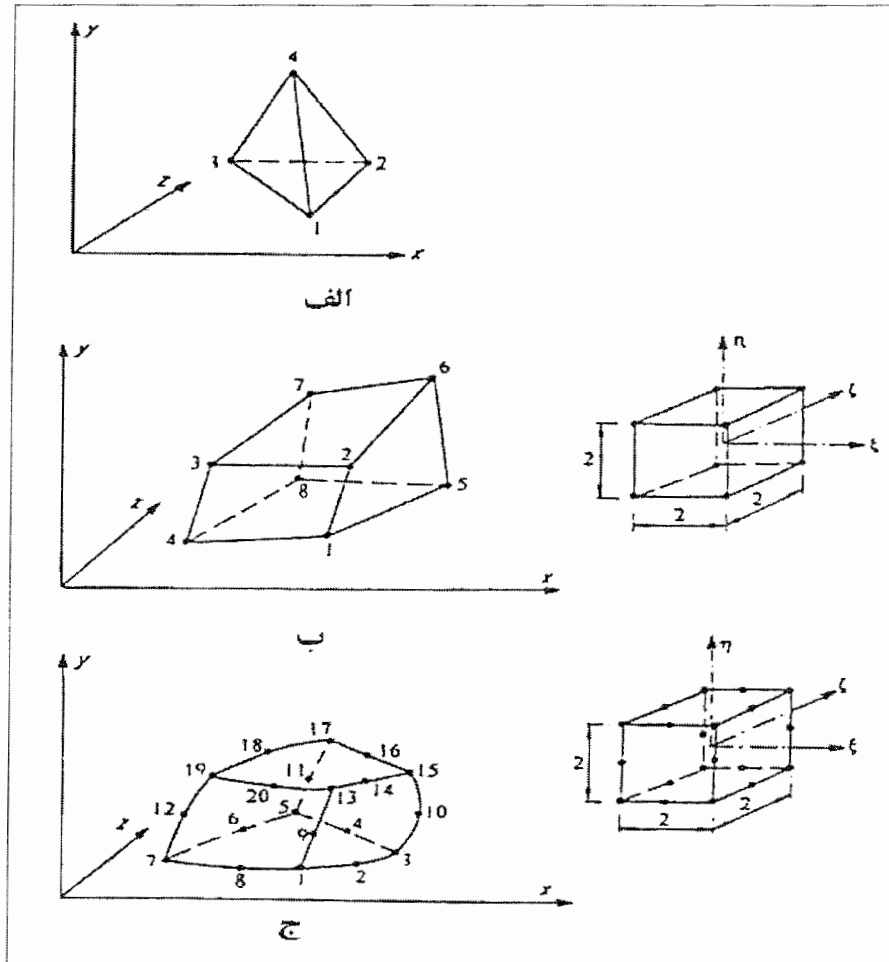
در این مورد نیز توده مورد بررسی به نواحی کوچک سه بعدی تفکیک می‌شود. معادل سه‌بعدی یک المان مثلثی یک چهار وجهی و معادل سه‌بعدی یک المان مستطیلی، یک المان مکعبی ۸ گرهی است. در شکل ۳-۶ المان‌های سه‌بعدی متداول در این روش نشان داده شده است.

#### ۳-۶-۲- مش اجزاء محدود

مسئله انتخاب و تشکیل مش در روش اجزاء محدود سه‌بعدی کار چندان ساده‌ای نیست. وجود برنامه‌های ویژه کامپیوتری که قادر باشند مش، تعداد گره‌ها و المان‌ها را تولید کنند، ضروری به نظر می‌رسد و این قبیل برنامه‌ها در حد تجاری موجود می‌باشند. ذکر این نکته جالب توجه است که حجم این قسمت از برنامه که کار شناسایی و انتخاب مش را در حالت سه‌بعدی بر عهده دارد، چندین برابر کل برنامه اجزاء محدود است.

در این مورد نیز اندازه و رده‌بندی المان‌ها در مش، بر مبنای گرادیان تنش مورد انتظار در مسأله انتخاب می‌شود. به بیان دیگر، در قسمت‌هایی که تمرکز تنش پیش‌بینی می‌شود، تعداد المان‌ها بیشتر

و اندازه آنها کوچکتر است و بر عکس در بخش‌هایی که پیش‌بینی می‌شود وضعیت تنش یکنواخت باشد، تعداد المان‌ها کمتر و ابعاد آنها بزرگتر است.



شکل ۳-۶- المان‌های متداول سه‌بعدی و تبدیل آنها در سیستم مختصات محلی

سه‌وجهی (الف)، مکعب ۸ گرهی (ب) و مکعب ۲۰ گرهی (ج) [۲۷]

### ۳-۳-۶- تابع شکل المان‌های سه‌بعدی

در این مورد نیز جابجایی در هر نقطه داخل المان به مختصات  $(u, v, w)$  به کمک تابع شکل  $(N_i)$  به میزان جابجایی‌ها در گره‌ها  $(u_1, v_1, w_1)$  مربوط می‌شود. در حالت کلی تابع شکل در دستگاه مختصات محلی  $(\xi, \eta, \zeta)$  تعریف می‌شود. همانند روش دوبعدی، رابطه بین جابجایی نقاط و گره‌ها بصورت رابطه (۴۱-۶) می‌باشد:



$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots \\ N_1 & 0 & N_1 & 0 & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (41-6)$$

توابع شکل مربوط به المان‌های چهار وجهی، المان‌های مکعبی ۸ گرهی و ۲۰ گرهی در ذیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### الف - چهار وجهی

در مورد المان‌های چهار وجهی بهتر است که تابع شکل در سیستم مختصات عمومی نوشته شود. با توجه به شکل (۶-۳-الف) تابع شکل چهار وجهی بصورت ذیل خواهد بود:

$$N_i = \frac{(a_i + b_i x + c_i y + d_i z)}{6V} \quad (42-6)$$

که در آن  $I = 1, 2, 3, 4$  و  $V$  حجم چهار وجهی است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$6V = \det \begin{vmatrix} 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \\ 1 & x_1 & y_1 & z_1 \end{vmatrix} \quad (43-6)$$

در رابطه (۴۲-۶) ضرایب  $a_i, b_i, c_i$  و  $d_i$  ثابت هستند. این مقادیر با چندین تعبیر از رابطه (۴۳-۶) حاصل می‌شوند. روش کار با استفاده از رابطه (۴۳-۶) با ذکر یک مثال توضیح داده خواهد شد. رابطه مشابه با رابطه (۴۳-۶) با قرار دادن مختصات گره‌ها در صفحه مقابل و درخلاف جهت عقربه‌های ساعت در ردیف‌های دوم، سوم و چهارم بدست می‌آید. دترمینان با قرار دادن مختصات گره برای توابع شکلی که در ردیف نخست لازم است، کامل می‌شود. رابطه (۴۳-۶) برای گره شماره ۲ نوشته شده است. زمانیکه دترمینان با استفاده از ردیف نخست بسط یابد،  $a_2, b_2, c_2$  و  $d_2$  مقادیر کوفاکتور می‌باشند. از این رو:

$$a_2 = \det \begin{vmatrix} x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_2 & z_4 \\ x_1 & y_1 & z_1 \end{vmatrix} \quad (44-6)$$

$$b_2 = -\det \begin{vmatrix} 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \\ 1 & y_1 & z_1 \end{vmatrix} \quad (45-6)$$

و بهمین ترتیب ادامه می‌یابد. با جایگذاری مقادیر  $a_i$  در رابطه (۴۲-۶)، توابع شکل  $N_1, N_2, N_3, N_4$  بصورت گسترده حاصل می‌شوند. بدین ترتیب جابجایی  $(u, v, w)$  در هر نقطه از داخل چهار وجهی از رابطه ذیل حاصل خواهد شد:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = [IN_1 \quad IN_2 \quad IN_3 \quad IN_4] \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \quad (46-6)$$

در این رابطه،  $I$  ماتریس مشخصه  $3 \times 3$  و  $u_1, v_1, w_1$  و موارد مشابه، جابجایی در گره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ هستند. توجه به این نکته لازم است که توابع شکل چهار وجهی در سیستم مختصات عمومی نوشته شده است.

### ب- المان مکعبی ۸ گرهی

توابع شکل برای المان‌های مکعبی هشت گرهی را می‌توان به آسانی در دستگاه مختصات محلی  $(\xi, \eta, \zeta)$  نوشت (شکل ۳-۶-ب). توابع شکل با تعمیم و درونیابی شکل توابع از روابط (۲-۶) بدست می‌آیند. اکنون جابجایی در هر نقطه از داخل المان، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = [IN_1 \quad IN_2 \quad \dots \quad IN_8] \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \cdot \\ u_8 \\ v_8 \\ w_8 \end{Bmatrix} \quad (47-6)$$

## ج- مکعب ۲۰ گرهی

در مورد این مکعب نیز می‌توان توابع شکل را در مختصات محلی  $(\xi, \eta, \zeta)$  نوشت (شکل ۳-۶-ج). این المان در واقع تعمیم یک المان سهمی‌وار هشت گرهی دوبعدی است. در این مورد نیز میزان جابجایی در هر نقطه از المان را می‌توان از رابطه ۴۸-۶ بدست آورد:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} IN_1 & IN_2 & \dots & IN_{20} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ u_{20} \\ v_{20} \\ w_{20} \end{bmatrix} \quad (48-6)$$

## ۶-۳-۴- تبدیل مختصات

در این مورد نیز هدف اصلی از تبدیل مختصات، تسهیل در انتگرالگیری برخی از انتگرال‌های مورد نیاز برای محاسبه ماتریس سختی المان‌ها است. واضح است که در این مورد، تابع حول حجم المان تغییر می‌کند و انتگرالگیری نیز حول حجم است [۲۷].

برای المان‌های چهار وجهی، توابع شکل در سیستم مختصات عمومی نوشته می‌شوند. بنابراین در مورد آنها نیازی به تبدیل مختصات نیست. برای المان‌های مکعبی هشت و بیست گرهی، شکل نامنظم اولیه (که ممکن است اضلاع آن منحنی‌وار و یا چهار گوشه‌های آن دوزنقه‌ای باشند)، بصورت مکعب‌های منظمی تبدیل می‌شود که هر سه بعد آنها برابر دو واحد است، در این صورت انتگرالگیری تابعی مثل  $f(\xi, \eta, \zeta)$  در محدوده  $-1$  تا  $+1$  انجام خواهد شد، بنابراین:

$$F = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} f(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \quad (49-6)$$

این انتگرالگیری به مراتب آسان‌تر از انتگرالگیری روی جسم نامنظم اولیه است. در این مورد نیز با همان روشی که در مورد المان‌های دوبعدی گفته شد، توابع شکل المان‌ها برای تبدیل مختصات بکار می‌روند؛ بنابراین مختصات نقطه‌ای در داخل المان در سیستم مختصات عمومی از روابط ذیل حاصل می‌شود:

$$x = \sum_{i=1}^n N_i x_i \quad (50-6)$$

$$y = \sum_{i=1}^n N_i y_i$$

$$z = \sum_{i=1}^n N_i z_i$$

که در این روابط  $x_i, y_i, z_i$  مختصات گره‌های المان و  $n$  تعداد گره‌ها است. باید توجه داشت که رابطه فوق در واقع تعمیم رابطه دوبعدی (۶-۶) است.

جز حجمی  $dv$  المان از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$dv = dx dy dz = |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (51-6)$$

که ماتریس ژاکوبین دارای اندازه  $3 \times 3$  بوده و از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (52-6)$$

مشتقات توابع شکل نسبت به سیستم مختصات عمومی کارترین، از روابط ذیل حاصل می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (53-6)$$

### ۶-۳-۵- رابطه کرنش - جابجایی

در تحلیل سه‌بعدی، کرنش‌ها  $(\varepsilon^T = \varepsilon_x, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx})$  در هر نقطه محیط پیوسته از جابجایی

آن نقطه و با استفاده از رابطه ذیل بدست می‌آیند [۲۷].

$$\varepsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x}, \quad \varepsilon_z = \frac{\delta v}{\delta y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\delta w}{\delta z} \quad (54-6)$$

$$\gamma_{xy} = \left( \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \right), \quad \gamma_{yz} = \left( \frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y} \right), \quad \gamma_{zx} = \left( \frac{\delta w}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta z} \right)$$

بنابراین بسته به نوع المان مورد استفاده، کرنش در هر نقطه را می‌توان به عنوان تابعی از تغییر مکان‌های گره‌ها از روابط (۶-۴۶) یا (۶-۴۷) یا (۶-۴۸) بدست آورد و در حالت کلی:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_3 \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \\ w_n \end{bmatrix} \quad (۶-۵۵)$$

در این رابطه B ماتریس با ابعاد  $6 \times 3n$  است که در آن n تعداد گره‌های المان می‌باشد. ماتریس B مشتمل بر n زیر ماتریس  $B_i (i = 1, 2, \dots, n)$  با مرتبه  $6 \times 3$  است که مؤلفه‌های آن به شرح ذیل است:

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (۶-۵۶)$$

### ۶-۳-۶- روابط تنش - کرنش

این رابطه نیز همانند رابطه حالت دوبعدی است، با این تفاوت که اندازه ماتریس مورد نظر در این حالت  $6 \times 6$  است.

### ۶-۳-۷- معادلات سختی یک المان

معادلات سختی المان دقیقاً با همان روش دوبعدی بدست می‌آیند. نتیجه نهایی آن به شرح

ذیل است:

$$k^e \Delta \delta^e = \Delta R^e \quad (۶-۵۷)$$

که در آن  $R^e$  نشانگر نیروهای گرهی در امتداد محورهای  $x, y, z$  و  $\delta^e$  تغییر مکان‌های گرهی متناظر است. این دو مشخصه به شرح ذیل هستند:

$$R^e = \begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \\ F_{zn} \end{bmatrix} \quad \delta^e = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \\ w_n \end{bmatrix} \quad (58-6)$$

ماتریس سختی المان‌ها  $k^e$  نیز بصورت زیر است:

$$K^e = \int B^T D_T B dv \quad (59-6)$$

که در آن  $B$  و  $D_T$  ماتریس‌هایی هستند که قبلاً بحث شده‌اند. اندازه آنها در حالت سه‌بعدی متفاوت است. به بیان دیگر اندازه ماتریس  $B^T$  در این مورد  $3n \times 6$ ، اندازه ماتریس  $D_T$  برابر  $6 \times 6$  و اندازه ماتریس  $B$  برابر  $6 \times 3n$  است، بنابراین ماتریس  $K^e$  از مرتبه  $3n \times 3n$  خواهد بود.

### ۶-۳-۸ - سختی کل و محاسبه نیروهای گرهی

نحوه ارائه معادله سختی کلی از تلفیق معادلات سختی المان‌ها همانند روش دوبعدی و بر مبنای قوانین تحلیل سازه‌ها انجام می‌گیرد. همچنین معادلات مربوط به نیروهای ناشی از وزن، دما، تنش و کرنش‌های اولیه و موارد مشابه نیز همان روابطی است که قبلاً در مورد حالت دوبعدی بیان شد. بدیهی است به هنگام کاربرد روابط یاد شده، باید اندازه ماتریس‌ها را به حالت سه‌بعدی تغییر داد و همچنین در نظر داشت که نیروهای مورد نظر در این حالت دارای سه مؤلفه در امتدادهای  $x, y$  و  $z$  خواهند بود.

## **Abstract**

More studies are required than conventional methods for considering excavation of shallow twin tunnels in town areas and soft ground under groundwater surface. There are various studies about stability effect of twin tunnels excavation on each other and so, the optimum distance relations between these tunnels. But there is no widely works on twin tunnels face distance and determination of optimum face distance.

Our study area is one section of Shiraz metro phase 1, between GOL-E-SORAKH Sq. and MOTAHHARI subway with length of 15 kilometers that is excavated by using two EPBs. There are two tunnels in this phase with diameters of 6.88 meters, center to center distance of 15 meters and average deep of 10 meters. These tunnels are below of groundwater surface and originally in silt clay soils.

There is necessary distance between two faces for reduction stresses and having equivalent condition in surrounding area. In this thesis, these twin tunnels are modeled by PLAXIS 3D TUNNEL software base on 3 dementias limit distinct numerical method. In first step, essential pressure for stabilization of tunnel face is calculated. The next steps, are determined optimum distance between faces by analyzing displacement - levels and other graphs after numerical modeling.