دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

پیش‌بینی اثرات مخرب حفر ایستگاه‌های زیرزمینی مترو خط ۷

امیر خادمیان

اساتید راهنما :

دکتر محمد عطایی

دکتر فرهنگ سرشکی

اساتید مشاور :

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

مهندس محمد رضا بیطرفان

شهریور ۹۰

بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج

پیش بینی اثرات مخرب حفر ایستگاه‌های زیرزمینی مترو خط ۷

دانشجو : امیر خادمیان

اساتید راهنما :
دکتر محمد عطایی
دکتر فرهنگ سرشکی

اساتید مشاور :
دکتر سید محمد اسماعیل جلالی
مهندس محمد رضا بیطرفان

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۹۰

تقدیم به :

پدرم، که آسمان نیلی قلب پر مهرش بی‌افق

و

مادرم، که دریای عمیق محبت و ایثارش بی ساحل است

تشکر و قدردانی

سپاس یگانه یکتای هستی را، که بندگان حقیرش را در راه رشد و تعالی، بهترین یاور است. مجموعه حاضر حاصل الطاف و توجهات کسانی که قدردانی از آنان را وظیفه خود می‌دانم. بر خود لازم می‌دانم که در ابتدا از زحمات پدر و مادر عزیزم و تک‌تک اعضای خانواده‌ام که همواره مشوق و تکیه‌گاه تلاش‌های من در زندگیم بوده‌اند تقدیر و تشکر کنم.

از استادان ارجمند، جناب آقای دکتر محمد عطایی، جناب آقای دکتر فرهنگ سرشکی و جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی که راهنمایی‌های بی‌دریغ و ارزشمند ایشان راهگشای بنده در تهیه این پایان‌نامه بوده است صمیمانه سپاس‌گزاری می‌کنم.

از مدیریت شرکت مهندسی سپاسد و کلیه کارکنان آن نیز که امکان انجام این تحقیق را برای اینجانب فراهم کردند تقدیر و تشکر می‌کنم. همچنین از جناب آقای مهندس محمد رضا بیطرفان کارشناس ارشد شرکت مهندسی سپاسد به خاطر همکاری صمیمانه در تهیه اطلاعات مورد نیاز و راهنمایی‌های سودمندشان کمال تشکر و سپاس را دارم.

در پایان، سربلندی، موفقیت و بهروزی همگان را از خداوند متعال خواستارم.

چکیده

حفر فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری علاوه برچالش‌های مهندسـی و اجرایـی فـراوان، همـواره مخاطراتی را از لحاظ اثرات مخرب ناشی از حفر این فضاها به‌خصوص در سطح زمـین بـه دنبـال دارد. مهمترین این اثرات شامل پدیده نشست سطح زمین و آسیب و ناپایـداری سـازه‌هـای سـطحیماننـد ساختمان‌ها، برج ها می‌شود. از این‌رو شناسایی این پدیده‌ها و قـوانین حـاکم بـر آنهـا و بـه دنبـال آن پیش‌بینی و کنترل آنها بخش مهمی از طراحی پـروژه‌هـای زیرزمینـی در محـیط شـهری را بـه خـود اختصاص داده و از این نظر اهمیت فراوانی دارند.

هدف این مطالعه پیش‌بینی میزان نشست و خسارات ساختمان‌های سطحی ناشی از حفر ایستگاه‌های زیرزمینی خط ۷ مترو تهران است. در این پایان نامه ابتدا پدیده نشست و ویژگی‌های آن معرفی شـده و سپس به تفصیل بـه معرفـی روش‌هـای مختلـف پـیش‌بینـی میـزان نشسـت پرداختـه شـده اسـت. بررسی‌های انجام شده نشان داده است که روش‌های پیش‌بینی تغییرشکل‌های زمین را می‌توان در سه گروه کلی تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی نمود. در ادامه به بررسی روش‌های پیش‌بینی خسارات ساختمان‌ها پرداخته شده است. آنچه از این بخـش حاصـل شـده اسـت، ارائـه رویکـردی اسـتاندارد و مشخص برای برآورد و رده‌بنـدی خسـارات سـاختمان‌هـای سـطحی اسـت. سـپس از طریـق مطالعـه مقدماتی ریسک خسارات، ایستگاه‌هایی که وضعیت بحرانی‌تری داشته انتخاب و مطالعـات بعـدی روی آنها متمرکز شده است. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D میزان نشست در ایستگاه‌ها محاسبه شده و از طریق آنها برای ساختمان‌های سطحی رده‌بندی ریسک انجام شده اسـت. در انتهـا مشـخص گردید که رده خسارتی تمامی این ساختمان‌ها در محدوده ناچیز و اندک طبقه‌بندی می‌شود.

کلمات کلیدی : نشست، خسارت ساختمان، مترو خط ۷، FLAC3D

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه ۱
۱-۱. مقدمه ۲
۱-۲. اهداف مطالعه ۳
۱-۳. ضرورت انجام مطالعه ۴
۱-۴. ساختار پایان نامه ۵
فصل دوم : نشست و روش‌های پیش‌بینی آن ۷
۲-۱. مقدمه ۸
۲-۲. مفهوم نشست ۹
۲-۳. نشست در اثر حفر فضای زیرزمینی در مناطق کم عمق ۱۰
۲-۴. علل نشست زمین در اثر حفاری ۱۱
۲-۵. مکانیزم نشست در ضمن پیشروی حفر تونل ۱۲
۲-۵-۱. شرایط زمین ۱۳
۲-۵-۲. روش حفاری ۱۴
۲-۵-۳. ابعاد تونل ۱۴
۲-۵-۴. عمق تونل ۱۵
۲-۵-۵. حالت میدان تنش برجا ۱۵
۲-۶. روش‌های پیش‌بینی نشست ۱۵
۲-۷. روش‌های تجربی و احتمالاتی ۱۸
۲-۷-۱. نشست سطحی ۱۹
۲-۷-۱-۱. رفتار عرضی ۱۹
۲-۷-۱-۲. رفتار طولی ۲۲
۲-۷-۱-۳. افت حجم ۲۳
۲-۷-۱-۴. پارامتر عرض گودی نشست ۲۷
۲-۷-۲. نشست زیرسطحی ۲۸
۲-۸. روش‌های تحلیلی ۳۵
۲-۸-۱. روش لُگانازان و پولوس ۳۶
۲-۹. روش‌های عددی ۴۴
۲-۱۰. جمع‌بندی ۴۶
فصل سوم : پیش‌بینی خسارات سازه‌های سطحی ۴۷
۳-۱. مقدمه ۴۸

۳-۲. تعریف تغییرشکل ساختمان ۴۸
۳-۳. ارزیابی ریسک خسارت ۵۰
۳-۳-۱. ارزیابی مقدماتی ۵۰
۳-۳-۲. ارزیابی مرحله دوم ۵۱
۳-۳-۳. ارزیابی تفصیلی ۵۲
۳-۴. رده‌بندی خسارات ۵۳
۳-۵. مفهوم کرنش بحرانی ۵۶
۳-۶. محاسبه کرنش ساختمان ۵۷
۳-۷ . اندرکنش خاک سازه ۶۲
۳-۸. جمع‌بندی ۶۳
فصل چهارم : مطالعه مقدماتی ریسک خسارت ساختمان‌ها در محدوده ایستگاه‌های فاز ۱ ۶۴
۴-۱. مقدمه ۶۵
۴-۲. معرفی خط ۷ مترو تهران ۶۵
۴-۳. بررسی مقدماتی ریسک خسارات ۶۶
۴-۳-۱. ایستگاه N7 ۶۷
۴-۳-۲. ایستگاه O7 ۶۸
۴-۳-۳. ایستگاه p7 ۶۹
۴-۳-۴. ایستگاه Q7 ۷۱
۴-۳-۵. ایستگاه R7 ۷۳
۴-۳-۶. ایستگاه S7 ۷۴
۴-۳-۷. ایستگاه T7 ۷۵
۴-۳-۸. ایستگاه U7 ۷۶
۴-۴. جمع‌بندی ۷۸
فصل پنجم : تخمین و رده‌بندی خسارات ساختمان‌ها در محل ایستگاه‌های O7 ، P7 و Q7 ۷۹
۵-۱. مقدمه ۸۰
۵-۲. ارزیابی ریسک خسارات ۸۰
۵-۳. انتخاب روش عددی مناسب ۸۲
۵-۳-۱. روش‌های مدل‌سازی ۸۲
۵-۳-۲. انتخاب مناسب‌ترین روش عددی ۸۴
۵-۳-۳. انتخاب نرم‌افزار مناسب ۸۵

۵-۴. تحلیل ایستگاه O7 .... ۸۶
۵-۴-۱. هندسه مدل ۸۷
۵-۴-۲. خصوصیات مصالح ۹۱
۵-۴-۳. شرایط مرزی ۹۳
۵-۴-۴. تنش‌های برجا ۹۴
۵-۴-۵. تاریخچه‌ها ۹۵
۵-۴-۶. تحلیل مدل ۹۵
۵-۴-۷. ارزیابی ریسک ۱۰۱
۵-۵. تحلیل ایستگاه P7 .... ۱۰۴
۵-۵-۱.تحلیل مدل ۱۰۶
۵-۵-۲. ارزیابی ریسک ۱۰۹
۵-۶. تحلیل ایستگاه Q7 .... ۱۱۰
۵-۶-۱. هندسه مدل ۱۱۲
۵-۶-۲. تحلیل مدل ۱۱۵
۵-۶-۳. ارزیابی ریسک ۱۱۷
۵-۷. جمع‌بندی ۱۱۸
فصل ششم : نتایج و پیشنهادات ۱۱۹
نتایج ۱۲۰
پیشنهادات ۱۲۱
فهرست منابع ۱۲۳
پیوست ۱۲۷

فهرست اشکال

شکل ۲-۱. حالت تیپیک جابه‌جایی ذرات در بالا و دیواره‌های تونل ۱۳
شکل ۲-۲. تغییرشکل معمولی زمین ناشی از تونل‌سازی سپری ۱۶
شکل ۲-۳. برآمدگی سطح زمین در جلوی حفار در نتیجه تعادل حجم مثبت ۱۶
شکل ۲-۴. گودی نشست عرضی ۲۰
شکل ۲-۵. توزیع جابه‌جایی سطحی افقی و کرنش در جهت عرضی همراه با گودی نشست ۲۱
شکل ۲-۶. مقطع طولی نشست ۲۲
شکل ۲-۷. روابط مختلف بین عدد پایداری و افت حجم ۲۵
شکل ۲-۸. رابطه بین افت حجم و فاکتور بار، تعیین شده از آزمایش‌های تفکیکی و آنالیزهای المان محدود ۲۶
شکل ۲-۹. همبستگی بین پارامتر عرض گودی نشست و عمق تونل ۲۸
شکل ۲-۱۰. تغییر پارامتر عرض گودی نشست زیرسطحی i با عمق ۲۹
شکل ۲-۱۱. تغییرات مقدار K برای نشست زیرسطحی نسبت به عمق ۳۰
شکل ۲-۱۲. نشست زیرسطحی در بالای خط مرکزی تونل ۳۱
شکل ۲-۱۳. (الف) توزیع پارامتر i نسبت به عمق برای نشست زیرسطحی (ب) تمرکز بردارهای جابه‌جایی خاک ۳۴
شکل ۲-۱۴. تغییر بیضوی شکل زمین پیرامون مقطع تونل ۳۶
شکل ۲-۱۵. شبیه‌سازی افت خاک (پارامتر فاصله) ۳۷
شکل ۲-۱۶. تعریف پارامتر فاصله ۳۹
شکل ۲-۱۷. فشارهای عمل‌کننده روی تونل حین حفاری ۴۰
شکل ۲-۱۸. الگوی تغییرشکل زمین و شرایط مرزی افت خاک ۴۱
شکل ۲-۱۹. جابه‌جایی خاک به طرف تونل ۴۲
شکل ۲-۲۰. الگوی تغییرشکل بیضوی زمین در اطراف تونل ۴۲
شکل ۳-۱. تعریف تغییر شکل ساختمان ۴۹
شکل ۳-۲. نمودار شماتیک مربوط به رویکرد سه مرحله‌ای ارزیابی ریسک خسارت ۵۱
شکل ۳-۳. نشست ساختمان شهرداری لندن ناشی از تونل‌سازی ۵۳
شکل ۳-۴. ایجاد ترک در یک تیر ساده در حالتهای متفاوتی از تغییرشکل ۵۸
شکل ۳-۵. رابطه بین $\Delta/B\varepsilon_{crit}$ و B/H برای یک تیر مستطیلی تغییرشکل یافته تحت خمش و برش. تار خنثی در وسط قرار گرفته است ۵۹

شکل ۳-۶. رابطه بین $\Delta/B\varepsilon_{crit}$ و B/H برای تیر مستطیلی تغییرشکل یافته تحت خمش وبرش. تار خنثی در کف قرار دارد ۶۰
شکل ۳-۷. رابطه بین خطا با تغییرشکل زاویه‌ای و کرنش افقی ۶۱
شکل ۳-۸. رابطه بین رده‌بندی خسارت با نرخ تغییرشکل و کرنش افقی برای ناحیه بالارونده ($B/H = 1$) ۶۲
شکل ۴-۱. موقعیت خط ۷ مترو تهران و ایستگاه‌های فاز ۱ .... ۶۶
شکل ۴-۲. محل احداث ایستگاه N7 .... ۶۸
شکل ۴-۳. محل احداث ایستگاه O7 .... ۶۹
شکل ۴-۴. محل احداث ایستگاه P7 .... ۷۰
شکل ۴-۵. محل احداث ایستگاه Q7 .... ۷۲
شکل ۴-۶. محل احداث ایستگاه R7 .... ۷۴
شکل ۴-۷. محل احداث ایستگاه S7 .... ۷۵
شکل ۴-۸. محل احداث ایستگاه T7 .... ۷۶
شکل ۴-۹. خلاصه نتایج فصل ۴ .... ۷۷
شکل ۵-۱. روش‌های عددی در ژئومکانیک ۸۳
شکل ۵-۲. موقعیت ساختمان‌ها نسبت به ایستگاه O7 .... ۸۷
شکل ۵-۳. هندسه ایستگاه در مدل ایجاد شده ۸۸
شکل ۵-۴. هندسه قطعه اول و دوم ایستگاه ۹۰
شکل ۵-۵. نمودار حداکثر نیروی نامتعادل ۹۶
شکل ۵-۶. نمودار سرعت نقطه گرهی ۱۱۰۸۶ .... ۹۷
شکل ۵-۷. نمودار جابجایی نقطه گرهی ۲۵۶۹۹۸ .... ۹۷
شکل ۵-۸. مقدار نشست تخمینی قبل از اصلاح مدل ۹۹
شکل ۵-۹. مقدار نشست تخمینی بعد از اصلاح مدل ۱۰۰
شکل ۵-۱۰. میزان نشست در نقطه مرجع ۴ .... ۱۰۱
شکل ۵-۱۱. موقعیت ساختمان‌ها نسبت به ایستگاه P7 .... ۱۰۵
شکل ۵-۱۲. میزان نشست در نقطه مرجع ۲ در محدوده ایستگاه P7 .... ۱۰۹
شکل ۵-۱۳. موقعیت ساختمان‌ها نسبت به ایستگاه Q7 .... ۱۱۱
شکل ۵-۱۴. مقایسه مقطع تونل توحید در حالت حقیقی با مقطع آن در مدل ۱۱۳
شکل ۵-۱۵. میزان نشست در نقطه مرجع ۱ در ایستگاه Q7 .... ۱۱۷

فهرست جداول

جدول ۳-۱. رده‌بندی خسارت ظاهری دیوارها بر مبنای سهولت تعمیرات گچ‌کاری و آجرکاری ساختمان ۵۵
جدول ۳-۲. رابطه بین رده خسارتی و کرنش کششی محدودکننده ۵۷
جدول ۴-۱. مشخصات ایستگاه N7 ..... ۶۷
جدول ۴-۲. مشخصات ایستگاه O7 ..... ۶۹
جدول ۴-۳. مشخصات ایستگاه P7 ..... ۷۰
جدول ۴-۴. مشخصات ایستگاهQ7 ..... ۷۱
جدول ۴-۵. مشخصات ایستگاه E4R7 ..... ۷۳
جدول ۴-۶. مشخصات ایستگاه S7 ..... ۷۴
جدول ۴-۷. مشخصات ایستگاه R6T7 ..... ۷۵
جدول ۴-۸. مشخصات ایستگاه U7 ..... ۷۷
جدول ۵-۱. خصوصیات مصالح در مدل‌سازی ایستگاه O7 ..... ۹۳
جدول ۵-۲. میزان نشست در نقاط مرجع ایستگاه O7 ..... ۱۰۱
جدول ۵-۳. نتایج ارزیابی ریسک ساختمان‌ها در محدوده ایستگاه O7 ..... ۱۰۴
جدول ۵-۴. میزان نشست در نقاط مرجع ایستگاه P7 ..... ۱۰۹
جدول ۵-۵. نتایج ارزیابی ریسک ساختمان‌ها در محدوده ایستگاه P7 ..... ۱۱۰
جدول ۵-۶. میزان نشست در نقاط مرجع ایستگاه Q7 ..... ۱۱۷
جدول ۵-۷. نتایج ارزیابی ریسک ساختمان‌ها در محدوده ایستگاه Q7 ..... ۱۱۸

فصل اول

مقدمه

۱-۱. مقدمه

امروزه با پیشرفت فن‌آوری، سهولت نسبی در حفاری و ساخت سازه‌های زیرزمینی، محدودیت فضاهای سطحی برای اجرای طرح‌های عمرانی و نیز به‌واسطه مسائل سیاسی و امنیتی، توجه بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه به احداث سازه‌های زیرزمینی برای کاربردهای عمرانی، نظامی و معدنی معطوف شده است. راه‌ها و بزرگراه‌های زیرزمینی، انواع تونل‌ها، شبکه متروی شهری، معادن، پناهگاه‌ها، انبارها، نیروگاه‌ها و مخازن زیرزمینی، تعدادی از سازه‌هایی هستند که در کشورهای مختلف به سرعت در حال ساخت و اجرا می‌باشند. در این میان آن دسته از فضاهای زیرزمینی که در محیط‌های شهری حفر و احداث می‌شوند از برخی جهات اهمیت بیشتری دارند. مراجعه به گزارش‌های موجود مربوط به فضاهای زیرزمینی کم‌عمق در سراسر دنیا نشان می‌دهد که با چه اهمیت و دقتی به بررسی اثرات احتمالی حفر این فضاها بر سطح زمین پرداخته شده است. بدیهی است که بی‌توجهی به این موضوع ممکن است موجب ایجاد زیان‌های جبران‌ناپذیری به ساختمان‌ها و تأسیسات واقع بر سطح زمین گردد. لذا امروزه در بیشتر پروژه‌های تونل‌سازی و ساخت مترو به خصوص در محیط شهری، بخشی از فعالیت‌های طراحی معطوف به این موضوع می‌شود.

مسئله نشست در اثر حفر فضاهای زیرزمینی به عنوان یکی از این عوامل تابع عوامل و شرایط اجرایی، در ضمن و پس از آن می‌باشد. به طور خلاصه روش حفاری، وجود آب زیرزمینی، وجود یا عدم وجود هوای فشرده در ضمن کار،کاربرد سپر در زمین‌های خاکی، زمان‌بندی مراحل حفاری، نوع نگهداری اولیه و نهایی، ابعاد و شکل مقطع تونل و در مواردی اجرای تزریق و عوامل دیگر در کنترل نشست سطح زمین نقش دارند که انتخاب بهترین ترکیب از این عوامل می‌تواند اجرای پروژه را با کمترین آسیب و با موفقیت به پایان برساند. مسئله نشست در سطح زمین، هرچند به کرات مشاهده شده است ولی به علت اینکه به خودی خود خطرات جانی زیادی به بار نمی‌آورد، زیاد مورد توجه قرار نمی‌گیرد.

خسارت و ناپایداری احتمالی ساختمان‌های سطحی نیز از دیگر پدیده‌های نامطلوب ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری است. میزان این خسارات ممکن است از مواردی جزیی مانند ترک‌هایی در نازک‌کاری و یا نمای بیرونی سازه شروع شده و با کج شدگی قاب درب‌ها و پنجره‌ها، کج‌شدگی دیوارها و کف‌ها ادامه پیدا کرده و یا در موارد حادتر با ناپایداری و ریزش کل سازه خاتمه یابد. میزان اهمیت هریک از این رده‌های خسارتی نیز از یک ساختمان تا ساختمان دیگر با توجه به کاربری آن‌ها متفاوت است. به عنوان مثال در ساختمانی که از لحاظ تاریخی و فرهنگی حائز اهمیت است، ترک‌هایی ریز در بدنه ساختمان نیز می‌تواند فاجعه‌ای جبران‌ناپذیر محسوب شود. لذا مطالعه این مورد نیز از اهمیت بسزایی برخوردار است.

تاکنون به منظور مطالعه هر یک از دو پدیده بالا به عنوان مهمترین اثرات نامطلوب ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی تلاش‌های بسیاری شده است. حاصل این تلاش‌ها تکمیل، رشد و توسعه روش‌های مختلف اعم از تجربی، تحلیلی و عددی بوده است. مسلماً می‌توان با بکارگیری کامل‌ترین این روش‌ها گام بلندی در راستای شناخت، پیش‌بینی و جلوگیری از این اثرات مخرب برداشت.

۱-۲. اهداف مطالعه

هدف اصلی از انجام این پایان‌نامه پیش‌بینی و رده‌بندی خسارات وارده به ساختمان‌ها، ناشی از حفر و احداث ایستگاه‌های خط ۷ مترو تهران در مناطق پرخطر آن می‌باشد. ایستگاه‌هایی که هدف مطالعات قرار گرفته‌اند، ایستگاه‌های فاز ۱ بخش شمالی-جنوبی خط ۷، حد فاصل ایستگاه N7 (بریانک) تا ایستگاه U7 (پارک گفتگو) می‌باشد. شیوه کار بدین صورت است که ابتدا به واسطه یک مطالعه ریسک مقدماتی، بر روی ایستگاه‌های پر خطر و بحرانی‌تر متمرکز شده و سپس این ایستگاه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. شیوه اصلی تحلیل در این مطالعه بر پایه روش‌های عددی (تفاضل محدود) و از طریق نرم افزار FLAC3D نسخه سوم می‌باشد. در پایان سعی شده است به دنبال پیش‌بینی نشست ناشی از حفر ایستگاه ، رده‌های خسارتی ساختمان‌ها در هر ایستگاه تعیین شود.

۱-۳. ضرورت انجام مطالعه

همواره یکی از معضلات زندگی شهری در قرن گذشته مسئله حمل‌ونقل بوده است. تمرکز جمعیت در شهرهای بزرگ منجر به توسعه نیاز حمل‌ونقل شده است. در بسیاری موارد این نیاز به درستی پاسخ داده نشده است و افزایش وسایل نقلیه در کلان‌شهرها نه تنها گرهی از این مشکل باز نکرده، بلکه بر عمق آن نیز افزوده است. این دغدغه مدیران شهری را بر آن داشته که بیش از پیش به موضوع حمل‌ونقل عمومی درون شهری، به عنوان راهکاری برای حل این معضل، توجه ویژه داشته باشند. با این حال گاهی اضافه شدن بار حمل‌ونقل عمومی بر شریان‌های ارتباطی شهر منجر به افزایش ترافیک نیز می‌شود. در این جاست که منطق انتقال حمل و نقل عمومی به زیر سطح شهر اهمیت یافته و جلوه می‌کند. راه‌آهن شهری (مترو) یکی از مصادیق بارز این موضوع است که در بسیاری موارد با گذر از زیر بافت شهر، بار بزرگی از حمل‌ونقل عمومی را در کلان‌شهرها بر دوش می‌کشد.

احداث مترو در کلان‌شهرها، در بسیاری از موارد نیازمند حفر فضاهای زیرزمینی می‌باشد. احداث این فضاها در زمره دقیق‌ترین و حساس‌ترین پروژه‌های عمرانی قرار می‌گیرند. آنچه در احداث فضاهای زیرزمینی اغلب چالش برانگیز است، چگونگی حفر فضاها و سپس پایدارسازی آنان است. در حالی که حفر این فضاها در محیط‌های شهری علاوه بر چالش‌ها و مخاطرات مذکور، حساسیت‌های دیگری نیز به دنبال دارد. در نواحی شهری این فضاها باید به نحوی ساخته و احداث شوند که کمترین اثر منفی را بر بافت و زندگی شهری داشته باشند. با این حال بسیاری از این اثرات و مخاطرات اجتناب ناپذیر بوده و تنها می‌توان با شناسایی و مقابله با آنها، تا حد امکان از اثرات آنها کاست.

از میان تمامی مخاطرات و اثرات نامطلوب شناخته شده ناشی از احداث فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری دو پدیده نشست و ناپایداری سازه‌های سطحی از اهمیت بسیار زیادی برخوردارند. با وجود آنکه پدیده نشست در محیط‌های غیر شهری نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد، اما اثرات آن در محیط‌های شهری بسیار مهم‌تر است. اهمیت پدیده نشست آن هنگام دو چندان می‌شود که بدانیم

ناپایداری سازه‌های سطحی نیز از آن اثر می‌پذیرد. بی‌شک عدم مطالعه دقیق روی هر یک از دو عامل مذکور در پروژه‌های زیرزمینی می‌تواند اثرات و خسارات جبران ناپذیر مالی و جانی را به همراه داشته باشد. تجربه اندک حفر فضاهای زیرزمینی در محیط شهری در کشور ما شاهدی بر این موضوع است که اثرات نامطلوب این دو پدیده گاه چنان شدید بوده است که ماهیت کل یک پروژه شهری را زیر سؤال برده و سبب ایجاد دید اجتماعی منفی در سطح جامعه نسبت به آن پروژه خاص گردیده است.

یکی از پروژه‌هایی که هم‌اکنون در کشور ما در حال اجراست، پروژه خط ۷ مترو تهران است. موقعیت مکانی این خط به گونه‌ای است که به ناچار کل این خط به صورت زیرزمینی می‌بایست حفر شود. فضاهای زیرزمینی ایجاد شده برای این خط مترو شامل تونل‌ها و ایستگاه‌ها می‌شود. به یقین ایستگاه‌های این خط نسبت به تونل‌های آن، هم عرض بیشتری دارند و هم حجم بیشتری را از داخل زمین به خود اختصاص می‌دهند. لذا حفر فضای مورد نیاز آن‌ها اثرات شدیدتر و پردامنه‌تری را روی زمین خواهند داشت. نتیجه آنکه مطالعه این دو پدیده نامطلوب برای ایستگاه‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است. مطالعه، پیش‌بینی و کنترل دو پدیده نشست و ناپایداری ساختمان‌های سطحی از این رو حائز اهمیت فراوانی است.

۱-۴. ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در قالب فصول زیر ارائه شده است :

فصل اول تحت عنوان مقدمه، شامل کلیاتی در مورد اهمیت و ضرورت پیش‌بینی خسارات سازه‌های سطحی ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی، اهداف مطالعه و ساختار پایان‌نامه می‌باشد.

فصل دوم در مورد تعریف نشست، بررسی نشست ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی و عوامل تأثیرگذار و تعیین‌کننده آن می‌باشد. سپس به بررسی انواع روش‌های پیش‌بینی نشست، اعم از تجربی، تحلیلی و عددی و غیره پرداخته شده است. در این فصل سعی شده است مهمترین روش‌ها در هر بخش مطرح شده و تمامی پارامترهای مؤثر در نشست به طور کامل مورد بررسی قرار گیرند.

فصل سوم مربوط به پیش‌بینی خسارات سازه‌ها و ساختمان‌های سطحی است. در این فصل سعی شده است که رویکرد استاندارد موجود برای برآورد و رده‌بندی خسارت وارده به سازه‌های سطحی ارائه شده و تمامی عوامل مؤثر در آن مورد تحلیل قرار گیرند.

در فصل چهارم ابتدا به طور مختصر خط ۷ مترو تهران معرفی شده و سپس ایستگاه‌های فاز ۱ به طور مجزا مورد ارزیابی مقدماتی ریسک خسارات قرار گرفته و ایستگاه‌های هدف برای مطالعات بیشتر معرفی شده‌اند.

در فصل پنجم از طریق نرم افزار Flac3D به بررسی تفصیلی ایستگاه‌های هدف پرداخته شده و پس از پیش‌بینی نشست به ارزیابی میزان خسارات ساختمان‌های سطحی در محل این ایستگاه‌ها پرداخته شده است.

در فصل ششم به جمع‌بندی نتایج بدست آمده از مطالعات و ارائه پیشنهادات پرداخته شده است.

فصل دوم

نشست و روش‌های پیش‌بینی آن

۲-۱. مقدمه

استفاده از تونل و سازه‌های زیرزمینی به عنوان پناهگاه، احداث انبارهای زیرزمینی مواد سوختی، نیروگاه زیرزمینی، ساخت تأسیسات زیرزمینی از جمله استخر شنا، مجموعه ورزشی، گالری‌های هنری و نیز اجرای شبکه‌ی تونل‌های مترو را می‌توان به عنوان نمونه‌هایی از کاربرد فضاهای زیرزمینی نام برد. در اثر حفر تونل در نقاط کم عمق در زمین‌های سنگی یا غیرسنگی، مخصوصاً در رسوبات آبرفتی سست، جابه‌جایی‌هایی در محیط ایجاد شده و تغییرشکل‌هایی پدید می‌آید، این جابه‌جایی‌ها را می‌توان به دو مؤلفه‌ی قائم و افقی تجزیه کرد. خساراتی که از حرکات سطح زمین پدید می آید، قسمتی از آن به علت مؤلفه قائم و قسمتی از آن ناشی از مؤلفه افقی جابه‌جایی‌ها در سطح زمین می‌باشد. مؤلفه‌ی قائم سبب پائین آمدن سطح زمین، یعنی نشست[1] تدریجی و مؤلفه‌ی افقی سبب حالت کششی یا فشاری در سطح زمین می‌شود،که با وجود این مؤلفه‌ها ممکن است تنش‌های جدیدی بر سازه‌های واقع بر سطح زمین وارد شود. در صورتی که حفر تونل در مناطق شهری انجام شود (مانند مترو و تونل‌های فاضلاب شهری) و نشست سطح زمین در اثر آن‌ها قابل ملاحظه باشد، از آن جا که شرایط درون زمین بسیار متغیر است و بر خلاف سطح زمین، امکان شناسایی و دسترسی به تمام نقاط آن به آسانی میسر نیست، طراح باید قبل از شروع عملیات حفر تونل، کلیه پدیده‌هایی که احتمال وقوع آن می‌رود، و راه‌حل آنها را پیش‌بینی کند. مهندسان برای کاهش دادن هزینه‌های پروژه و خطر ایجاد آسیب و حادثه در ساختمان تونل باید بتوانند پیش‌بینی‌های درستی از میزان نشست ساختمان در شرایط گوناگون تونل‌سازی داشته باشند.

یکی از شروط لازم برای طراحی یک تونل مطلوب این است که ساختمان تونل به ساختمان‌ها و خدمات مجاور خود کمترین آسیب را وارد کند. نشست در هنگام تونل‌سازی در زمین‌های نرم ممکن است در مناطق ساختمانی مشکل ایجاد کند و ساختمان‌های جدید و قدیمی را در معرض خطر قرار دهد. تأسیساتی مانند لوله‌های آب و گاز و فاضلاب نیز تحت تأثیر قرار گرفته و همین امر گاهی اوقات

[1]- Settlement

باعث شده است خدمات محتاطانه انجام گیرد و به علت تونل‌سازی محل انجام خدمات تغییر کند. نشست به هنگام تونل‌سازی در زمین‌های نرم مناطق شهری و در ساختمان‌های جدید و قدیمی مشکل‌زا است و در این زمان لازم است تا قبل از تونل‌سازی خدمات را گسترش دهیم. این بررسی‌های محیطی نیازمند تلاش و تحقیقات ویژه‌ای است که نشست را در زمان تونل‌سازی در زمین‌های نرم مورد بررسی قرار می دهد [۱] .

۲-۲. مفهوم نشست

به طور کلی کلمه نشست در اصطلاح مهندسی به معنای حرکت نقاط مختلف سطح زمین در راستای قائم در اثر عوامل مختلف می باشد. پدیده‌هایی از جمله فرو رفتن ساختمان‌های سطحی و خرابی‌هایی که در سطح زمین اغلب مشاهده می‌شود به علت پدیده نشست هستند. هر چند پدیده‌ی نشست اغلب برای حرکات نقاط مختلف سطح زمین در جهت قائم کاربرد دارد، با این حال هنگامی که در یک منطقه به علت‌های مختلف پدیده نشست رخ می‌دهد، حرکات افقی هم قابل مشاهده هستند[۲]. یعنی بعضی از نقاط سطح زمین تحت کشش و بعضی نقاط تحت فشار قرار می‌گیرند.

معمولاً حرکت قائم قسمت مرکزی منطقه تحت تأثیر نیروی ثقل به نام نشست و حرکت افقی نقاط واقع در حاشیه‌ی محل، جابه‌جایی[1] گفته می‌شود. به طور کلی حرکات (نشست وجابه‌جایی) و اختلاف آنها باعث تخریب‌هایی در سطح زمین خواهد شد. لذا نشست و جابه‌جایی توأم با هم در نظر گرفته می‌شوند مثلاً در ساختمانی، اختلاف نشست و اختلاف جابه‌جایی (انحراف) باعث تخریب می‌شود. در مناطق زراعی نیز نشست عامل تخریب می‌باشد [۳]. فرو رفتن سطح زمین در مناطق خاص زمین‌شناسی می‌تواند در اثر حرکات تکتونیکی، آتشفشانی، فعالیت‌های بشری مثل تونل‌سازی یا عملیات معدنی و یا در اثر عوامل طبیعی مثل ایجاد حفرات در سنگ‌های آهکی در اثر انحلال، صورت گیرد[۴].

[1] . Displacement

همانطور که گفته شد عوامل موثر بر نشست متنوع می‌باشند. پس در هنگام بررسی و مطالعه‌ی طرح‌ها باید هوشیار بود. در مورد نشست‌های نامساوی باید گوشزد کرد که حتی در زمین‌های به اصطلاح همگن نشست‌های واقعی ممکن است بین ۲۵ تا ۵۰ درصد با نشست‌های پیش‌بینی شده تفاوت داشته باشند. دلیل این امر ناهمگنی زمین‌های طبیعی می‌باشد. از این رو توجه به مسأله نشست احتمالی زمین در زمان احداث فضاهای زیرزمینی نزدیک به سطح زمین و یا وقتی که در اعماق بیشتر شبکه وسیعی از تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی حفر می‌شود (مثل معادن)، از اهمیت فنی خاصی برخوردار است[۵].

۲-۳. نشست در اثر حفر فضای زیرزمینی در مناطق کم عمق

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

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

این تفاوت‌ها نه تنها به خاطر اختلاف در عمق و وجود لایه‌های مختلف زمین شناسی، بلکه به خاطر حساسیت نسبت به میزان نشست و اثرات احتمالی بر سازه‌های دیگر قابل توجه و بررسی است. احداث تونل در یک منطقه کم عمق و سست، باعث تغییرات تنش و حرکات موضعی در توده‌های مجاور می‌شود. این حرکت‌ها مستقیماً به سمت سینه‌کار و نیز به صورت شعاعی به طرف داخل حفره ایجاد شده در پشت جبهه کار صورت می‌گیرد. تعیین میزان دقیق این حرکت به سادگی امکان‌پذیر نیست، اگر چه تخمین این مقدار و اثرات احتمالی آن بر ساختمان‌ها، در عمق معین و با سرعت پیشرفت مشخص از اهمیت به سزایی برخوردار است. در مواردی که احداث تونل در زیر سطح آب زیرزمینی صورت گیرد حرکت مصالح و ریزش آن همراه با جریان آب به داخل تونل، حادثه‌ساز خواهد بود. در این شرایط لازم است با حفر شبکه‌ی چاه‌های قائم و افقی، سطح آب پایین انداخته شود و یا این‌که با استفاده از روش‌های دیگر از قبیل انجماد مصنوعی آب و یا هوای فشرده از هجوم آب به داخل محدوده حفاری جلوگیری شود[۱].

۲-۴. علل نشست زمین در اثر حفاری

اصولاً حفاری‌های زیرزمینی به علت ایجاد ناپیوستگی در محیط اطراف، باعث پدیده‌هایی از قبیل نشست، سست‌شدگی و افزایش تنش در یک محدوده معین می‌شوند. در نتیجه این پدیده‌ها، تغییرشکل در خاک به وجود می‌آید که میزان آن بستگی به مقاومت خاک، ضخامت پوشش و میزان دست‌خوردگی و ناهمگونی ایجاد شده در خاک در اثر عملیات اجرائی دارد. بدون شک در شرایط یکسان از نظر خصوصیات خاک، ابعاد و عمق فضای زیرزمینی، نشست سطحی و محدوده سست‌شدگی خاک، مستقیماً وابسته به مهارت عوامل اجرائی، دقت در به کارگیری روش‌های اجرائی، پایداری و مقاومت نگهدارنده موقت و پوشش دائمی و به حداقل رساندن عوامل محرک و ایجاد لرزش است. به طور کلی علل پدیدار شدن نشست سطح زمین در اثر حفر تونل را باید در ارتباط با این پدیده‌ها دانست[۶]:

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

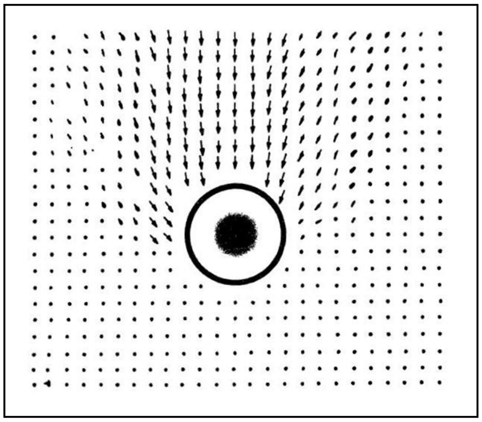
علاوه بر موارد فوق، عوامل ثانویه در نشست زمین دخیل هستند که می‌توان آنها را به صورت زیر در نظر گرفت :

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

۲-۵. مکانیزم نشست در ضمن پیشروی حفر تونل

یکی از مهمترین موضوعات در زمینه پدیده نشست، بررسی اثر حفر تونل بر روی تغییرشکل‌های جزئی زمین می‌باشد، که این تغییرشکل هم در سطح زمین و هم در اطراف تونل بوجود می‌آید. شکل

۲-۱ حالت تیپیک جابه‌جایی ذرات در بالا و دیـواره‌هـای تونـل، پـس از آن کـه تونـل از نقطـه مـورد نظرعبور کرده را نشان می دهد.



شکل ۲-۱. حالت تیپیک جابه‌جایی ذرات در بالا و دیواره‌های تونل [۷]

با پیشروی حفر تونل، نشست نقاط مختلف سطح زمین از مقدار کـم بـه مقـدار نهـایی ثابـت آن، افزایش می‌یابد. عوامل مؤثر بر پایداری جبهه‌کـار تونـل مشـتمل بـر خصوصـیات مکـانیکی، فیزیکـی، هیدروژئولوژیکی خاک، ژئومتری سازه و روش حفاری می‌باشد[۸].

مقدار نشست ایجاد شده در اثر احداث تونل‌های کم عمق، به این عوامل اساسی وابسته است:

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

۲-۵-۱. شرایط زمین

بیشتر تونل‌های کم عمق، در زمین‌های نرم احداث می‌شوند که حین اجرای حفاری تونل، نیاز بـه سیستم نگهداری موقت ویژه می‌باشد. خصوصیت عمومی این زمین‌هـا ایـن اسـت کـه اگـر از سیسـتم نگهداری موقت مناسبی استفاده نشود، سقف تونل ریزش خواهد کرد. حتی در بعضی مـوارد بـا وجـود

یک طراحی مناسب سیستم نگهداری موقت، هجوم مقادیر زیاد آب به داخل حفره سبب مشکلات و وقوع نشست در سطح زمین می‌شود. تحقیقات نشان داده که حفاری تونل در زمین های نرم در مقایسه با حفاری تونل در زمین‌های سنگی مستلزم توجه بیشتری است.

۲-۵-۲. روش حفاری

به طور کلی در اجرای حفاری تونل از هر روشی که استفاده شود همیشه بین مرحله‌ی حفاری و نصب نگهداری تونل، مدت زمانی تأخیر وجود دارد. البته اگر از سپرها برای حفاری تونل استفاده شود، چون همزمان با عملیات حفاری تونل، سیستم نگهداری تونل نصب می‌شود، این زمان تأخیر حذف خواهد شد. صرف‌نظر از این که حفاری تونل با چه درجه‌ای از کیفیت و دقت برنامه‌ریزی و اجرا شود، احتمال بسیار زیادی وجود دارد که حین اجرای عملیات حفاری، خود عملیات حفاری به زمین مدت زمانی فرصت برای ایجاد نشست بدهد. البته مقدار نشست در این مرحله بسیار کم و در نتیجه معمولاً کم اهمیت است.

از آنجایی که سه عامل تغییرات سطح تنش در نزدیکی سینه‌کار، تنش‌های برشی ایجاد شده در طول دیواره‌ها و تراکم خاک‌های دستخورده همگی از یک سو از عوامل مؤثر در نشست حاصل از حفر یک فضای زیرزمینی هستند و از دیگر سو هر سه این عوامل از روش حفاری اثر می‌پذیرند، لذا روش حفاری از این زاویه نیز بسیار مهم است.

۲-۵-۳. ابعاد تونل

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

۲-۵-۴. عمق تونل

از عوامل مؤثر در وقوع نشست در سطح زمین حین حفاری یک تونل، عمقی است که تونـل در آن عمق احداث می شود. بدیهی است که اگر تونل در عمق زیادی حفر شـده باشـد گسـترش نشسـت در بالای تونل قبل از رسیدن به سطح زمین متوقف می‌شود لذا نشست در سطح زمین مشاهده نمی‌شود. حداقل عمقی که اگر تونل در اعماق بیشتری از آن حفر شـود، هـیچ مقـدار نشسـتی در سـطح زمـین مشاهده نمی‌شود به ابعاد تونل بستگی دارد. هر چه ابعاد تونل بیشتر باشـد ایـن حـداقل عمـق کمتـر خواهد بود.

۲-۵-۵. حالت میدان تنش برجا

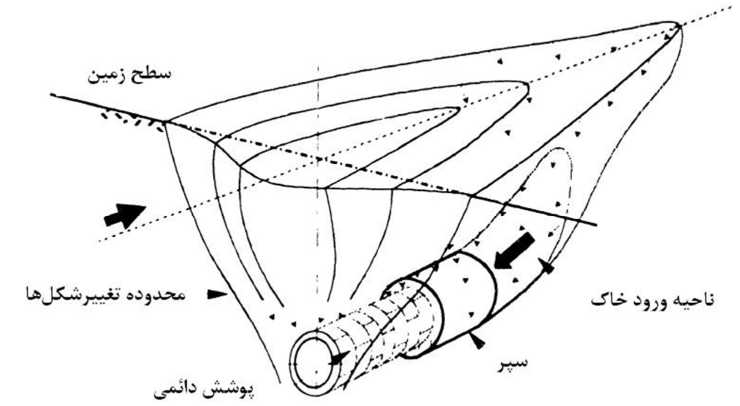
از پارامترهایی که می‌تواند در وقوع نشست پس از حفـر تونـل مـؤثر باشـد، حالـت تـنش برجـای موجود در محل است. در بحث نشست از بین مؤلفه‌های تنش برجا، غالباً تنش قائم از اهمیـت بـالایی برخوردار است. در بیشتر موارد، حالت تنش برجای موجود در محل، عمدتاً به مقدار بار روباره‌ی تونـل و شرایط آب زیرزمینی محل بستگی دارد. البته در بعضی موارد خاص، به علت شرایط خاص تکتونیکی محل، تنش جانبی به مقدار زیادی افزایش می‌یابد که این مسأله سبب افزایش پایداری تونل در میدان تنش موجود می شود. این افزایش پایداری تونل به علت افزایش مقاومت خاک‌های دربرگیرنـده تونـل در اثر افزایش تنش جانبی است.

۲-۶. روش‌های پیش‌بینی نشست

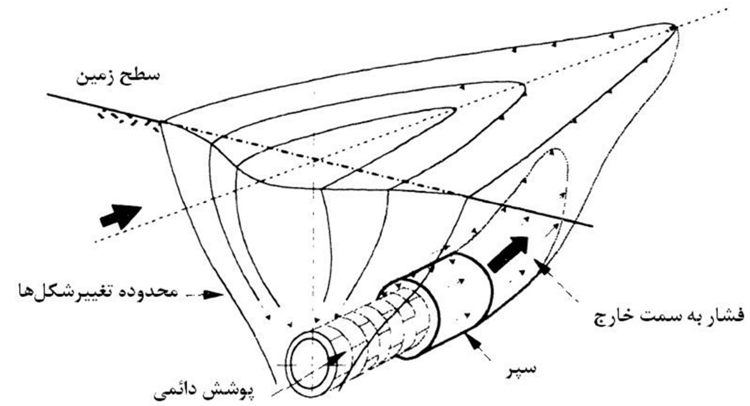
بنیادی‌ترین واکنش زمین به هرگونه تونل‌سازی در زمین‌های نرم، آن است کـه خـاک بـه سـمت بازشدگی حرکت خواهد کرد. زیرا این مکان، محـل رهـایی تـنش محسـوب مـی‌شـود. بـه طـور کلـی تونل‌سازی در زمین‌های نرم به دو گونه باعث نشست زمین می‌شود. اول نشستی که به‌طور مسـتقیم از حفر تونل ناشی می‌شود. این نوع بزرگترین و بحرانی‌ترین نوع نشست است و معمـولاً بـا عبـارت *افـت خاک* یا *افت حجم* بیان می‌شود. نوع دوم نشست تحکیم است که در زمره *نشست بلندمدت* رده‌بنـدی می‌شود. این نوع نشست ناشی از افزایش تنش مـؤثر برجـا در اطـراف تونـل اسـت. نشسـت تحکیمـی

معمولاً در طول مدت زمانی طولانی بعد از حفر تونل ایجاد می‌شود. در این بخش تنها افت خاک که در اثر عملیات تونل‌سازی و در حین حفر آن رخ می‌دهد، مورد بحث خواهد بود.

حرکت خاک در نتیجه افت خاک، خود را به صورت گودی نشست در سطح زمین آشکار خواهد کرد. شکل ۲-۲ نمونه یک گودی نشست را که در اثر تونل‌سازی در زمین نرم به‌وجود آمده است را به‌صورت سه‌بعدی نشان می‌دهد. هرچند در مواردی که حجم کمتری از خاک نسبت به حجم سپر حفر شده و به بیرون انتقال یابد، خاک برآمدگی خواهد داشت(شکل۲-۳). این مورد می‌تواند درنتیجه به‌کارگیری فشار بالا در پیشانی حفار باشد.



شکل۲-۲. تغییرشکل معمولی زمین ناشی از تونل‌سازی سپری [۷]



شکل۲-۳. برآمدگی سطح زمین در جلوی حفار در نتیجه تعادل حجم مثبت[۷]

در طول سالیان اخیر، مطالعات بسیار زیادی درباره تغییرشکل زمین ناشی از تونل‌سازی انجام شده است. این مطالعات منتج به درک بهتری از این مسأله شده است. پیش‌بینی تغییرشکل زمین عمدتاً به چهار روش زیر انجام شده است:

۱) **روش‌های تجربی و احتمالاتی** : مدل ریاضی پیش‌بینی نشست در یک محیط احتمالاتی برای اولین بار توسط *لیتوینیزین*[1] پیشنهاد شد. سپس پِک[2] پیشنهاد کرد که پراکندگی نشست سطحی را می‌توان به‌صورت تجربی با استفاده از منحنی احتمالاتی نرمال و یا منحنی گوس به‌دست آورد. پارامترهای طراحی مورد استفاده در *تابع خطا* از اندازه‌گیری‌های انجام شده در پروژه‌های تونل‌سازی در شرایط مختلف گردآوری شده است. رویکرد تجربی به‌وسیله مطالعات انجام شده توسط *اُریلی*[3] و *نیو*[4] نیز تأیید شدند. علاوه بر این، *اَتوِل*[5] و وودمَن[6] نیز به منظور پیش‌بینی نشست سطحی طولی، تئوری احتمالاتی را به‌کار گرفتند.

۲) **روش‌های تحلیلی** : تنش‌های زمین و حرکات آن در این روش به صورت تحلیلی محاسبه می‌شود. بسیاری از محققان روش‌هایی را بر اساس راه‌حل‌هایی بسیار شبیه یکدیگر ارائه کرده‌اند. *ساگازِتا*[7] یک تحلیل سه بعدی برای تغییرشکل زمین ارائه کرده است که از آن برای به‌دست آوردن میدان کرنش یک محیط تراکم‌ناپذیر هموژن که در ابتدا ایزوتروپ نیز می‌باشد، استفاده می‌شود. *وِروئِجت*[8] و *بوکِر*[9] روش تقریبی ارائه شده توسط ساگازِتا را با استفاده از مفهوم افت خاک اصلاح کردند به طوری که نه تنها برای حالتی که ضریب پواسون برابر ۰/۵ باشد جوابگو بود بلکه تمام موارد اختیاری نسبت پواسون را پوشش می‌داد.

1. Litwiniszyn
2. Peck
3. O'Reily
4. New
5. Attewell
6. Woodman
7. Sagaseta
8. Verruijt
9. Booker

لُگانازان[1] و *پولوس*[2] نیز مدل اخیر را اصلاح کردند اما با درنظر نگرفتن نسبت قائم به افق (ضریب انحراف)، سبب برآورد گودی نشست باریکتری شدند. علاوه بر این، پینتو[3] با توسعه راه‌حل تحلیلی توانست هم گودی نشست سطحی و هم تغییرشکل‌های جانبی را توصیف کند.

۳) **روش‌های عددی :** به‌واسطه دشواری‌های موجود در فرمول‌بندی راه‌حلهای مناسب تحلیلی، روش‌های عددی به‌طور فزاینده‌ای در مسائل مربوط به مکانیک خاک و سنگ به‌کار گرفته می‌شوند. با این وجود هنوز دشواری‌هایی در رابطه با دقت پارامترهای مصالح و همینطور این امر که یک شبیه‌سازی کرنش دوبعدی از یک تونل در خاک، جابه‌جایی خاک در جلوی کله حفار را در نظر نمی‌گیرد، وجود دارد [۹]. علاوه بر این یکی از محدودیت‌های دیگر آن است که اغلب به‌دست آوردن خواص برجای مصالح به عنوان داده‌های ورودی حقیقی برنامه، کاری سخت و پیچیده است. با این وجود پیش‌بینی جابه‌جایی زمین بر اساس روش‌های عددی، رویکردی سودمند برای تعیین حالت کلی تغییرشکل است.

۴) **مطالعات آزمایشگاهی :** آزمایش‌هایی بر روی مدل تونل‌ها در مواد چسبنده و غیر چسبنده به منظور بررسی مکانیزم جابه‌جایی خاک و فروریزش آن انجام شده است که بر پایه این نتایج، پیشنهاد شده است که پارامترهای تغییرشکل مشخص شده در مدل‌های آزمایشی را می‌توان برای برآورد شکل گودی نشست و حداکثر نشست سطحی و نیز اعتبارسنجی روش‌های عددی استفاده کرد.

۲-۷. روشهای تجربی و احتمالاتی

می‌توان تمامی تلاش‌های انجام شده در راستای ارائه روشی تجربی برای تخمین میزان نشست را به صورت آنچه در ادامه می‌آید خلاصه نمود.

---
1 . Loganathan
2 . Poulos
3 . Pinto

۲-۷-۱. نشست سطحی

۲-۷-۱-۱. رفتار عرضی

مقطع عرضی نشست را می‌توان با تابع خطای گوس توصیف کرد. این توصیف ریاضی به شدت مورد استقبال قرار گرفته است. با توجه به این رویکرد، نشست عمودی در مقطع عرضی به صورت زیر خواهد بود:

$$S_v(y) = S_{v,\max} e^{-\frac{y^2}{2i_y^2}} \qquad (۱-۲)$$

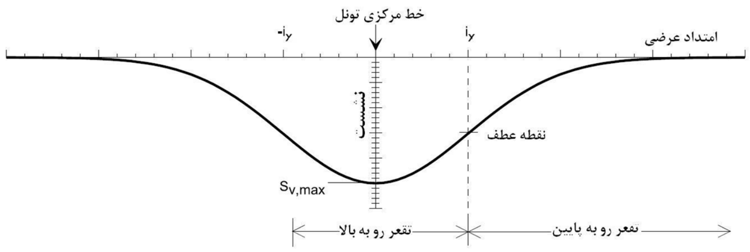
در این رابطه $S_{v\ max}$ حداکثر نشست اندازه‌گیری شده در بالای محور تونل است. پارامتر i_y که در حقیقت پارامتر عرض گودی نشست است، نشان‌دهنده انحراف معیار در تابع گوس اصلی است. یک گودی نشست عرضی استاندارد در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که حداکثر شیب گودی نشست در نقطه عطف آن قرار دارد. این نقطه در فاصله i_y از مرکز تونل قرار دارد. بعداً خواهیم دید که این نقطه هنگام مشخص کردن معیار تغییر شکل ساختمان‌ها اهمیت ویژه‌ای خواهد داشت. این نقطه دو ناحیه با تقعر رو به بالا[1] و با تقعر رو به پایین[2] را از هم جدا می‌کند.

ناحیه زیر تابع خطای گوس بنا به تعریف این تابع برابر یک می‌باشد که در واقع میزان احتمال آن است که متغیر x مقداری بین ∞- و ∞+ را داشته باشد. با این حال پارامترهای $S_{v\ max}$ و i_y در تابع بالا از نظر ریاضی مستقل هستند. درنتیجه ناحیه محصور به گودی نشست می‌تواند مقداری به صورت زیر داشته باشد:

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} S_v dy = \sqrt{2\pi}\, i_y S_{v,\max} \qquad (۲-۲)$$

در این رابطه V_s حجم گودی نشست بر واحد طول است.

[1] Sagging zone
[2] Hogging zone



شکل ۲-۴. گودی نشست عرضی [۱۰]

در موادی با نفوذپذیری پایین مانند رس سخت، می‌توان تصور کرد که واکنش اولیه زمین به حفر تونل، در شرایط غیر زهکشی شده می‌باشد. در نتیجه حجم گودی نشست سطحی دقیقاً برابر با حجم خاکی خواهد بود که حفر شده است و از حجم تئوری تونل بیشتر خواهد بود. اینچنین معمول است که این حجم اضافی به عنوان نسبتی از حجم تئوری تونل (در واحد طول) در نظر گرفته شود:

$$V_L = \frac{V_S}{\pi \frac{D^2}{4}} \qquad (۲-۳)$$

پارامتر V_L افت حجم و D قطر خارجی تونل است. این پارامتر معمولاً به صورت یک درصد بیان می‌شود. با ترکیب معادلات ۲-۱ و ۲-۳ مقطع عرضی نشست را می‌توان بر حسب افت حجم به صورت زیر بیان کرد:

$$S_V(y) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{V_L D^2}{4 i_y} e^{-\frac{y^2}{2 i_y^2}} \qquad (۲-۴)$$

در نتیجه برای یک تونل با قطر مشخص D ، بزرگی منحنی نشست عرضی تنها به افت حجم V_L و عرض گودی نشست i_y بستگی دارد. این دو پارامتر بحرانی با جزئیات بیشتری در ادامه مورد بحث قرار خواهند گرفت.

اُریلی و نیو نشان دادند در صورتی که بردار برآیند جابه‌جایی به سمت مرکز تونل باشد، جابه‌جایی افقی سطحی خاک را می‌توان از معادلات بالا به‌دست آورد. در نتیجه جابه‌جایی افقی سطحی خاک را می‌توان به این صورت ارائه کرد:

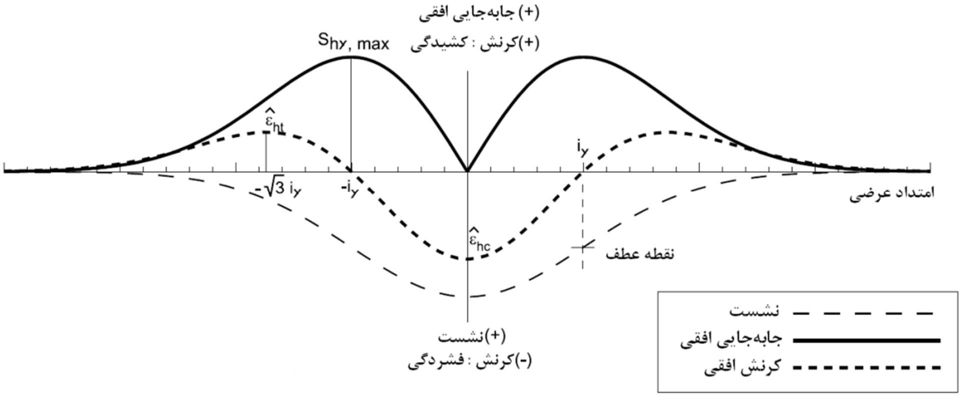
$$S_{hy}(x) = -\frac{yS_V(y)}{z_0} \qquad (۵-۲)$$

شکل ۲-۵ جابه‌جایی افقی را به همراه گودی نشست گوسی نشان می‌دهد. دیده می‌شود که جابه‌جایی افقی حداکثر در نقطه عطف اتفاق می‌افتد. کرنش افقی در مقطع عرضی نیز در این شکل دیده می‌شود. این پارامتر با مشتق گیری از جابه‌جایی افقی بر حسب y به‌دست خواهد آمد:

$$\varepsilon_{hy}(y) = \frac{S_v(y)}{z_0}\left(\frac{y^2}{{i_y}^2} - 1\right) \qquad (۶-۲)$$

این معادله به این نتیجه منتج خواهد شد که فشردگی به صورت منفی و کشیدگی به صورت مثبت تعریف شوند. این تعریف علامت در تقابل با آنچه که معمولاً در تعریف کرنش در مکانیک خاک است قرار دارد. در بخش‌های بعد نشان خواهیم داد که کرنش افقی معیاری بسیار مهم در توصیف تغییرشکل در ساختمان‌ها می‌باشد. در ادامه اندیس y حذف خواهد شد و هنگام توصیف کرنش افقی در مقطع عرضی از ε_h استفاده خواهد شد.

شکل ۲-۵ نشان می‌دهد که یک ناحیه فشردگی بین دو نقطه عطف قرار دارد. بیرون این دو نقطه کرنش کششی ایجاد خواهد شد. مقادیر ماکزیمم ε_{hy} با عبارات $\hat{\varepsilon}_{hc}$ و $\hat{\varepsilon}_{ht}$ برای حالت فشردگی و کشیدگی اشاره خواهند شد (اندیس y حذف شده است). این مقادیر ماکزیمم در $y = 0$ (فشردگی) و $y = \sqrt{3}i_y$ (کشیدگی) ایجاد خواهند شد.



شکل ۲-۵. توزیع جابه‌جایی سطحی افقی و کرنش در جهت عرضی همراه با گودی نشست [۱۰]

۲-۷-۱-۲. رفتار طولی

مقطع طولی نشست را می‌توان به این صورت به‌دست آورد که یک تونل را بـه عنـوان یـک سـری نقاط منبع در جهت طولی در نظر گرفته و با برهم نهی گودی نشست ناشی از هر نقطه، نشسـت کلـی را به‌دست آورد. اگر از مقطع نشست گوسی برای این گودی نشست‌ها استفاده شود، مقطـع طـولی بـه این صورت توصیف خواهد شد:

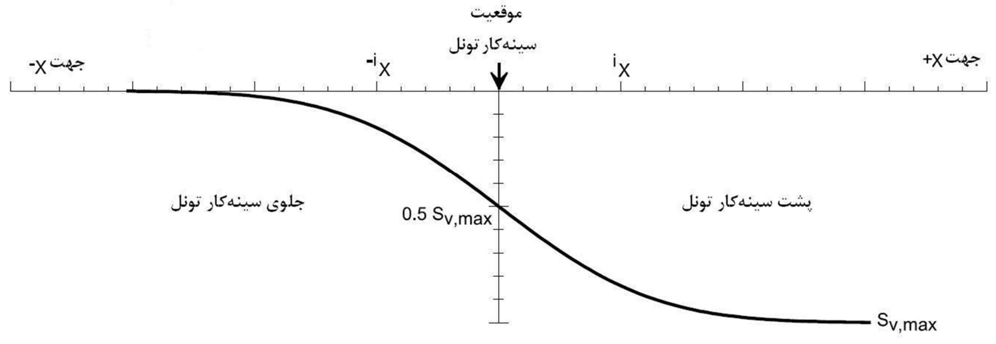
$$S_V(x)_{y=0} = S_{v,\max}\,\Phi\left(\frac{x}{i}\right) \qquad (۷-۲)$$

$\Phi(x)$ منحنی احتمال تجمعی است و x همانطور که قبلاً نشان داده شد، مختصـات طـولی اسـت. تابع احتمال تجمعی این چنین تعریف می‌شود:

$$\Phi(x) = \frac{1}{i_x\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}} \qquad (۸-۲)$$

مقادیر $\Phi(x)$ در جداول استاندارد احتمال در اغلب کتاب‌های درسی آمار لیست شده است.

مقدار نشست در $x=0$ برابر با $S_{v\max}/2$ خواهد بود. اَتوِل و وودمَن نشـان دادنـد کـه در محـیط رسی سخت، مقدار نشست در بالای سینه‌کار تونل برابر با ۳۰ تا ۵۰ درصد $S_{v\max}$ و به‌طور میانگین ۴۰ درصد خواهد بود. برای راحتی و تسهیل محاسبات فرض می‌شود که سـینه‌کـار تونـل در نقطـه $x=0$ قرار دارد که میزان نشست ۵۰ درصد ماکزیمم را دارد (شکل ۲-۶).



شکل ۲-۶. مقطع طولی نشست [۱۰]

عرض مقطع نشست طولی به صورت i_x تعریف می‌شود. اغلب فرض می‌شود که $i_x = i_y$. آتوِل و همکاران مقادیر i_x و i_y را برای یک سری از مطالعات موردی با یکدیگر مقایسه کردند. هرچند که داده‌ها نشان می‌دادند که دهانه نشست عرضی اندکی از دهانه نشست طولی بزرگتر است، آنان نتیجه گرفتند که این رابطه عموماً برای بیشتر مسائل عملی طراحی معتبر و مناسب است. در مورد تونل Jubilee Line Extension داده‌هایی به‌دست آمد که نشان‌دهنده نسبت $i_y/i_x = 1.3$ می‌باشد. با وجود این اختلاف، معمول است که i_x برابر با i_y در نظر گرفته شود. در نتیجه در ادامه پارامتر عرض گودی نشست i به‌جای دو پارامتر i_x و i_y مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

با درنظر گرفتن این موضوع که بردارهای برآیند جابه‌جایی به سمت مرکز تونل اشاره دارند، آتوِل و وودمَن نشان دادند که جابه‌جایی افقی خاک در جهت طولی در سطح زمین به این صورت است:

$$S_{hx}(x)_{y=0} = \frac{V_L D^2}{8 z_0} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \qquad (۹-۲)$$

با مشتق‌گیری از S_{hx} نسبت به x ، کرنش افقی در راستای طولی در بالای خط مرکزی تونل به‌دست خواهد آمد:

$$\varepsilon_{hx}(x)_{y=0} = -x\frac{V_L D^2}{8i^2 z_0} e^{-\frac{x^2}{i^2}} \qquad (۱۰-۲)$$

که نشان دهنده کشیدگی (مقدار مثبت) در جلوی سینه کار تونل و فشردگی در پشت آن است.

همه مؤلفه های جابه‌جایی سطحی و کرنش سطحی که در بالا ارائه شد، به پارامتر عرض گودی نشست i و افت حجم V_L بستگی دارند. دو بخش آینده بر این دو پارامتر مهم تمرکز خواهد داشت.

۲-۷-۱-۳. افت حجم

در ساخت هر تونل ضرورتاً مقدار خاک حفر شده از حجم تونلی که جایگزین آن می‌شود بیشتر است. مقدار این حفاری اضافی معمولاً با پارامتر افت حجم V_L بیان می‌شود که در حقیقت نسبت اختلاف حجم خاک حفر شده با حجم تونل (که با قطر خارجی آن تعریف می‌شود) به حجم تونل است. افت حجم مقدار اندازه‌ای برای میزان اختلال و آشفتگی کلی زمین است. این پارامتر باعث ایجاد

نشست در سطح زمین می‌شود و در شرایط زهکشی نشده، حجم این گودی نشست برابر با V_L است. افت حجم با عبارات دیگری مانند افت خاک، اتلاف حجم و اتلاف خاک نیز بیان می‌شود. برای تونل‌سازی سپری، آتوِل منشأ افت حجم را به چهار دسته تقسیم می‌کند:

- **افت سینه‌کار**: حرکت خاک به سمت سینه‌کار بدون نگهداری که باعث نشست در جلوی سینه‌کار می‌شود.

- **افت سپر**: افت شعاعی مربوط به زمین در اطراف سپر که به خاطر فضای خالی پشت سپر است که با خاک پر می‌شود. در صورتی که حفاری بیش از میزان نیاز صورت گیرد (بخاطر مهارت کم) افت حجم بیشتری روی خواهد داد.

- **افت در طول نصب نگهداری و پس از آن**: در صورتی که نگهداری در پشت سپر نصب شود، فضای خالی‌ای از خاک نگهداری نشده وجود خواهد داشت که خاک به داخل تونل نفوذ می‌کند. بعد از نصب نگهداری تونل، حرکت خاک ممکن است باز هم در اطراف نگهداری اتفاق افتد زیرا نگهداری نمی‌تواند به‌تنهایی تمام سطح مقطع به جا مانده از سپر را پوشش دهد. برای حداقل کردن این پدیده، معمول است که تمام فضاهای خالی بین نگهداری و خاک توسط تزریق پر می‌شوند.

- **افت بعد از تزریق**: از آنجایی که فشار روباره بر روی مرز جدید انتقال می یابد، نگهداری تغییر شکل داده و در نتیجه افت‌های شعاعی بعد از تزریق نیز ادامه پیدا می‌کنند. آتوِل رویکردی را برای محاسبه مؤلفه‌های مختلف افت حجم ارائه داد. این محاسبات بر اساس نسبت نرخ جابه‌جایی خاک در محیط حفر شده (که در آزمایشگاه تعیین می‌شود) به نرخ پیشروی تونل بنا نهاده شده‌اند. برای تونل‌هایی که از نگهداری بتنی پاشیده شده (SCL[1]) استفاده می‌کنند، ICE[2] پیشنهادات زیر را برای محدود کردن نشست سطحی ارائه می‌کند:

- مراحل حفاری بایستی به اندازه کافی کوتاه باشند، هم از لحاظ ابعاد و هم از لحاظ مدت زمان

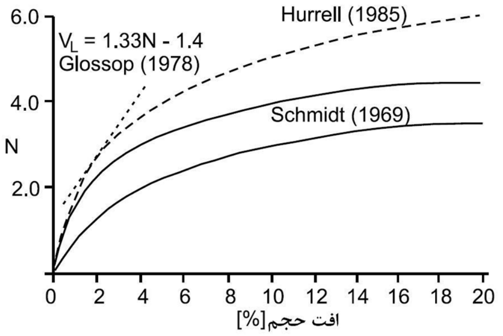
[1]. Sprayed Concrete Lining
[2]. Institution of Civil Engineers

- بستن حلقه بتن پاشی نبایستی به تأخیر افتد.

چندین رابطه برای برآورد V_L از روی نسبت پایداری N پیشنهاد شده است. نسبت پایداری توسط *برامْزْ*[1] و *بنِرمارک*[2] به صورت زیر تعریف شده است:

$$N = \frac{\sigma_V - \sigma_t}{s_u} \qquad (۱۱-۲)$$

σ_v فشار روباره کلی در سطح محور تونل است (با احتساب هرگونه روباره‌ای). σ_t فشار نگهداری تونل است (در صورت وجود) و s_u مقاومت برشی غیرزهکشی‌شده رس است. برای N کمتر از ۲ در صورت پایداری سینه کار، واکنش الاستیک خواهد بود[۱۱]. برای N بین ۲ و ۴ ناحیه پلاستیک موضعی اطراف تونل شکل خواهد گرفت و برای N بین ۴ و ۶ حالت تسلیم پلاستیک و برای بزرگتر از ۶ ناپایداری سینه کار مفروض خواهد بود. برای تونل های بدون نگهداری (σ_t=0) مِیر و تِیلور نمودارهایی از N بر حسب عمق را ارائه دادند که مشخص می‌کرد در رس تیپ لندن این نسبت بین ۲/۵ تا ۳ تغییر می‌کرد. *لِیک*[3] با ارائه شکل ۲-۷ رابطه بین V_L و N که توسط چندین مؤلف متفاوت ارائه شده است را به طور خلاصه نمایش می‌دهد. دیده می‌شود که نسبت پایداری N=2 به اتلاف حجم ۱/۵ تا ۳ درصد منتج می شود.



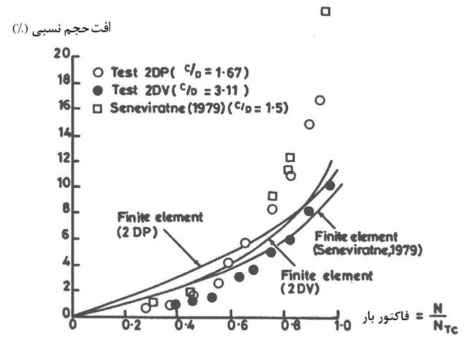
شکل ۲-۷. روابط مختلف بین عدد پایداری و افت حجم [۱۱]

---
1 . Broms
2 . Bennermark
3 . Lake

دِیویس[1] نشان داد که در مورد تونل‌های کم عمق نسبت پایداری مربوط به حالت ریزش تونل با عمق تغییر می کند. مِیر برای در نظر گرفتن این عامل، فاکتور بار[2] را در سال ۱۹۸۱ معرفی کرد. فاکتور بار به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$LF = \frac{N}{N_{TC}} \qquad (۱۲-۲)$$

N نسبت پایداری تونل در حال ساخت و N_{TC} نسبت پایداری هنگام ریزش تونل است. شکل ۲-۸ نتایج این مطالعات را همراه با تحلیل‌های المان محدود کرنش صفحه‌ای و تست‌های تفکیکی نشان می‌دهد. این نمودار مشخص می‌کند که افت حجم کمتر از ۳ درصد در شرایط فاکتور بار (LF) کمتر از ۰/۵ اتفاق می‌افتد.



شکل ۲-۸. رابطه بین افت حجم و فاکتور بار، تعیین شده از آزمایش‌های تفکیکی و آنالیزهای المان محدود[۱۲]

اُریلی و نیو داده‌هایی را ارائه دادند که برای افت حجم گستره‌ای بین ۱ تا ۲ درصد را برای رس تیپ لندن نشان می‌داد. مقدار V_L=1.4% نیز توسط آتِول و *فارمِر*[3] در پروژه Jubilee Line گزارش شده است که این مقدار نیز در همان گستره قبلی قرار می‌گیرد. با این وجود اتلاف حجم‌هایی با اندازه بزرگ‌تر نیز گزارش شده است. مانند اندازه ۳/۳ و ۲/۹ درصد که در ساخت تونل‌های westbound و

1. Davis
2. Load factor
3. Farmer

eastbound گزارش شده است. نمونه دیگر مقدار ۱ تا ۲/۹ درصد است که توسط *باراکَت*[1] گزارش شده است.

تونل‌هایی که نگهداری بتن پاشیده شده (SCL) دارند نیز افت حجم‌هایی با همان بزرگی دارند. برای تونل آزمایشی Heathrow که در رس تیپ لندن ساخته شده است، مقدار افت حجمی بین ۱ تا ۱/۳ درصد گزارش شده است. *بورلَند*[2] و همکاران بر اهمیت افت حجم بر نشست زمین ناشی از حفر تونل تأکید کرده‌اند و پیشنهاد کرده‌اند که تعیین حدود افت حجم به عنوان یک داده قراردادی باید مشخص شود.

۲-۷-۱-۴. پارامتر عرض گودی نشست

همانطور که پیش‌تر بیان شد پارامتر عرض گودی نشست در مقطع عرضی، به عنوان فاصله نقطه عطف (نقطه شیب حداکثر) تا خط مرکزی تونل تعریف شده است. در همین راستا اُرِیلی و نیو ۱۹ مورد مطالعه موردی ساخت تونل در رس را مورد مطالعه قرار دادند. با رسم پارامتر عرض i و عمق تونل مربوط به آن در یک نمودار روندی مشاهده شد که در شکل ۲-۹ ارائه شده است. با انجام رگرسیون خطی، رابطه زیر به‌دست آمده است :

$$i = 0.43z_0 + 1.1 \qquad (۲-۱۳)$$

در این رابطه هم i و هم z_0 بر حسب متر هستند. شکل ۲-۹ نشان می‌دهد که رگرسیون خطی از نزدیک مبدأ گذر می‌کند. بنابراین اُرِیلی و نیو رابطه بالا را به این صورت ساده‌سازی کرده‌اند:

$$i = Kz_0 \qquad (۲-۱۴)$$

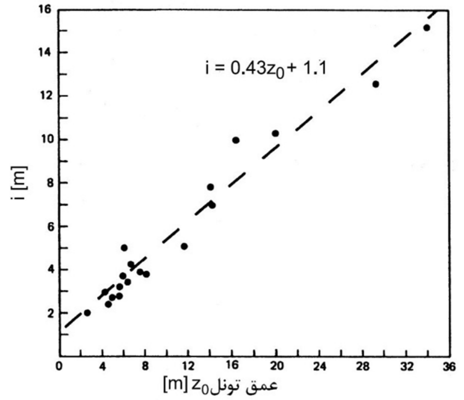
بر اساس داده‌های موجود آنان نتیجه گرفتند که برای محیط رسی، مقدار K=0.5 برای اکثر مقاصد طراحی مناسب است. همچنین آنان اشاره می‌کنند که این مقدار بین ۰/۴ تا ۰/۷ به ترتیب در

[1] . Barakat
[2] . Burland

رس سخت و نرم تغییر می‌کند. *رانکین*[1] نیز مطالعات مشابهی را البته با پایگاه داده بزرگتر ارائه کرده است. این نتایج نیز مقدار K=0.5 را برای رس تأیید می‌کردند، درنتیجه:

$$i = 0.5z_0 \tag{۲-۱۵}$$

کیمورا[2] و مِیر نیز نتایج مشابهی از آزمایش‌های تفکیکی گزارش کرده‌اند. علاوه بر این، نتایج آنان نشان می‌دهد که مقدار K=0.5 به‌طور مستقل از درجه نگهداری تونل به‌دست می‌آید. آنها نتیجه گرفتند که مقدار K مستقل از روش تونل‌سازی می‌باشد.



شکل ۲-۹. همبستگی بین پارامتر عرض گودی نشست و عمق تونل[۸]

۲-۷-۲. نشست زیرسطحی

در بخش‌های پیش تنها تغییر شکل زمین ناشی از تونل‌سازی در تراز سطح زمین تشریح شد. با این وجود که نشست سطحی راحت‌ترین راه برای توصیف تغییر شکل زمین است، اما این رویکرد تنها تصویری مبهم از مکانیزم اندرکنش خاک-تونل و در صورت وجود، اندرکنش خاک-تونل-ساختمان در اختیار ما می‌گذارد.

مِیر و تِیلور از راه‌حل پلاستیک برای باربرداری یک کاواک استوانه‌ای برای توصیف جابه‌جایی زیرسطحی افقی و عمودی بهره جستند. در این راه حل در صورت رسم یک نمودار که رابطه S_V/R یا S_{hx}/R را در مقابل R/d نشان می‌دهد، رابطه‌ای خطی قابل پیش‌بینی خواهد بود. در این روابط R

---
[1]. Rankin
[2]. Kimura

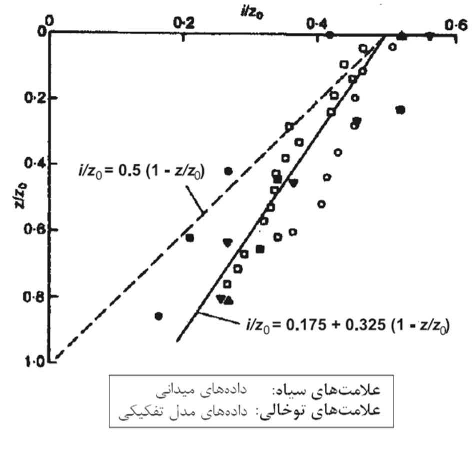
شعاع تونل و d فاصله افقی یا عمودی از مرکز تونل است. آنها در این مطالعات داده‌هایی را ارائه کردند که مطابقت بسیار خوبی با روند پیش‌بینی شده نشان می‌داد.

در مطالعات دیگری مِیر و تِیلور تنها بر روی جابه‌جایی عمودی خاک در بالای خط مرکزی تونل و جابه‌جایی افقی در تراز محور تونل تمرکز کردند. معمولاً برای توصیف شکل گودی نشست در مقطع عرضی، یک منحنی گوسی به‌کار گرفته می‌شود. مِیر نشان داد که این فرض تطابق بسیار خوبی با داده‌های میدانی دارد.

برای پیش‌بینی پارامتر عرض گودی نشست برای گودی نشست زیرسطحی راحت‌ترین و مستقیم‌ترین راه آن است که در معادله ۲-۱۵ عبارت (z_0-z) جایگزین عمق تونل یعنی z_0 شود:

$$i = 0.5(z_0 - z) \qquad (۲-۱۶)$$

مِیر از طریق یک سری داده‌های میدانی و تفکیکی نشان داد که گودی‌های نشست زیرسطحی با عمق z متناسب هستند. شکل ۲-۱۰ این اندازه‌گیری‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل عرض گودی نشست که نسبت به z_0 نرمالایز شده است، نسبت به عمق نرمالایز z/z_0 رسم شده است. خط نقطه‌چین در این شکل معادله ۲-۱۶ را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۰. تغییر پارامتر عرض گودی نشست زیرسطحی i با عمق [۱۳]

همان‌طور که دیده می‌شود، این خط مقادیر i را نسبت به عمق کمتر از مقـدار واقعـی پـیش‌بینـی می‌کند. در مقابل، خط دیگر بهتر با اندازه‌گیری‌ها مطابقت دارد. این خط با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\frac{i}{z_0} = 0.175 + 0.325\left(1 - \frac{z}{z_0}\right) \qquad (۱۷\text{-}۲)$$

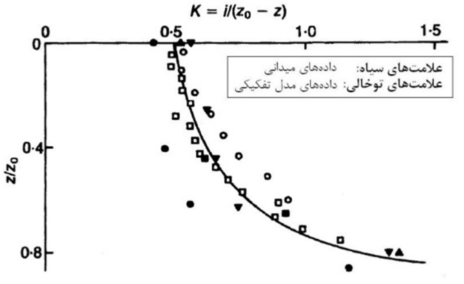
با داشتن این رابطه معادله ۲-۱۴ به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

$$i = K(z_0 - z) \qquad (۱۸\text{-}۲)$$

و با جایگزینی در معادله ۲-۱۷ خواهیم داشت:

$$K = 0.325 + \frac{0.175}{1 - \frac{z}{z_0}} \qquad (۱۹\text{-}۲)$$

می‌بینیم در صورتی که $z = 0$ باشد، معادله بالا به $K = 0.5$ منتج می‌شود. این نتیجه با معادلـه ۲-۱۵ که عرض گودی را در تراز سطح زمین بیان می‌کند سازگار است. شکل ۲-۱۱ نموداری را ارائه می‌دهد که در آن مقدار k نسبت به z/z_0 بر اساس داده‌های شکل قبل رسم شده است. منحنی توصیف شـده در معادله ۲-۱۹ نیز در این شکل رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهـد کـه بـرای مقـادیر بـزرگ z/z_0 مقدار ثابت $K = 0.5$ مقدار عرض گودی نشسـت زیرسـطحی را کمتـر از مقـدار واقعـی بـرآورد می‌کند.

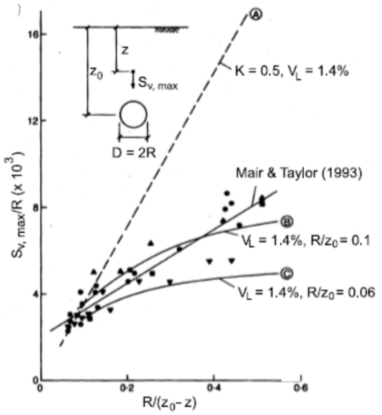


شکل ۲-۱۱. تغییرات مقدار K برای نشست زیرسطحی نسبت به عمق [۱۳]

با ترکیب معادلات ۲-۲ و ۲-۳ با معادله ۲-۱۷، حداکثر نشست زیرسطحی را می‌توان بـه صـورت زیر بیان کرد:

$$\frac{S_{V\max}}{R}=\frac{1.25V_L}{0.175+0.325\left(1-\dfrac{z}{z_0}\right)}\frac{R}{z_0} \qquad (۲-۲۰)$$

در این رابطه R شعاع تونل است. شکل ۲-۱۲ حداکثر نشست (نرمالایز شده نسبت بـه شـعاع) را در مقابل $R/(z_0-z)$ نشان می‌دهد. عبارت $(z_0\text{-}z)$ فاصله عمودی بین مقطـع نشسـت و محـور تونـل است. این نمودار شامل داده‌های میدانی به‌دسـت آمـده از تونـل‌سـازی در رس تیـپ لنـدن همـراه بـا منحنی به‌دست‌آمده از معادلات ۲-۱۶ (منحنی A) و ۲-۲۰ (منحنی B و C) می‌باشد. در مورد معادله اخیر کران‌های بالایی و پایینی عمق تونل و افت حجم در رسم نمودار به‌کار گرفته می‌شود. خـط تیـره مستقیم به راه حل پلاستیسیته مِیر و تِیلور اشاره دارد. این شکل نشان می‌دهد کـه داده‌هـای میـدانی مطابقت خوبی با هر دو رویکرد دارد. در مقابل، معادله ۲-۱۶ (منحنی A) مقدار $S_{v\max}$ را بـیش از حـد واقعی پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۲-۱۲. نشست زیرسطحی در بالای خط مرکزی تونل [۱۳]

نیرِن[1] در سال ۱۹۹۸ اندازه‌گیری‌هایی در شرایط محیط بایر در پـارک "سـنت جیمـز" در پـروژه Jubilee Line Extension انجام داد و آنها را با نتایج مِیر مقایسه کرد. داده‌های او نیز مطابقـت خـوبی

[1] . Nyren

با شکل ۲-۱۰ نشان می‌دهد. با این وجود هنگامی که داده‌های به‌دست آمده از پارک "سـنت جیمـز" را در نمودار ۲-۱۲ قرار داده و با آنها مقایسه کرد، مقدار این اندازه‌گیری‌های جدید به‌طور قابل توجهی بیشتر از داده‌های ارائه شده توسط مِیر در این نمودار بود. نیرِن به این نتیجـه رسـید کـه ایـن تفـاوت ناشی از مقدار بالای افت حجم اندازه‌گیری شده در این پروژه یعنی $V_L=3.3\%$ است. با نرمالیزه کردن S_{Vmax} هم نسبت به شعاع تونل R و هم V_L او نشان داد که همه این داده‌ها مطابقت بسـیار خـوبی بـا داده‌های اصلی نمودار دارند.

هیث[1] و وِست[2] یک رویکرد جایگزین برای برآورد عرض گـودی نشسـت و حـداکثر نشسـت بـرای نشست زیرسطحی ارائه کردند. در این روش آنها برای توصیف گودی نشست، به جای منحنی گـوس از توزیع دوجمله‌ای استفاده کردند. این رویکرد به این صورت است که:

$$\frac{i}{i_0}=\sqrt{\frac{z_0-z}{z_0}} \qquad (۲-۲۱)$$

i_0 عرض گودی در تراز سطح زمین است. حداکثر نشست زیرسـطحی S_{Vmax} متناسـب بـا $(z_0-z)^{-\frac{1}{2}}$ است. آنها پیشنهاد کردند که برای مقاصد طراحی، باید منحنی گـوس بـرای توصـیف گـودی نشسـت به‌کار گرفته شود اما عرض گودی باید از معادله بالا محاسبه شود. با مقایسـه S_{Vmax} و عمـق‌هـایی کـه آنها از محیط کار خود به‌دست آوردند با روابط ارائه شده توسط مِیر، به این نتیجه رسـیدند کـه بـرای عمق‌هایی که پارامتر z/z_0 آنها بـین ۰ تـا ۰/۸ اسـت، هـر دو رویکـرد بـرآوردهـای مشـابهی را ارائـه می‌دهند. با این وجود هیث و وِست مقادیر بزرگتری از S_{Vmax} را برآورد کردند کـه مطابقـت خـوبی بـا داده‌های میدانی نیز داشتند.

در بخش ۲-۷-۱ با فرض آنکه بردارهای برآیند جابه‌جـایی بـه سـمت مرکـز تونـل اشـاره دارنـد، جابه‌جایی افقی خاک در سطح زمین از جابه‌جایی عمودی آن به‌دست آمد و منتج به معادله ۲-۵ شد. تِیلور با پیروی از مِیر اظهار کرد که به منظور دستیابی به شرایط حجـم ثابـت، بردارهـای جابـه‌جـایی

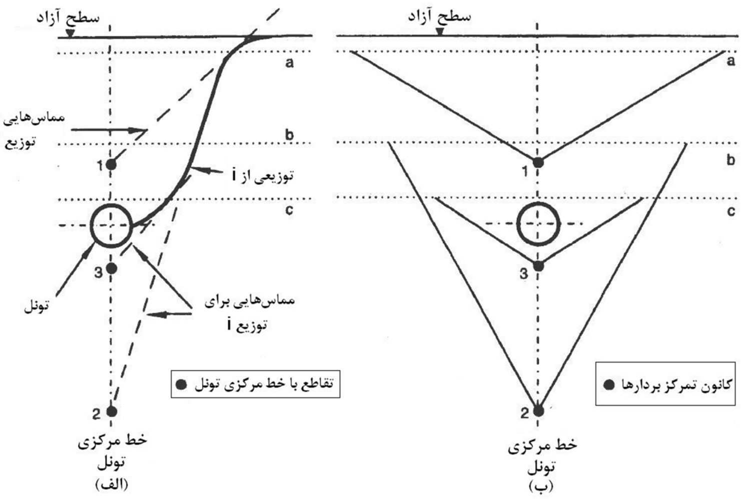
[1] . Heath
[2] . West

بایستی به سمت محل تقاطع خط توصیفی توسط معادله ۲-۱۷ (خط پر در شکل ۲-۱۰) با خط مرکزی تونل اشاره داشته باشند. این نقطه به اندازه $0.175z_0/0.325$ زیر سطح محوری تونل قرار دارد.

این امر که فرض حرکت ذرات خاک به سمت یک نقطه در محور تونل، در مجاورت تونل کافی نیست، برای اولین بار توسط نیو و باوِرز با ارائه اندازه‌گیری‌های زیرسطحی در تونل آزمایشی Heathrow Express مورد توجه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که گودی نشست زیرسطحی پیش‌بینی شده بر پایه فرض نشست نقطه‌ای بسیار باریک بوده و در نتیجه نشست در بالای خط مرکزی تونل بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی شده است. در عوض آنها پیشنهاد کردند که افت خاک زمین بر روی صفحاتی افقی در سطوح معکوس توزیع شود. با استفاده از این رویکرد، پیش‌بینی آنان مطابقت بهتری با داده‌های میدانی داشته است.

گِرَنت[1] و تِیلور بر اساس یک سری آزمایش‌های تفکیکی داده‌هایی از گودی‌های نشست زیرسطحی ارائه کردند. نتایج آزمایش‌های آنان به جز ناحیه‌ای در مجاورت تونل، مطابقت خوبی با معادله ۲-۱۷ نشان می‌داد. در مجاورت تونل، نتایج آزمایش گودی‌های باریک‌تر، و در نزدیک به سطح گودی‌های پهن‌تری را نشان می‌دادند. این پراکندگی i نسبت به z به‌طور خلاصه در شکل ۲-۱۳(الف) نشان داده شده است. با پیروی از گفته تِیلور که بردارهای جابه‌جایی خاک به سمت تقاطع پراکندگی i با z اشاره دارند، آنها استنباط کردند که بردارها به سمت خط مماس پراکندگی نشان داده شده در شکل ۲-۱۳(الف) اشاره دارند. تقاطع‌های خطوط مماس برای اعماق مختلف با خط مرکزی تونل در شکل ۲-۱۳(ب) نشان داده شده است. با پیروی از این چارچوب کاری مشخص می‌شود که جابه‌جایی افقی خاک در نزدیکی سطح زمین، با استفاده از معادله ۲-۱۷ کمتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود. داده‌های آزمایشگاهی آنان نیز این روندها را با نشان دادن مقدار زیاد جابه‌جایی افقی در نزدیکی سطح زمین تأیید می‌کنند.

[1]. Grant



شکل ۲-۱۳. (الف) توزیع پارامتر i نسبت به عمق برای نشست زیرسطحی (ب) تمرکز بردارهای جابه‌جایی خاک [۱۴]

گِرَنت و تِیلور اینچنین استنباط کردند که مقادیر بالای i در سطح مربوط به مرزهـای آزاد سـطح زمین در آزمایش‌هایشان است. آنها به این موضوع اشاره مـی‌کننـد کـه چنـین شـرایطی بـه نـدرت در محیط‌های شهری وجود دارد به طوری که حتی یک لایه نازک سـنگفرش خیابـان ممکـن اسـت قیـد کافی را برای کاهش و یا حتی منفی کردن این اثر (سطح آزاد) داشته باشد.

هاجیوارا[1] و همکاران به بررسی تأثیر لایه‌هایی ازخاک با سختی متفاوت که بر روی لایـه‌ای از رس که تونل در آن حفر می‌شود پرداختند. آنهـا چنـدین آزمـایش تفکیکـی را انجـام دادنـد کـه در آن‌هـا لایه‌هایی از ماسه با چگالی متفاوت بر روی لایه‌ای از رس قرار گرفته بود. ضخامت خاک روباره و سطح آب زیرزمینی طوری انتخاب شده بود که حالت تنش یکسانی را در لایـه رس بـرای همـه آزمـایش‌هـا فراهم کند. نتایج این آزمایش‌ها با موردی مشـابه کـه تنهـا لایـه‌ای از رس را دارد مـورد مقایسـه قـرار گرفتند.

برای به کمیت درآوردن سختی لایه بالایی نسبت به لایه رس، آنها یک ظرفیـت برشـی نسـبی را تعریف کردند که سختی برشی (در تنش‌های کم) و ضخامت لایه بالایی را بـه مقـادیر معـادل آنهـا در لایه مرجع رسی مرتبط می‌کرد.

[1] . Hagiwara

با مقایسه پارامتر i برای گودی‌های نشست زیرسطحی در آزمایش‌های متفاوت با نتایج حاصل از مواردی که تنها لایه‌های رسی موجود بوده است، آنها نشان دادند که با افزایش سختی لایه بالایی، گودی نشست وسیع‌تر و پهن‌تر خواهد شد. این آزمایش‌ها نشان دادند که رفتار نشست ناشی از حفر تونل متأثر از اندرکنش سختی مواد روباره با خاکی است که در آن تونل حفر می‌شود.

۲-۸. روش‌های تحلیلی

در روش‌های تجربی که در بخش قبل به آن‌ها اشاره شد، مشاهده می‌شود که در اغلب موارد پارامتر افت خاک -که در تعیین میزان نشست نقشی اساسی بر عهده دارد- به صورت تجربی تعیین می‌شود و برای شرایط متفاوت زمین و ترکیب و هندسه تونل متغیر است. در روش‌های تجربی در اغلب موارد اثرات روش حفر تونل و شکل تونل در تعیین افت خاک و به دنبال آن، در تعیین میزان نشست لحاظ نمی‌گردد در حالی‌که در واقع مقادیر افت خاک ممکن است بر اثر روش حفر تونل و شکل تونل تغییر کند.

با وجود اینکه نشست‌های تعیین شده توسط روش‌های تجربی در برخی موارد سازگاری خوبی با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده دارند، اما با کمبودهایی مواجه می‌باشند:

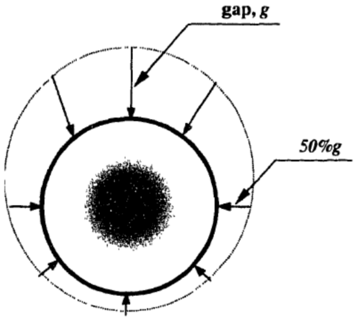
- این روش‌ها تنها برای تعداد محدودی از موارد ایجاد شده‌اند یا معتبر می‌باشند.
- کاربرد این روش‌ها تنها باید زمانی انجام گیرد که تونل مورد بررسی مشابه با موردی باشد که این روش از آن نتیجه شده است.
- تنها تعداد کمی از پارامترهای خاک و هندسه در آنها مورد توجه قرار گرفته است.
- این روش‌ها نحوه ساخت را در نظر نمی‌گیرند.
- این روش‌ها نمی‌توانند راه‌حل کاملی را برای یک تونل دارای نگهداری ارائه دهند.

بنابراین در اختیار داشتن راه‌حل‌های تحلیلی مبتنی بر روابط ریاضی می‌توانند به عنوان راه‌حل‌های ثابت به خصوص در زمین‌هایی با مواد همگن سودمند باشد. روش‌های تحلیلی ارائه شده

تاکنون براساس روش‌هایی مانند متغیرهای مختلط، سری‌های عمومی از توابع تنش در مختصات قطبی و روش تصویر مجازی می‌باشدکه در ادامه به بررسی مهمترین این روش‌ها می‌پردازیم.

۲-۸-۱. روش لُگانازان و پولوس :

رو[1] و کَک[2] در سال ۱۹۸۳ پارامتر فاصله[3] g را به عنوان فاصله خالی معادل دوبعدی (2D) شکل گرفته در اطراف تونل معرفی کردند (شکل۲-۱۴). این فاصله تحت تأثیر اثرات ترکیبی تغییرشکل الاستوپلاستیک سه بعدی زمین در سینه‌کار تونل، حفاری اضافی خاک در پیرامون سپر ، فاصله فیزیکی مربوط به سپر و هندسه تونل ایجاد می‌شود.



شکل ۲-۱۴. تغییر بیضوی شکل زمین پیرامون مقطع تونل [۷]

همانطور که در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است، پارامتر فاصله را می‌توان با استفاده از روش تئوری ارائه شده توسط لی[4] و همکاران به‌دست آورد. پارامتر فاصله در شرایط زهکشی‌نشده را می‌توان به صورت زیر تخمین زد:

$$g = G_p + u^*_{3D} + \varpi \qquad (۲-۲۲)$$

---

[1] . Rowe
[2] . Kack
[3] . gap parameter
[4] . Lee

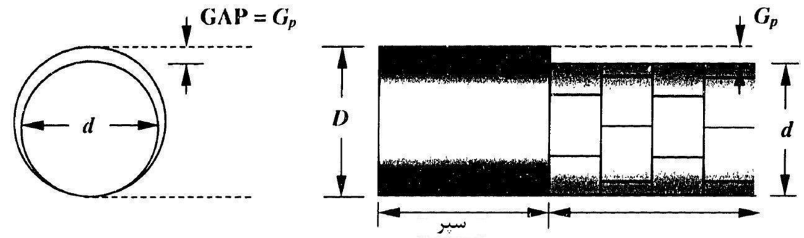
در این رابطه:

G_p = فاصله فیزیکی است که نشان‌دهنده فضای باز بین پوسته خارجی سپر و پوشش نگهـداری تونل است(شکل ۲-۱۶). $G_p = 2\Delta + \delta$

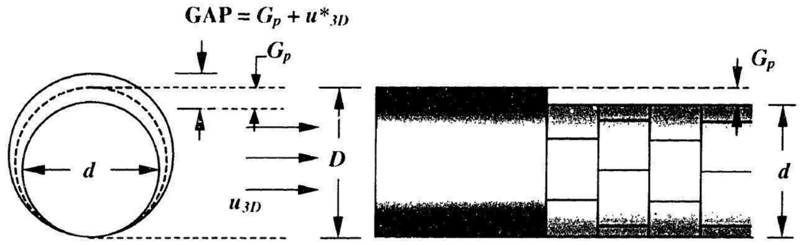
Δ = ضخامت قسمت عقب ماشین

u^*_{3D} = فضای باز مورد نیاز برای نصب نگهداری

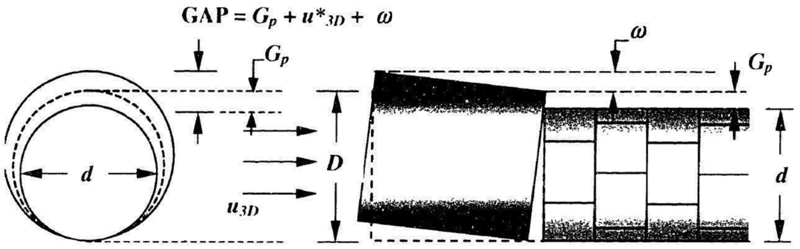
ω = مقداری که برای در نظرگرفتن کیفیت مهارت در ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرد.



(الف) پیشروی تونل در امتداد درست و نگهداری کامل در سینه‌کار



(ب) پیشروی تونل در امتداد صحیح در حالی که به سبب رهایی تنش، در سینه‌کار جابه‌جایی خاک دیده می‌شود



(ج) پیشروی تونل تحت تأثیر همه منابع ممکن افت حجم قرار دارد که شامل بیش‌حفاری ناشی از امتداد تونل و مشکلات مهارت ساخت می‌شود

شکل ۲-۱۵. شبیه‌سازی افت خاک (پارامتر فاصله) [۱۵]

میدان تنش آزاد زمین در یک مقطع خاص با نزدیک شدن حفاری به آن تغییر می‌کند. اگر فشار خالص در پشت کله حفار از تنش میدان آزاد زمین کمتر باشد، توده خاک به سمت داخل سینه‌کار خواهد آمد. حجم خاکی که به داخل تونل سرازیر می‌شود، به رهایی فشار سینه‌کاری که در نهایت حفر می‌شود بستگی خواهد داشت. مؤلفه u^*_{3D} در رابطه ۲-۲۲ را می‌توان اینچنین تعریف کرد:

$$u^*_{3D} = \frac{k}{2}\delta_x \qquad (۲-۲۳)$$

در این رابطه:

k = فاکتور مقاومتی خاک-دیسک

δ_x = نفوذ خاک به سینه‌کار تونل

لی و همکاران روابطی تجربی و همین‌طور روابط تحلیلی الاستوپلاستیک را برای k و δ_x ارائه کردند. پارامتر k اساساً یک ضریب تصحیح است که بیان‌کننده پدیده‌ای است که در آن خاک به‌صورت گنبدی به سمت سینه‌کار هجوم می‌آورد و به این صورت بیان می‌شود:

$$k = \frac{V_1}{V_2} \qquad (۲-۲۴)$$

در این رابطه V_1 و V_2 به این صورت تعریف می‌شوند:

V_1 = حجم نفوذ محوری غیر یکنواخت خاک در طول سینه کار که با تحلیل سه بعدی تعیین می‌شود

V_2 = حجم با در نظرگیری نفوذ محوری یکنواخت

مقادیر پیشنهادی برای k از ۰/۷ برای خاک رس سخت تا ۰/۹ برای خاک رس نرم تغییر می‌کند. $k=1$ نشان‌دهنده نفوذ یکنواخت به درون سینه‌کار است. لی و همکاران مشاهده کردند که درصورتی که جریان پلاستیک روی دهد (رس بسیار نرم)، نفوذ خاک در نزدیکی مرکز سینه‌کار کاملاً یکنواخت خواهد بود. پارامتر δ_x معرف بزرگی حداکثر میزان نفوذ محوری در سینه‌کار است که به این صورت بیان می‌شود:

$$\delta_x = \frac{\Omega R P_0}{E} \qquad (۲-۲۵)$$

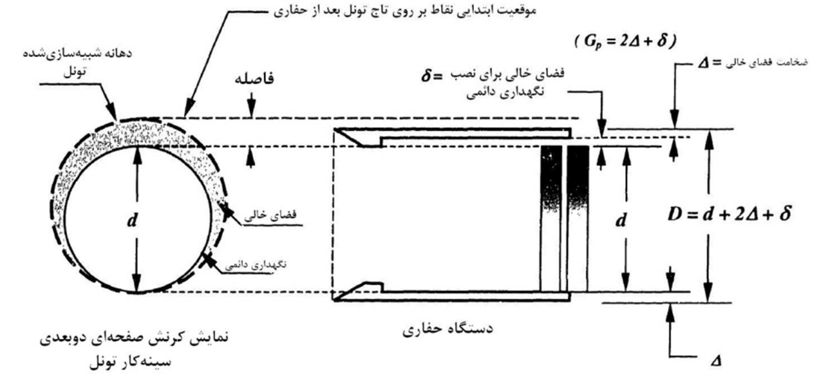
در این رابطه:

Ω = ضریب جابه‌جایی بدون بعد

R = شعاع تونل

E = مدول یانگ (معمولاً مدول در شرایط زهکش‌نشده)

P_0 = کل تنش حذف شده از سینه‌کار تونل



شکل ۲-۱۶. تعریف پارامتر فاصله [۱۵]

مقدار کل تنش حذف شده از سینه‌کار تونل P_0 را می‌توان بدین صورت به‌دست آورد:

$$P_0 = \left(K_0 P_v' + P_w\right) - P_i \qquad (۲-۲۶)$$

که در این رابطه :

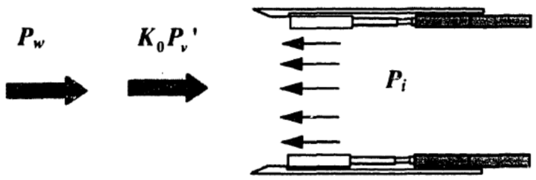
K_0 = ضریب فشار زمین در حالت برجا

P_v' = تنش عمودی مؤثر در نزدیکی تونل

P_w = فشار منفذی در نزدیکی تونل در حالت برجا

P_i = فشار نگهداری تونل (در صورتی که نگهداری موجود نباشد $P_i = 0$ خواهد بود و درصورتی که هوای فشرده یا وسایل نگهداری دیگری به‌کارگرفته شوند $P_i > 0$ خواهد بود.)

همگی فشارهای عمل‌کننده روی تونل در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۷. فشارهای عمل‌کننده روی تونل حین حفاری [۷]

تخمین پارامتر فاصله با استفاده از روش لی، پدیده تحکیم که وابسته به زمان است و همچنین مؤلفه‌های خزش را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین اتلاف خاک معادل به‌دست آمده با استفاده از پارامتر فاصله تنها بیانگر شرایط برای زمانی درست پس از عبور سپر است. مزیت‌های استفاده از پارامتر فاصله برای تعیین افت خاک معادل به این صورت است:

- انواع مختلف روش‌های ساخت تونل و اشکال مختلف تونل را در بر می‌گیرد.
- در این روش رفتار الاستوپلاستیک خاک را می‌توان در نظر گرفت.

لگانازان و پولوس مقدار افت خاک معادل ε_0 را بر اساس پارامتر فاصله g از رابطه زیر محاسبه کردند:

$$\varepsilon_0 = \frac{4gR + g^2}{4R^2} \times 100\% \qquad (۲-۲۷)$$

در این رابطه :

R = شعاع تونل

g = پارامتر فاصله به‌دست آمده در رابطه ۲-۲۲

محاسبات مربوط به اتلاف خاک و تغییرشکل زمین که توسط ورویْجْت و بوکر ارائه شد، بر پایه حرکت شعاعی یکنواخت خاک در اطراف تونل است (شکل ۳-۲۲). اما همانطور که رو و کَک نیز اشاره دارند، حرکت شعاعی خاک پیرامون تونل یکنواخت نیست زیرا فاصله خالی دو بعدی در اطراف تونل

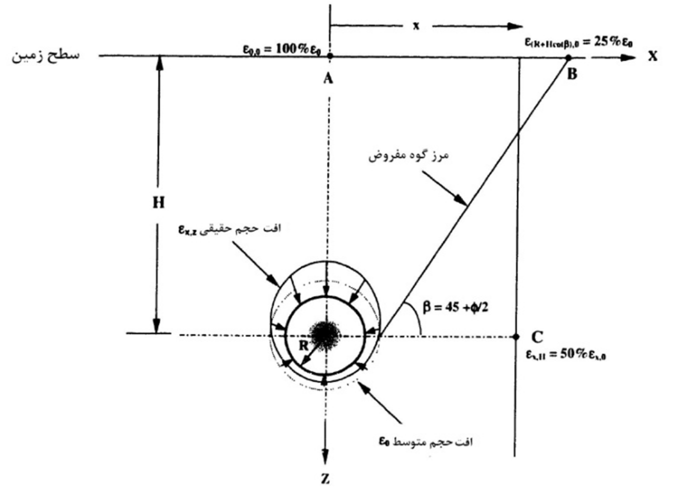
مطابق شکل ۲-۱۴ دایروی نبوده و بیضی‌شکل است. دلایل شکل‌گیری فاصله خالی بیضی‌شکل بر پایه اظهارات رو و کَک به شرح زیر است:

- راهبران دستگاه حفاری، سپر را با یک زاویه شیب ملایم رو به بالا نسبت به امتداد طراحی شده هدایت می‌کنند تا از گرایش رو به پایین سپر جلوگیری کنند.
- نگهداری تونل بعد از جابه‌جایی قسمت عقبی دستگاه حفاری و پیشروی دستگاه بر روی زمین نشست می‌کند.
- جابه‌جایی‌های الاستوپلاستیک سه بعدی خاک در سینه‌کار تونل رخ می‌دهد.

پارامتر افت خاک معادل به‌دست آمده از رابطه ۲-۲۷ نیز مورد اصلاح قرار گرفت تا در مورد حرکت شعاعی غیریکنواخت (بخاطر شکل بیضوی) در اطراف تونل به‌کار گرفته شود. مؤلفه پارامتر افت خاک معادل $\varepsilon_{x,z=0}$ که باعث نشست سطحی می‌گردد، ممکن است به‌صورت یک تابع نمایی در نظر گرفته شود که این تابع نمایی حرکت غیریکنواخت خاک در اطراف تونل را نشان می‌دهد:

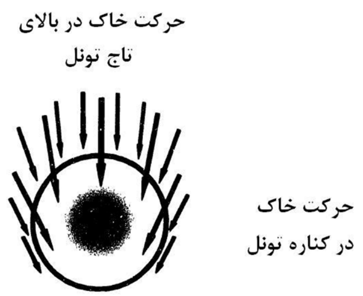
$$\varepsilon_{z,z=0} = \varepsilon_0 B.\exp\left(-Ax^2\right) \qquad (۲-۲۸)$$

که در این رابطه A و B مقادیر ثابت و ε_0 افت خاک معادل به‌دست آمده از رابطه ۲-۲۷ است. مقادیر A و B از شرایط مرزی همانطور که در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است، به‌دست می‌آیند.

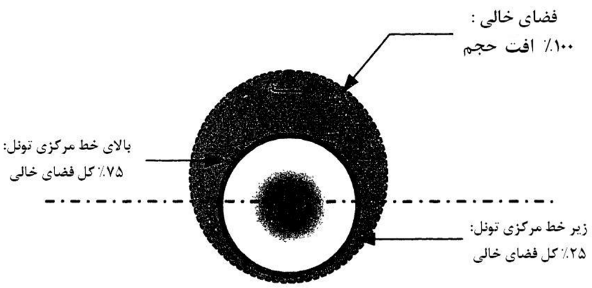


شکل ۲-۱۸. الگوی تغییرشکل زمین و شرایط مرزی افت خاک [۱۶]

همانطور که در شکل ۲-۱۹ دیده می‌شود، هنگامی که قسمتی از خاک بالای تاج تونل به پوشش نگهداری تونل می‌رسد، خاک در کناره‌های تونل به سمت کف تونل جابجا می‌شوند. بنابراین هرگونه حرکت به سمت بالای خاک در زیر تونل بسیار محدود است. لُگانازان و پولوس فرض کردند که با نشست پوشش بتنی تونل بر روی کف فاصله خالی دایروی (ناشی از وزن پوشش)، فاصله بین تاج پوشش بتنی تونل و تاج فضای حفاری شده، دو برابر فاصله خالی دایروی خواهد شد (شکل ۲-۲۰). این اظهار نظر بر پایه این فرض ساده هندسی است که فضای خالی بالای خط مرکزی تونل ۷۵ درصد فضای خالی کل می‌باشد. در نتیجه آنان چنین فرض کردند که ۷۵ درصد جابه‌جایی عمودی خاک در حلقه بالایی فضای خالی تونل مطابق با شکل ۲-۲۰ رخ می‌دهد.



شکل ۳-۱۹. جابه‌جایی خاک به طرف تونل [۷]



شکل ۲-۲۰. الگوی تغییرشکل بیضوی زمین در اطراف تونل [۱۶]

برای بیان ارتباط بین پارامتر عرض گودی نشست، که معیاری غیرمستقیم از ناحیه تأثیر جابه‌جایی زمین است، با عمق تونل می‌توان از زاویه‌ای با نام β استفاده کرد. این زاویه از خط مرکزی

تونل شروع شده و تا آخرین نقطه تغییرشکل در سطح زمین امتداد می‌یابد. بر اساس مشاهدات کُردینگ و هَنس‌مایِر زاویه β را می‌توان به صورت $45+\phi/2$ بیان کرد که φ زاویه اصطکاک است. در نتیجه برای شرایط غیر زهکشی شده زمین $\beta = 45^\circ$ و $\cos\beta=\frac{\sqrt{2}}{2}$ خواهد بود.

بر اساس فرضیات بالا، نشست سطحی در بالای محور تونل افت خاک تجمعی کامل ($100\%\varepsilon_0$) در اطراف تونل است که در شکل ۲-۱۸ به صورت نقطه A نشان داده شده است. همچنین نشست سطحی در راستای افقی $(R+H\cot\beta)$ خواهد بود که در شکل مذکور با علامت B مشخص شده است و افت خاک تجمعی جزئی ($25\%\varepsilon_0$) خواهد بود.

در حالت زمین زهکشی نشده که $\beta = 45^\circ$ است و با به‌کارگیری شرایط مرزی شکل ۲-۱۸ در رابطه ۲-۲۸ ، مؤلفه افت خاک معادل که جابه‌جایی عمودی غیریکنواخت را مدل می‌کند، از رابطه زیر به‌دست خواهد آمد:

$$\varepsilon_{x,z} = \varepsilon_0 \exp\left[\frac{-1.38x^2}{(H+R)^2}\right] \qquad (۲-۲۹)$$

لگانازان و پولوس فرض کردند که حرکت افقی خاک به درون فاصله خالی در خط مرکزی تونل حداکثر و در تاج تونل صفر می‌باشد. درنتیجه جابه‌جایی جانبی خاک به صورت متقارن نسبت به محور تونل خواهد بود. مؤلفه حرکت جانبی خاک به این صورت خواهد بود:

$$\varepsilon_{x,z} = \varepsilon_{x,z=0} C.\exp(-Dz^2) \qquad (۲-۳۰)$$

در این رابطه C و D ضرایب ثابتی هستند که به شرح زیر از شرایط مرزی مشتق می‌شوند.

بر اساس هندسه بیضوی شکل فضای خالی، بزرگی جابه‌جایی افقی در تراز خط مرکزی تونل تقریباً نصف جابه‌جایی عمودی در تاج تونل است که همین موضوع باعث می‌شود ۷۵ درصد جابه‌جایی خاک در حلقه بالایی فضای بیضوی شکل اطراف تونل رخ دهد. بنابراین مؤلفه افت خاک معادل مربوط به جابه‌جایی افقی در فاصله افقی x در عمق H ($\varepsilon_{x,H}$) که در شکل ۲-۱۸ با علامت C نشان

داده شده است، تقریباً ۵۰ درصد افت خاکی خواهد بود که باعث تغییرشکل سطحی ($\varepsilon_{x,z=0}$) در فاصله افقی x می‌شود.

با به‌کارگیری شرایط مرزی شکل ۲-۱۸ و جایگزین کردن رابطه ۲-۲۹ در رابطه ۲-۳۰، پارامتر افت خاک معادل اصلاح شده را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\varepsilon_{x,z} = \frac{4gR + g^2}{4R^2}\exp\left\{-\left[\frac{1.38x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2}\right]\right\} \qquad (۲-۳۱)$$

توجه کنید که اگر $\delta = 0$ باشد، گودی‌های نشست سطحی پیش‌بینی شده توسط روش ورویْجْـت و بوکِر عریض‌تر و گشادتر از مقادیر مشاهده شده خواهد بود. این روش تحلیلی به گونه‌ای توسط لگانازان و پولوس اصلاح شد که حاصل آن افت خاک تعریف شده در رابطه ۲-۳۱ بود. علاوه بر این در رویکرد جدید بیضوی شدن تونل مورد چشم‌پوشی قرار گرفت ($\delta = 0$) زیرا آنها بر این عقیده بودند که بیضوی شدگی تنها در بلندمدت و با مقیاس‌های بسیار کوچک انجام می‌شود. در نهایت رابطه اصلاح شده برای پیش‌بینی تغییرشکل سطح را می‌توان به این صورت بیان کرد:

$$U_{z=0} = 4(1-\nu)R^2\frac{H}{(H^2+x^2)}\frac{4gR+g^2}{R^2}\exp\left[-\frac{1.38x^2}{(H+R)^2}\right] \qquad (۲-۳۲)$$

۲-۹. روش‌های عددی

هدف از این روش‌ها محاسبه جابجایی زمین در هر نقطه، در زمین اطراف تونل ایجاد شده می‌باشد. این روش‌ها نیز خصوصیات زمین (هندسه، تنش‌های اولیه، رفتار زمین، مراحل حفاری و غیره) را در ساخت مدل و انجام محاسبات لحاظ می‌کنند. امروزه افزایش قابلیت رایانه‌ها موجب انقلاب در حوضه تونل‌سازی شده است. در واقع دیگر هیچ پروژه مهم تونل‌سازی نیست که بدون پشتیبانی تحلیل‌های تمام عددی انجام شود. بدون شک روش‌های ساده شده‌ای که در بخش‌های قبلی به آن‌ها اشاره شد، هنوز نقش مهمی را ایفا می‌کنند و نمی‌توان آن‌ها را حذف کرد زیرا آن‌ها منعکس کننده عرف تونل‌سازی و تجربه می‌باشند. اما دورانی که در آن طراحی تونل تنها براساس تجربه، درک

مستقیم و راه‌حل‌های تحلیلی مدل‌های ساده پیوسته باشد، سپری شده است. امروزه مهندسین تونل‌سازی با محدوده وسیعی از ابزارهای عددی جدید روبرو می‌باشند که می‌توان از آن‌ها به روش‌های المان محدود، تفاضل محدود، المان مرزی، المان مجزا و غیره اشاره کرد. رفتارهای پیچیده مواد و شرایط مرزی توسط روش‌های عددی به حساب آورده می‌شوند، ضمن این‌که مطالعات پارامتریک برای بهبود طراحی را می‌توان به راحتی توسط این روش‌ها انجام داد. استفاده صحیح از ابزارهای عددی نیازمند دانش پیش زمینه کافی، نه تنها در مهندسی ژئوتکنیک بلکه همچنین یک درک پایه‌ای خوب از خود روش عددی می‌باشد. برخلاف روش‌های تحلیلی، صحت و سقم نتایج آنالیزهای عددی به سختی قابل اثبات می‌باشد و تنها قضاوت مهندسی خوب ممکن است نتایج قابل پذیرش را ارزیابی کند. از جهت دیگر نیاز برای تخصصی کردن تحلیل‌های عددی اغلب یک مانع ارتباطی بین طراحان و مدل‌سازهای تحلیلی می‌باشد. هنگامی که به یک کار طراحی نظر می‌کنیم، نقش روش‌های عددی نسبت به بقیه روش‌ها بحث برانگیزتر به نظر می‌رسد[۱۷].

روش المان محدود از معمول‌ترین روش‌هایی است که در فعالیت‌های تونل‌سازی کاربرد دارد. این روش قابلیت تحلیل مسائل را در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی دارا می‌باشد. روش المان محدود دو بعدی در صفحه‌ای عمود بر محور تونل انجام می‌شود که با روش‌های تحلیلی و مفهوم همگرایی-همجواری سازگار می‌باشد. باید توجه داشت که از این روش همچنین برای به دست آوردن یک ارزیابی از بارهای اعمال شده به نگهداری تونل استفاده می‌شود، و یک ابزار قدرتمند برای طراحی تونل است. روش‌های عددی دو بعدی برای مدل‌سازی شرایط کرنش صفحه‌ای مناسب می‌باشند. اما مدل‌های سه بعدی نسبت به مدل‌های دو بعدی ارجحیت دارند. زیرا برای مدل‌های دو بعدی تخمین فاکتورهای کاهش تنش، که بخشی از بار مؤثر بر روی تونل می‌باشد چندان ساده نیست، و به کلی براساس تجربه عملی می‌باشد. در یک مدل سه بعدی تخمین فاکتورهای کاهش تنش دیگر مورد نیاز نیست زیرا مراحل حفاری را می‌توان نه تنها در مقطع عرضی بلکه همچنین در مقطع طولی مدل کرد[۱۸].

۲-۱۰. جمع‌بندی

- دو پدیده نشست و آسیب و ناپایداری سازه‌های سطحی از مهمترین اثرات جانبی ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری است که شناسایی، پیش‌بینی و کنترل آنها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

- عوامل محیطی و اجرایی فراوانی در مکانیزم نشست و اثرات آن دخیل هستند که شناخت همگی آن‌ها در دستیابی به درک کامل از مسئله نشست مؤثر است.

- علاوه بر جابجایی‌های عمودی، جابجایی‌های افقی نیز نقش بسیاری در عوارض و پدیده‌های ناشی از نشست دارند و مطالعه آن‌ها نیز حائز اهمیت است.

- روش‌های پیش‌بینی پدیده نشست به عنوان پدیده عمده و مادر سایر پدیده‌های ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی در سه دسته تجربی، تحلیلی و عددی رده‌بندی می‌شوند. در به‌کارگیری دو روش اول باید توجه داشت که تمام شرایط مورد نیاز برای استفاده از روش و مدل، مورد توجه قرار گیرد.

فصل سوم

پیش‌بینی خسارات سازه‌های سطحی

۳-۱. مقدمه

ساخت تونل در زمین‌های نرم باعث جابه‌جایی و حرکت زمین خواهد شد، که بیشتر در سطح زمین به‌صورت گودی نشست سطحی قابل ملاحظه خواهد بود. در محیط‌های شهری این نشست زمین می‌تواند سازه‌های سطحی و زیرسطحی را تحت تأثیر قرار دهد. پیش‌بینی تغییرشکل سازه‌ها ناشی از حفر تونل و برآورد ریسک خسارت ناشی از آن بخشی ضروری در برنامه‌ریزی، طراحی و ساخت تونل در محیط‌های شهری است[۱۹]. در این قسمت رویکردهای مورد استفاده در پیش‌بینی و برآورد خسارات بالقوه ساختمان‌ها به‌طور خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲. تعریف تغییر شکل ساختمان

بورلَند[۱] و وُرث[۲] اشاره داشتند که یک سری از علامت‌ها و اندازه‌ها را می‌توان برای کمّی کردن تغییرشکل ساختمان‌ها مورد استفاده قرار داد. آنها نه پارامتر را برای تعریف تغییرشکل ساختمان معرفی کردند. پارامترهای زیر که در شکل ۳-۱ نیز آورده شده‌اند، معرفی شدند:

۱. **نشست** : حرکت قائم یک نقطه را تعریف می‌کند. مقادیر مثبت حرکت رو به پایین را نشان می‌دهند. (S_V در شکل ۳-۱ (الف))

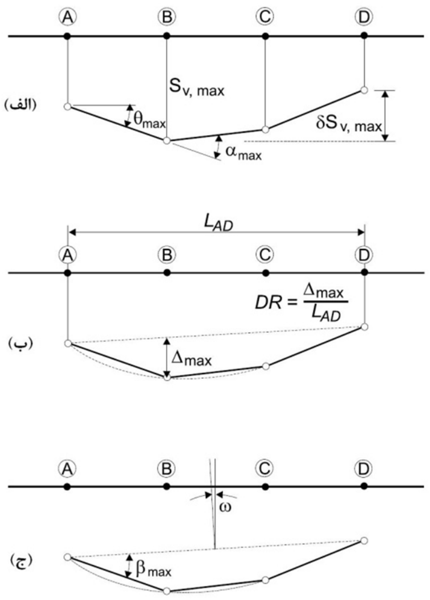
۲. **نشست نسبی** : δS_V تفاوت بین دو مقدار نشست را نشان می‌دهد. (شکل ۳-۱ (الف))

۳. **چرخش یا شیب** : θ معرف تغییر شیب خطی مستقیم است که این خط دو نقطه مرجع موجود در سازه را به یکدیگر متصل می‌کند. (شکل ۳-۱ (الف))

۴. **کرنش زاویه‌ای**: که با α تعریف می‌شود و هنگامی که مثبت باشد تقعر رو به بالا و در صورت منفی بودن تقعر رو به پایین ایجاد می‌کند. (شکل ۳-۱ (الف))

۵. **خمش نسبی** : Δ حداکثر جابه‌جایی نسبت به خط مستقیم متصل کننده دو نقطه مرجع با فاصله L را توصیف می‌کند. مقادیر مثبت نشان دهنده تقعر رو به بالا است (شکل ۳-۱ (ب))

---
[1] . Burland
[2] . Worth



شکل ۳-۱. تعریف تغییر شکل ساختمان [۲۰]

۶. **نرخ خمش** : DR در حقیقت نسبت خمش نسبی به طول متناظر آن است. (شکل ۳-۱ (ب))

$$DR = \frac{\Delta}{L}$$

۷. **کج‌شدگی** : ω کج‌شدگی جسم صلب ساختمان فوقانی و یا یک قسمت مجزا از آن را توصیف می‌کند. در صورتی که ساختمان بخودی خود خمش داشته باشد، محاسبه آن سخت خواهد بود. (شکل ۳-۱ (ج))

۸. **کج‌شدگی نسبی یا تغییرشکل زاویه‌ای:** β به صورت چرخش خط واصل دو نقطه مرجع نسبت به کج‌شدگی تعریف می‌شود. (شکل ۳-۱ (ج))

۹. **کرنش افقی متوسط:** ε_h به صورت نسبت تغییرات طول δL به طول متناظر آن L تعریف می‌شود.

$$\varepsilon_h = \delta L / L$$

تعاریف بالا تنها تغییرشکل‌های روی صفحه یا دو بعدی را توصیف می‌کنند. رفتارهای سه‌بعدی مانند پیچش شامل این بحث نمی‌شوند.

از زمان تعریف این پارامترها توسط بورلَند و وُرث، ایـن تعـاریف بـه‌طـور گسـترده مـورد توجـه و استفاده قرار گرفته‌اند. با این وجود رانکین اشاره می‌کند که برای کمّی کردن پارامترهـای تغییرشـکل، تعداد بسیار زیادی نقاط مشاهده مورد نیاز است. او بیان می‌کنـد کـه چنـین اطلاعـاتی بـه نـدرت در کارهای مهندسی در دسترس می‌باشد.

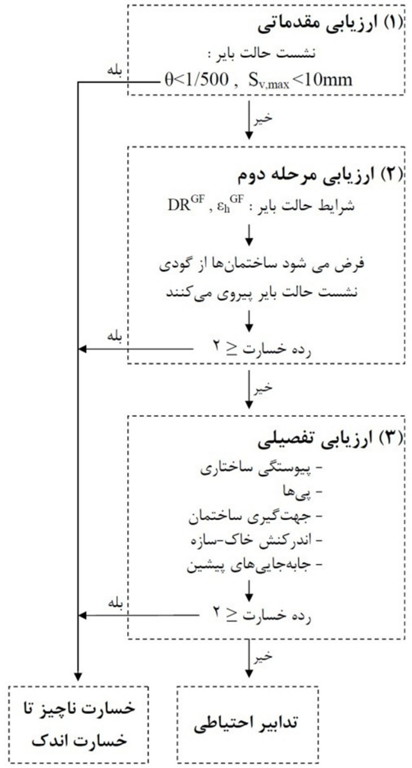
پارامترهای نرخ خمش DR و کرنش افقی ε_h هنگام برآورد خسـارت سـاختمان از اهمیـت بسـیار بالایی برخوردار هستند. این پارامترها به عنوان معیارهای تغییرشکل در ادامه معرفی خواهند شد.

۳-۳. ارزیابی ریسک خسارت

این قسمت رویکرد موجود و رایجی را که امروزه برای برآورد خسارت بالقوه ساختمان‌هـا ناشـی از ساخت تونل مورد استفاده قرار می‌گیرد مورد بررسی قرار می‌دهـد[۱۹]. رویکـرد طراحـی شـامل سـه مرحله است، که در شکل ۳-۲ به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. این مراحل به‌صـورت *ارزیـابی مقدماتی* ، *ارزیابی مرحله دوم* و *ارزیابی تفصیلی* تعریف می‌شوند.

۳-۳-۱. ارزیابی مقدماتی

در این مرحله وجود و حضور ساختمان در نظر گرفته نمی‌شود. در عوض مقطع نشست در شرایط زمین بایر برآورد می‌شود (معمولاً به‌صورت نقشه‌های کنتوری در طول مسیر تونل). رانکین راهبردی را ارائه می‌کند که نشان می‌دهد چگونه پارامترهای حداکثر نشست و حـداکثر شـیب سـاختمان بـر روی خسارت بالقوه آن تأثیر می‌گذارند. او نشان داد که برای شـیب کمتـر از $\theta = 1/500$ و S_{Vmax} کمتـر از ۱۰ میلیمتر ریسک خسارت ساختمان ناچیز خواهد بود. ساختمان‌هایی که در محدوده‌ای واقـع شـوند که پیش‌بینی حالت بایر آنها کمتر از آستانه‌ای باشد که در بالا آورده شد، فرض مـی‌شـود کـه ریسـک خسارت ناچیزی را تجربه خواهند کرد. این ساختمان‌ها به منظور اجتناب از محاسبات بیشتر دیگـر در نظر گرفته نخواهند شد.



شکل ۳-۲. رویکرد سه مرحله‌ای ارزیابی ریسک خسارت [۱۰]

این رویکرد بسیار ساده و محافظه‌کارانه است زیرا تنها نشست زمین بایر در نظر گرفته شده است. این نگرش هیچگونه اطلاعاتی در مورد تغییرشکل ساختمان در اختیار نمی‌گذارد. مقادیر حداکثر شیب و حداکثر نشست که در بالا آورده شد، در صورت در نظرگرفتن ساختمان‌هایی با حساسیت بالاتر، ممکن است کاهش یابند. در صورتی که مقدار نشست حالت بایر مربوط به یک ساختمان از حداکثر شیب و نشست تجاوز کند، ارزیابی مرحله دوم بایستی انجام شود.

۳-۳-۲. ارزیابی مرحله دوم

در این مرحله از ارزیابی ریسک، یک تیر الاستیک جایگزین ساختمان می‌شود که فرض می‌شود پِی آن از مقطع نشست پیروی می‌کند. این مقطع نشست نیز توسط گودی نشست حالت بایر که در معادله ۳-۲۱ ارائه شد، توصیف می‌شود. برای این حالت زمین بایر تنها بخشی از گودی نشست که در

زیر ساختمان قرار دارد برای محاسبه نرخ‌های خمش DR^{GF} (هر دو ناحیه تقعر رو به بالا و تقعر رو به پایین) و کرنش‌های افقی حداکثر ε_h^{GF} (هم فشردگی و هم کشیدگی) مورد استفاده قرار می‌گیرد. با داشتن این اطلاعات، کرنش در درون تیر با استفاده از رویکردی که در بخش‌های بعدی توضیح داده شده است محاسبه خواهد شد. سپس انواع خسارت که در بخش بعدی آورده شده، با استفاده از بزرگی این کرنش قابل دسته‌بندی خواهد بود.

با این وجود که این رویکرد تفصیلی‌تر از ارزیابی مقدماتی است، اما از آنجایی که فرض بر آن است که ساختمان از گودی نشست حالت بایر پیروی می‌کند، این روش باز هم محافظه‌کارانه می‌باشد. مطالعات موردی نشان داده است که سختی و صلبیت ساختمان‌ها طوری با زمین اندرکنش دارند که نرخ خمش و کرنش افقی را کاهش می‌دهند[۲۱]. بورلَند اشاره دارد که رده خسارتی به‌دست آمده از این ارزیابی تنها درجه خسارت ممکن را نشان می‌دهد و در بیشتر موارد خسارت واقعی کمتر از رده خسارتی پیش‌بینی شده است.

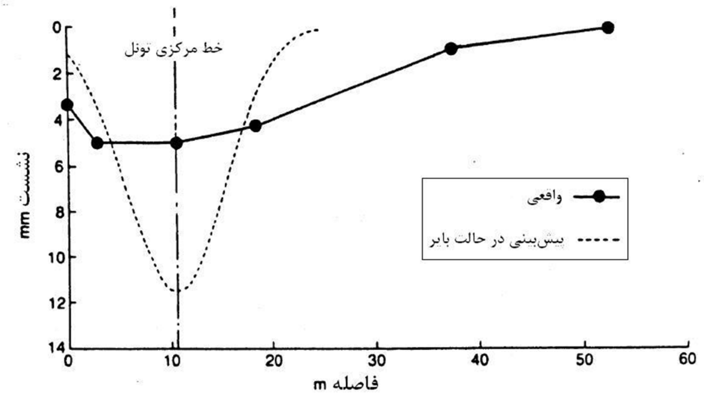
رده‌های خسارت که در جدول ۳-۱ آورده شده‌اند و در قسمت ۳-۴ به تفصیل توصیف شده‌اند، رده‌های مختلفی چون زیبایی (رده ۰ تا ۲)، کارآیی (۳ و ۴) و پایداری و استحکام (۵) را از یکدیگر متمایز می‌کند. برای ساختمان‌هایی که از رده خسارتی ۲ تجاوز کنند (به عبارتی خسارت، کارآیی ساختمان را تحت تأثیر قرار دهد)، ارزیابی تفصیلی بایستی انجام شود.

۳-۳-۳. ارزیابی تفصیلی

در این مرحله جزئیات ساختمان و همچنین ساخت تونل می‌بایستی مورد توجه قرار گیرند. این جزئیات شامل فرآیند سه بعدی ساخت تونل و جهت‌گیری ساختمان نسبت به تونل می‌باشد. خصوصیات ساختمان همچون طرح پِی، پیوستگی ساختاری و همچنین هرگونه جابه‌جایی‌های قبلی محتمل ساختمان در گذشته باید مورد توجه قرار گیرند[۲۰].

از آنجایی که صلبیت ساختمان ممکن است باعث کاهش تغییرشکل آن شود، اندرکنش بین خاک و سازه فاکتوری کلیدی است. شکل ۳-۳ نشست ساختمان شهرداری لندن را که ناشی از حفر تونل

Docklands Light Railway می‌باشد را نشان می دهـد. ایـن شـکل نشسـت سـاختمان را بـا گـودی نشست پیش‌بینی شده در حالت زمین بایر مقایسه مـی‌کنـد. ایـن شـکل نشـان مـی‌دهـد کـه حضـور ساختمان، هم حداکثر زاویه و هم حداکثر نشست را در مقایسه با حالت بـایر کـاهش مـی‌دهـد. اثـری مشابه، کرنش افقی در سازه را کاهش می‌دهد[۲۲]. *پاتْس*[1] و *اَدِن‌بروک*[2] نشان دادند کـه مـی‌تـوان بـا تلفیق اندرکنش خاک-ساختمان با ارزیابی مرحله دوم تعداد مـواردی را کـه بایـد بـرای آنهـا ارزیـابی تفصیلی انجام شود را کاهش داد.



شکل ۳-۳. نشست ساختمان شهرداری لندن ناشی از تونل‌سازی [۲۱]

بورلَند اشاره دارد که به سبب فرض محافظه‌کارانه در ارزیابی مرحله دوم، ارزیابی تفصیلی معمـولاً رده‌های خسارتی پایین‌تری نسبت به آنچه در ارزیابی مرحلـه دوم بـه‌دسـت آمـده اسـت، پـیش‌بینـی می‌کند. اگر ریسک خسارت بالا باقی بماند، باید به این مسأله رسیدگی شود که آیـا تـدابیر احتیـاطی لازم است یا خیر. تدابیر احتیاطی تنها برای ساختمان‌هایی لازم خواهد بود که بعد از ارزیابی تفصـیلی رده خسارتی آنان ۳ یا بالاتر قرار گیرد.

۳-۴. رده‌بندی خسارات

بورلَند و همکاران چندین رویکرد را برای کمّی کردن خسارت ساختمان ارائـه کردنـد. بـا در نظـر گرفتن خسارات ساختمان‌ها سه معیار متمایز را شناسایی کردند:

1 . Potts
2 . Addenbrooke

۱. نمای ظاهری

۲. کارآیی یا قابلیت

۳. پایداری و استحکام

آنها چنین نتیجه‌گیری کردند که نمای ظاهری یک ساختمان در صورتی که عناصر ساختاری انحرافی در حدود $1/250$ از حالت قائم یا افقی داشته باشند، ممکن است تحت تأثیر قرار گیرد. انحرافی حدود $1/100$ و یا نرخ خمشی برابر $1/250$ کاملاً واضح خواهد بود. هرچند آنها اشاره داشتند که از آنجایی که خسارت ظاهری معیارهایی کیفی و ذهنی دارد، کمّی کردن و اندازه‌گیری آن بسیار سخت است. آنها سیستمی برای رده‌بندی خسارت بر مبنای سهولت تعمیرات ارائه کردند که این رده‌بندی در جدول ۳-۱ به‌صورت شماتیک قرار داده شده است.

در این لیست عرض ترک به عنوان شاخص اضافی آورده شده است، اما تأکید بر روی سهولت تعمیرات است. این نکته نیز قابل ذکر است که این رده‌بندی برای ساختمان‌های آجرکاری یا بنایی با سنگ است. درجه شدت ذکر شده در جدول تنها برای ساختمانهای خانگی یا دفاتر اداری به‌کار گرفته می‌شود. برای ساختمان‌هایی با پرداخت‌کاری حساس این درجات شدت ممکن است کارآیی نداشته باشند. بورلند و همکاران همچنین اشاره دارند که در صورتی که ترک‌های اولیه منجر به خوردگی، نفوذ مایعات مضر و غیره شوند، معیارهای سختگیرانه‌تری باید به‌کار گرفته شوند.

این شش دسته در رده‌بندی حاضر را می‌توان به سه گروهی که در بالا اشاره شد تقسیم‌بندی کرد. رده‌های ۰ تا ۲ معادل خسارت زیبایی است. خسارت کارآیی در رده‌های ۳ و ۴ اتفاق می‌افتد در حالی که پایداری ساختمان توسط خسارت درجه ۵ تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همانطور که در بخش ۳-۲-۲ گفته شد، مرز بین رده ۲ (خسارت ظاهری) و رده ۳ (کارآیی) یک مرز بسیار مهم و اساسی است. بورلَند اشاره می‌کند که خسارتهای درجات ۰ تا ۲ می‌تواند به دلایل متعددی از جمله اثرات حرارتی نیز اتفاق افتد. اما در مقابل خسارت درجه ۳ و بالاتر عمدتاً در اثر حرکات زمین رخ می‌دهد.

جدول ۳-۱. رده‌بندی خسارت ظاهری دیوارها بر مبنای سهولت تعمیرات گچ‌کاری و آجرکاری ساختمان [۲۰]

رده خسارت	درجه شدت معمول	**توصیف خسارت** (بر حسب سهولت تعمیرات) توجه : عرض ترک یک عامل کمکی برای رده‌بندی خسارت است و نمی‌تواند بطور مستقل برای ردهندی مورد استفاده قرار گیرد.
۰	ناچیز	ترک‌های مویی با قطر کمتر از ۰/۱ میلیمتر
۱	بسیار اندک	ترک‌های ریزی که می‌توان به‌راحتی در طی تغییر دکوراسیون ساختمان مرمت شوند. خسارت به‌طور کلی به رنگ و پرداخت دیوارهای داخلی محدود می‌شود. بررسی‌های دقیق ممکن است ترک‌هایی را در دیوارهای خارجی آجرکاری شده آشکار کنند. حداکثر عرض ترک‌ها ۱ میلیمتر است.
۲	اندک	ترک‌ها به‌راحتی پر می‌شوند. دکوراسیون مجدد لازم به‌نظر می‌رسد. ترک‌ها را می‌توان توسط آستر پوشاند. ممکن است ترک‌های بیرونی ساختمان کاملاً واضح باشند و برای جلوگیری از هوازدگی، بندکشی آن‌ها لازم باشد. درها و پنجره‌ها ممکن است کمی گیر کنند. حداکثر عرض ترک‌ها ۵ میلیمتر است.
۳	متوسط	باز کردن ترک‌ها و پر کردن آنها با مصالح و ملات مورد نیاز است. بندکشی آجرکاری‌ها باید انجام شود و ترمیم آجرکاری نیز محتمل است. درها و پنجره‌ها گیر می‌کنند. امکان شکست لوله‌های تأسیسات وجود دارد. تمهیدات جلوگیری از هوازدگی خراب می‌شوند. عرض ترک‌ها ۵ تا ۱۵ میلیمتر است.
۴	شدید	تعمیرات گسترده شامل تعویض آجرهای قسمتی از دیوارها، به‌ویژه بالای درها و پنجره‌ها مورد نیاز است. قابهای درها و پنجره‌ها کج می‌شوند. کف طبقات به‌طور محسوس شیب‌دار می‌شوند. دیوارها کج می‌شوند یا خمش پیدا می‌کنند. بعضی تیرها باربری خود را از دست می‌دهند. لوله‌های تأسیسات قطع می‌شوند. عرض ترک‌ها ۱۵ تا ۲۵ میلیمتر است اما به تعداد ترک‌ها نیز بستگی دارد.
۵	بسیار شدید	این بخش نیاز به تعمیرات عمده شامل بازسازی جزئی یا کلی ساختمان دارد. تیرها باربری خود را از دست می‌دهند و در نتیجه دیوارها بسیار کج شده و نیاز به نگهداری پیدا می‌کنند. پنجره‌ها همراه با خمش می‌شکنند. خطر ناپایداری سازه وجود دارد. عرض ترک‌ها از ۲۵ میلیمتر بیشتر است اما به تعداد ترک‌ها بستگی دارد.

۳-۵. مفهوم کرنش بحرانی

بورلَند و وُرث نشان دادند که در هنگام آغاز ایجاد ترکها، کرنش کششی پارامتری بنیادین است. آنها نتایج یک سری آزمایش‌های بزرگ مقیاس بر روی قاب‌های آجری و دیوارها را بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌داد که آغاز ایجاد ترک‌های مرئی همراه با مقداری مشخص از کرنش کششی متوسط است. نتایج نشان دادند که مقدار کرنش به حالت تغییرشکل بستگی نداشته است. آنها این کرنش را که با اندازه‌گیری از یک طول یک متری یا بیشتر به‌دست می‌آید را کرنش بحرانی ε_{crit} نامیدند.

برای ساختمان‌های آجری آنها این مقدار را $\varepsilon_{crit} = 0.05\% - 0.1\%$ و برای بتون مقادیر کمتری چون $\varepsilon_{crit} = 0.03\% - 0.05\%$ را گزارش کردند. همچنین آنان اشاره دارند که این مقادیر، از کرنش‌های کششی محلی مربوط به شکست کششی بزرگترند.

در ادامه بورلَند نماد ε_{lim} را جایگزین نماد ε_{crit} کرد. این نماد که اشاره به کرنش کششی محدودکننده دارد، به سبب توجه به مصالح متفاوت و حالات مختلف برای حدود کارآیی بناها به‌کار گرفته شده است.

بُسکاردین[1] و کُردینگ[2] با پیوند دادن میزان خسارت ساختمان‌ها که از چند مطاله موردی نشست ناشی از تونل‌سازی به‌دست آمده بود با مقادیر کرنش، چارچوب کاری کرنش کششی محدودکننده را افزایش دادند. آنها در مطالعات خود مقدار کرنش‌های محدودکننده را با رده‌بندی خسارات پیوند دادند که در جدول ۳-۲ آمده است. این رویکرد پیوندی بین تغییرشکل ساختمان و خسارت بالقوه ساختمان ایجاد می‌کند و در نتیجه برای ارزیابی خسارت ساختمان ضروری به‌نظر می‌رسد.

1 . Boscardin
2 . Cording

جدول ۳-۲. رابطه بین رده خسارتی و کرنش کششی محدودکننده [۲۰]

رده خسارت	درجه شدت معمول	کرنش کششی محدودکننده (٪)
۰	ناچیز	۰ - ۰/۰۵
۱	بسیار اندک	۰/۰۵ - ۰/۰۷۵
۲	اندک	۰/۰۷۵ - ۰/۱۵
۳	متوسط	۰/۱۵ - ۰/۳
۴ تا ۵	شدید تا بسیار شدید	>۰/۳

۳-۶. محاسبه کرنش ساختمان

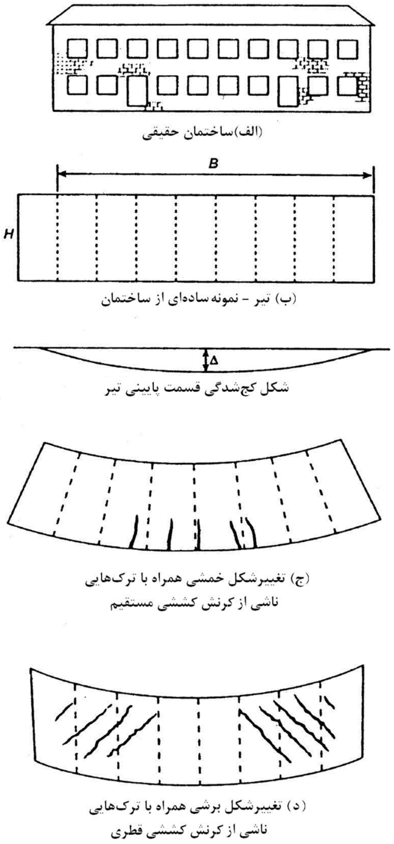
بورلَند و وُرث مفهوم کرنش کششی محدودکننده را برای یک تیر الاستیک به‌کار گرفتند تا رابطه بین تغییرشکل ساختمان و آغاز ایجاد ترک‌ها را مطالعه کنند. با این وجود که مدل کردن یک ساختمان به صورت یک تیر الاستیک آشکارا یک ساده‌سازی بزرگ به حساب می‌آید، اما مشخص شد که پیش‌بینی‌های حاصل از این مدل مطابقت خوبی با داده‌های واقعی به‌دست آمده از چندین ساختمان خسارت دیده و خسارت ندیده دارد. از این گذشته این رویکرد تنها مکانیزم کنترلی آغاز ترک‌ها را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است، تیر الاستیک در این مدل با عرض B و ارتفاع H توصیف می‌شود. شکل دو حالت نهایی تغییرشکل را نشان می‌دهد: در حالت خمش (۳-۴(ج)) ایجاد ترک‌ها در نتیجه کرنش کششی مستقیم است در حالی که در حالت برشی (۳-۴(د)) ترک‌های قطری ظاهر می‌شوند که در نتیجه کرنش‌های کششی قطری است. برای یک تیر تحت بار که تحت تأثیر تغییر شکل برشی و خمشی قرار می‌گیرد، تغییرشکل کلی در مرکز تیر به صورت زیر توسط تیموشِنکو[1] بیان می‌شود:

$$\Delta = \frac{PB^3}{48EI}\left(1+\frac{18EI}{B^2HG}\right) \qquad (۳-۱)$$

[1] . Timoshenko

پارامتر E مدول یانگ و G مدول برشی است. P بار نقطه‌ای است که در مرکز تیر به‌کار گرفته شده است. برای یک ماده ایزوتروپ الاستیک $E/G = 2(1+\nu)$. با فرض $\nu = 0.3$ خواهیم داشت $E/G = 2.6$.



شکل ۳-۴. ایجاد ترک در یک تیر ساده در حالتهای متفاوتی از تغییرشکل [۲۳]

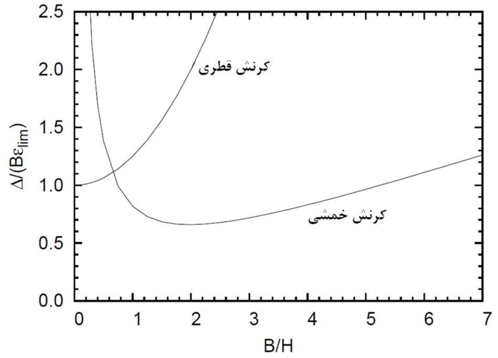
در حالتی که محور خنثی در وسط تیر باشد، بورلَند و وُرث رابطه ۳-۱ را به صورت نرخ تغییر شکل Δ/B ارائه کردند. در صورتی که $\varepsilon_{b,max}$ حداکثر کرنش محوری نهایی باشد، آنگاه :

$$\frac{\Delta}{B} = \left(0.167\frac{B}{H} + 0.65\frac{H}{B}\right)\varepsilon_{b\max} \qquad (۳-۲)$$

و برای حداکثر کرنش قطری $\varepsilon_{d,max}$:

$$\frac{\Delta}{B} = \left(0.25\frac{B^2}{H^2} + 1\right)\varepsilon_{d\max} \qquad (۳-۳)$$

هر دو رابطه در شکل ۳-۵ نشان داده شده‌اند (در حالی که $\varepsilon_{\max} = \varepsilon_{\lim}$). واضح است که در شرایطی که B/H کوچکتر از ۰/۵ باشد، کرنش قطری بحرانی است. اما در صورتی که B/H از این مقدار بیشتر شود، خمش حالت بحرانی‌تر در تغییرشکل خواهد بود.



شکل ۳-۵. رابطه بین $\Delta/B\varepsilon_{crit}$ و B/H برای یک تیر مستطیلی تغییرشکل یافته تحت خمش و برش. تار خنثی در وسط قرار گرفته است [۲۳]

برای معادلاتی که در شکل ۳-۵ نشان داده شدند، فرض بر آن بود که تار خنثی در وسط تیر قرار گرفته است. در شرایط یک ساختمان حقیقی، پی‌ها مقاومت بسیار زیادی را در قبال تغییرشکل دارند. در نتیجه واقع‌بینانه‌تر است که تار خنثی در پایین‌ترین رشته قرار گیرد. با این فرض بورلَند و وُرث روابط ۳-۲ و ۳-۳ را به‌صورت زیر تغییر دادند:

$$\frac{\Delta}{B} = \left(0.083\frac{B}{H} + 1.3\frac{H}{B}\right)\varepsilon_{b\max} \qquad (۳-۴)$$

$$\frac{\Delta}{B} = \left(0.064\frac{B^2}{H^2} + 1\right)\varepsilon_{d\max} \qquad (۳-۵)$$

از آنجایی که تار خنثی در پایین‌ترین سطح قرار گرفته است، رابطه ۳-۴ تنها باید برای حالت تغییرشکلی با تقعر به سمت بالا به‌کار رود. در مورد حالت تقعر رو به پایین کرنش‌های کششی وجود ندارند. روابط ۳-۴ و ۳-۵ در شکل ۳-۶ رسم شده‌اند. مقایسه دو شکل ۳-۵ و ۳-۶ نشان می‌دهد که برای هر مقدار از B/H مقدار $\Delta/B\varepsilon_{\lim}$ در شکل ۳-۶ دو برابر مقدار آن در شکل ۳-۵ است.

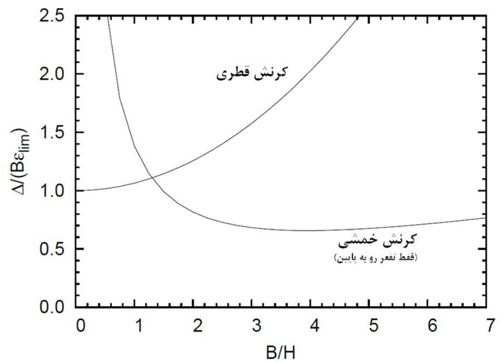
بورلَند و وُرث در مطالعات خود بر روی نشست ناشی از وزن ساختمان نیز متمرکز شدند. در این مورد جابه‌جایی سازه و خاک‌های زیرین آن عمدتاً در جهت عمودی است و در نتیجه توجه بسیار کمی به جابه‌جایی یا کرنش در جهت افقی شده است. در مقابل در قسمت ۲-۷-۱ گفته شد که جابه‌جایی زمین ناشی از تونل‌سازی نه تنها ناحیه‌های بالارونده و پایین‌رونده ایجاد می‌کند بلکه کرنش افقی نیز پدید می‌آورد. گِدِز[1] نشان داد که کرنش افقی می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر ساختمان‌های موجود داشته باشد. بُسکاردین و کُردینگ سعی کردند که کرنش افقی را در قالب چارچوب بالا قرار دهند. آنها با اضافه کردن تأثیر کرنش افقی زمین ε_h به کرنش ساختمان که در نتیجه تغییرشکل آن به‌وجود آمده است، این مهم را انجام دادند. کرنش تار پایینی ε_{br} خواهد بود:

$$\varepsilon_{br} = \varepsilon_{b\max} + \varepsilon_h \qquad (۳-۶)$$

و کرنش کششی قطری را می‌توان با استفاده از دایره موهر به‌دست آورد:

$$\varepsilon_{dr} = \varepsilon_h \frac{1-\nu}{2} + \sqrt{\varepsilon_h^{\,2}\left(\frac{1-\nu}{2}\right)^2 + \varepsilon_{d\max}^{\,2}} \qquad (۳-۷)$$

که ν ضریب پواسون در تیر است.



شکل ۳-۶. رابطه بین $\Delta/B\varepsilon_{crit}$ و B/H برای تیر مستطیلی تغییرشکل یافته تحت خمش وبرش. تار خنثی در کف قرار دارد [۲۳]

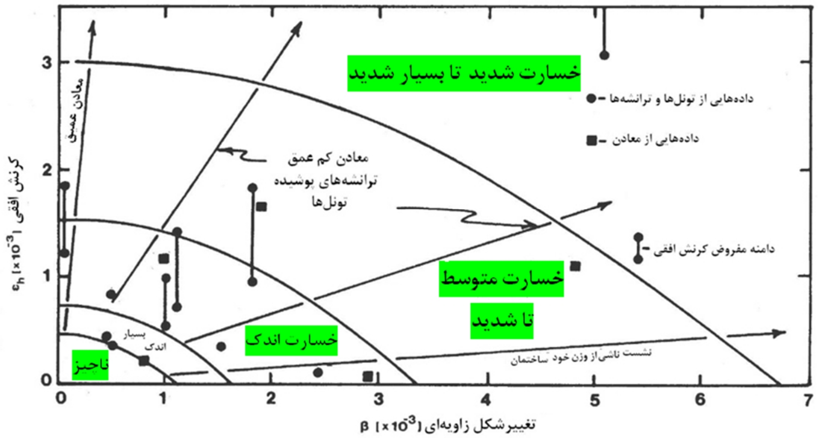
گِدِز با مراجعه به کار بُسکاردین اشاره می‌کند که فرض مقدار کرنش افقی برابر در زمین و ساختمان عموماً درست نیست. کرنش برشی یا لغزش افقی ممکن است در سطح مشترک ساختمان-

---
1. Geddes

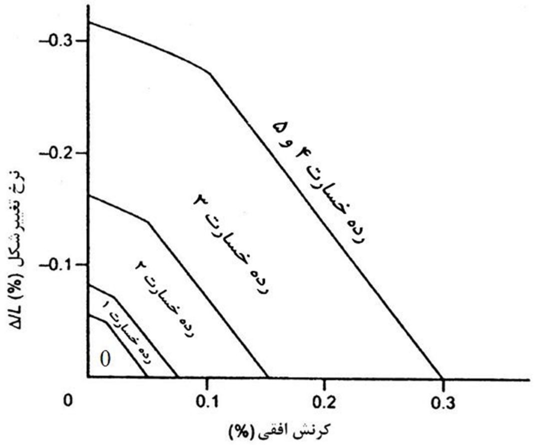
خاک پدید آید که این باعث تفاوتی قابل ملاحظه بین کرنش افقی موجود در خاک با کرنش افقی موجود در ساختمان خواهد شد. در نهایت او نتیجه می‌گیرد که رویکرد قبلی مقدار کرنش افقی در ساختمان را بیش از مقدار حقیقی برآورد می‌کند.

با به‌کارگیری تئوری تیر تیغه بُسکاردین و کُردینگ کرنش محدودکننده را با تغییرشکل زاویه‌ای و کرنش افقی ارتباط دادند که خلاصه آن در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. هر خط کنتور مانند نماینده یک مقدار از کرنش محدودکننده موجود در جدول ۳-۲ است. این شکل همچنین شامل یک سری مطالعات موردی مربوط به ساخت تونل، معادن کم عمق و ترانشه‌های پوشانده شده است. بُسکاردین و کُردینگ نتیجه گرفتند که سطح خسارات گزارش شده در اکثر موارد در محدوده توصیف شده توسط منحنی‌های کرنش محدودکننده قرار می‌گیرد.

بورلَند نیز منحنی‌های مشابهی را برای کرنش افقی و نرخ تغییرشکل ارائه کرد. بواسطه این منحنی‌ها، نمودارهای اندرکنش که نشان‌دهنده رابطه بین DR و ε_h با ازای مقدار مشخصی از B/H است، شکل می‌گیرند. چنین نمودارهایی در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. هر خط کنتور مانند در این نمودار نماینده مقداری از کرنش محدودکننده است. برای $DR = 0$ (نقاط روی محور افقی) مقادیر محدودکننده کرنش افقی همانند مقادیر ε_{lim} ذکر شده در جدول ۳-۲ است.



شکل ۳-۷. رابطه بین خطا با تغییرشکل زاویه‌ای و کرنش افقی [۲۴]



شکل ۳-۸. رابطه بین رده‌بندی خسارت با نرخ تغییرشکل و کرنش افقی برای ناحیه بالارونده ($B/H=1$) [۲۰]

۳-۷ . اندرکنش خاک سازه

به این نکته اشاره کردیم که ارزیابی مقدماتی و مرحله دوم از میان سه مرحله ارزیابی در قسمت ۳-۲، از مقطع نشست حالت بایر به منظور ارزیابی خسارت بالقوه ناشی از تونل‌سازی استفاده می‌کنند. از آنجایی که در این مراحل فرض بر آن است که سازه از مقطع نشست حالت بایر پیروی می‌کند (به شکل آن در می‌آید)، این رویکرد بسیار محافظه‌کارانه ارزیابی می‌شود. در این موارد به منظور کاهش تغییرشکل ساختمان، صلبیت سازه شرایط جابه‌جایی خاک را تغییر می‌دهد. بورلَند چنین استنباط کرد که با تلفیق اندرکنش خاک-سازه با ارزیابی تفصیلی، این مرحله از ارزیابی به کاهش درجه خسارت ممکن نسبت به آنچه در مرحله دوم به‌دست آمده، منتج خواهد شد.

تأثیر اندرکنش خاک-سازه در جریان اندازه‌گیری خسارت ساختمان‌ها در پروژه Jubilee Line Extension نیز مورد تأکید قرار گرفت. مطالعات موردی نشان دادند که صلبیت ساختمان به‌طور قابل توجهی تغییرشکل آن را کاهش می‌دهد. بورلَند و همکاران گزارش دادند که دیوارهای باربر در نواحی بالارونده و پایین‌رونده، انعطاف‌پذیرتر عمل می کنند. *اِستَندینگ*[1] اندازه‌گیری‌هایی از کرنش افقی نزدیک Elizabeth House در لندن ارائه می‌کند. آنها نشان دادند که ایجاد کرنش در حین ساخت

[1] . Standing

Jubilee Line Extension ناچیز است و کرنش‌هایی که ناشی از اثرات حرارتی و گرمایی است از این کرنش‌ها بیشتر هستند. پیش‌بینی تأثیراتی که ساخت یک تونل ممکن است بر سازه‌های اطراف بگذارد با استفاده از روش‌های سنتی بسیار سخت و گاهی غیر ممکن است. در مقابل، آنالیز عددی می‌تواند چنین مسأله‌ای را براحتی حل کند.

۳-۸. جمع‌بندی

- لازمه پیش‌بینی صحیح و دقیق آسیب‌ها و خسارات سازه‌های سطحی که ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی می‌باشد، درک درستی از وضعیت نشست در آن منطقه است.

- در تخمین خسارات سازه‌های سطحی دو پارامتر میزان کرنش کششی و اندرکنش خاک-سازه از اهمیت بالایی برخوردار است.

- از میان روش‌های موجود برای ارزیابی ریسک خسارات سازه‌ها، روش بورلند ارجحیت بیشتری داشته و در صورت وجود تمام پارامترهای ورودی، نتایج بسیار دقیقی ارائه خواهند کرد.

فصل چهارم

مطالعه مقدماتی ریسک خسارت ساختمان‌ها در محدوده ایستگاه‌های فاز ۱

۴-۱. مقدمه

در این فصل در ابتدا به طور خلاصه به معرفی اجمالی خط ۷ مترو تهران پرداخته شده است. سپس به بررسی مقدماتی ریسک خسارات ساختمان‌های سطحی برای ایستگاه‌های فاز ۱ بخش شمالی-جنوبی خط ۷ پرداخته شده است. به این منظور ابتدا به معرفی ایستگاه‌های این خط در محدوده مورد نظر پرداخته و سپس با توجه به دو عامل و معیار بررسی ریسک انجام شده است. معیار نخست روش حفر ایستگاه است. از آنجایی که هدف پایان‌نامه مطالعه ایستگاه‌هایی است که به صورت زیرزمینی احداث می‌شوند، در صورتی که روش حفر و احداث ایستگاه به روش زیرزمینی باشد، ایستگاه مورد نظر در فهرست گزینه‌های مطالعه بیشتر قرار خواهند گرفت. اما در صورتی که روش روباز (کندوپوش) برای آن ایستگاه در نظر گرفته شده باشد، آن ایستگاه به طور کلی از مطالعات ما خارج خواهد شد.

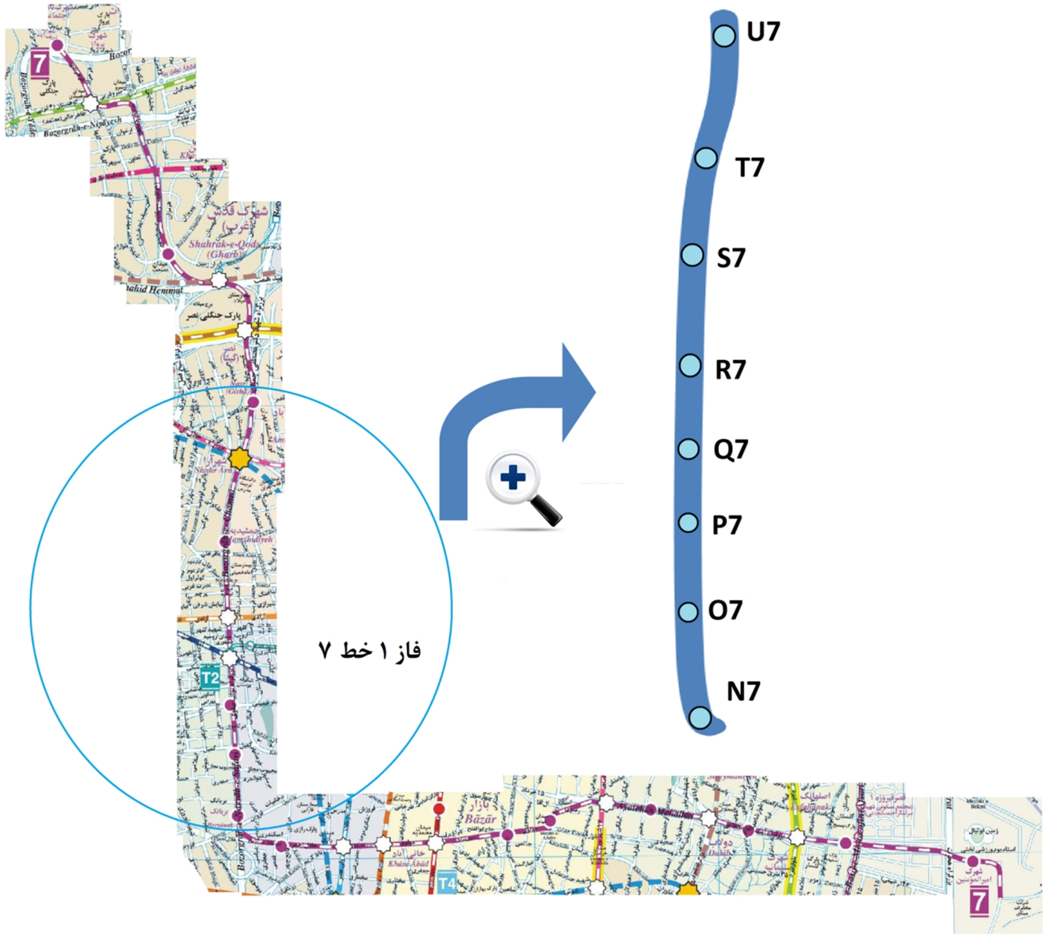
معیار دیگری که از معیار قبلی بسیار مهم‌تر است، وجود یا عدم وجود ساختمان‌ها در روی سطح زمین و در اطراف ایستگاه‌ها و تعداد طبقات این ساختمان‌هاست. به سبب آنکه هدف اصلی این مطالعه بررسی ریسک خسارات ساختمان‌هاست، برای ایستگاه‌هایی که ساختمان‌های قابل توجهی (از لحاظ وجود یا عدم وجود و تعدادطبقات) در بالای آنها وجود ندارد، مطالعات ریسک تفصیلی انجام نخواهد شد و تمرکز بر روی ایستگاه‌هایی خواهد بود که از این حیث وضعیت بحرانی‌تری دارند.

۴-۲. معرفی خط ۷ مترو تهران

یکی از پروژه‌های قطار شهری که در حال حاضر در کشور ما در حال اجرا است، پروژه خط ۷ قطار شهری تهران است. پروژه خط ۷ قطار شهری (مترو) تهران از تقاطع بزرگراه‌های بسیج و شهید محلاتی در جنوب شرق تهران شروع شده و با حرکت به سمت غرب در راستای بزرگراه شهید محلاتی و خیابان مولوی به ایستگاه N7 در تقاطع خیابان هلال‌احمر و بزرگراه شهید نواب صفوی می‌رسد. از این نقطه مسیر حرکت به سمت شمال تغییر یافته و پس از حرکت در راستای بزرگراه‌های شهید نواب

صفوی و شهید دکتر چمران به سمت بلوار شهید پاک‌نژاد در سعادت‌آباد امتداد یافته و در انتها به میدان بوستان ختم می‌شود. طول این خط ۲۶/۹ کیلومتر بوده و دارای ۲۵ ایستگاه می‌باشد[۲۵].

منطقه مورد مطالعه این پروژه در این خط، از ابتدای بخش شمالی-جنوبی که همان ایستگاه N7 است آغاز شده و تا ایستگاه U7 ادامه دارد. در طول این محدوده که ۷ کیلومتر طول دارد، ۸ ایستگاه قرار گرفته است. وضعیت قرارگیری ایستگاه‌ها در این محدوده در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱. موقعیت خط ۷ مترو تهران و ایستگاه‌های فاز ۱

۴-۳. بررسی مقدماتی ریسک خسارات

همانطور که پیش‌تر گفته شد در این بخش با توجه به دو معیار روش احداث ایستگاه (زیرزمینی یا کندوپوش) و همچنین حضور یا عدم حضور ساختمان‌های سطحی و تعداد طبقات این ساختمان‌ها،

۸ ایستگاه فاز ۱ مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این میان ایستگاه‌هایی که به روش زیرزمینی احداث شده و از لحاظ ارتفاع ساختمان‌های سطحی شرایط بحرانی‌تری دارند جهت مطالعات بیشتر در فصل بعدی انتخاب می‌شوند. واضح است که مطالعه ایستگاه‌هایی که میزان ریسک ساختمان‌ها برای آن‌ها در سطح پایینی برآورد شود، در همین مرحله خاتمه می‌یابد.

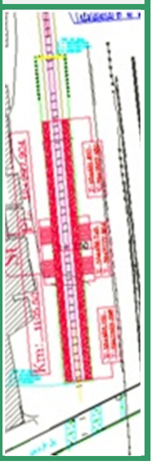
۴-۳-۱. ایستگاه N7

این ایستگاه علاوه بر آنکه اولین ایستگاه فاز ۱ خط ۷ محسوب می‌شود، از آن به منظور شفت مونتاژ و ورودی TBM قطعه شمالی- جنوبی نیز استفاده می‌شود. به این ترتیب که قبل از ساخت ایستگاه از ترانشه آن به منظور شفت مونتاژ و ورود TBM و انجام کلیه خدمات و سرویس‌های مورد نیاز آن استفاده می‌شود. نتیجه آنکه این ایستگاه با روش کندوپوش ساخته و اجرا می‌شود.

محل قرارگیری ایستگاه N7 در مختصات محلی، تقاطع بزرگراه شهید نواب صفوی و خیابان قزوین واقع در کناره غربی بزرگراه است به طوری که ابتدای آن در تقاطع بزرگراه شهید نواب صفوی و خیابان قزوین و انتهای آن در تقاطع بزرگراه شهید نواب صفوی و بریانک قرار دارد (شکل ۴-۲). سایر مشخصات این ایستگاه در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱. مشخصات ایستگاه N7

ایستگاه N7



مختصات محلی: تقاطع بزرگراه شهید نواب صفوی و خیابان قزوین

مختصات ایستگاه			
	x	y	کیلومتر
ابتدا	۵۳۴۴۹۶	۳۹۴۷۶۹۸/۳	۱۲/۲۱۰
مرکز	۵۳۴۴۸۸/۷	۳۹۴۷۷۷۸	۱۲/۲۹۰
انتها	۵۳۴۴۸۱/۷	۳۹۴۷۸۵۷/۷	۱۳/۰۰۰

سایر مشخصات	
طول ایستگاه	۱۹۰
عمق سقف ایستگاه	۴
روش احداث ایستگاه	روباز

ایستگاه N7 از لحاظ موقعیت مکانی در مکانی قرار دارد که در انتهای آن تراکم ساختمان‌ها و برج‌های بلند در کناره بزرگراه به ناگاه زیاد می‌شود. ساختمان‌ها و سازه‌های سطحی مجاور این ایستگاه کم و در بیشتر موارد کم ارتفاع (سه یا چهار طبقه) هستند. تنها ساختمان مورد توجه اطراف این ایستگاه ساختمان دنا ۵ است که در شمال ایستگاه قرار گرفته است. اما در هر صورت این ایستگاه به علت آنکه به صورت کندوپوش احداث می‌شود، مورد توجه ما نیست و مورد مطالعه بیشتر قرار نخواهد گرفت.

شکل ۴-۲. محل احداث ایستگاه N7

۴-۳-۲. ایستگاه O7

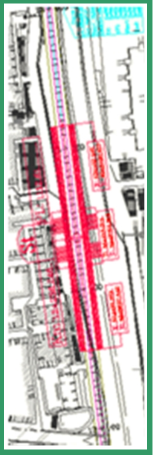
محل قرارگیری ایستگاه O7 که دومین ایستگاه فاز ۱ خط ۷ است، از لحاظ مختصات محلی پایین‌تر از تقاطع بزرگراه شهید نواب صفوی و خیابان کمیل است. به طوری که ابتدای ایستگاه کمی بالاتر از تقاطع خیابان محبوب مجاز با بزرگراه و انتهای آن کمی پایین‌تر از تقاطع خیابان کمیل است. مشخصات این ایستگاه در جدول ۴-۲ آمده است.

ایستگاه O7 از لحاظ مکانی درناحیه‌ای از بزرگراه قرار گرفته است که تعدادی از مرتفع‌ترین ساختمان‌ها و برج‌های بزرگراه درکنار آن واقع شده‌اند. تعداد طبقات این ساختمان‌ها ۱۳، ۱۴ و در یک مورد نیز به ۱۵ طبقه می‌رسد (شکل ۴-۳). ایستگاه بیشتر در کناره غربی بزرگراه واقع شده است تا جایی که گاه فاصله جانبی ساختمان‌های غرب بزرگراه تا دیواره ایستگاه به کمتر از ۶ متر می‌رسد.

این موضوع اهمیت و حساسیت ساختمان‌های غربی را در این محدوده بیشتر می‌کند. با توجه به این موضوع پیش‌بینی می‌شود که خسارات احتمالی وارده به این ساختمان‌ها محسوس‌تر از سایر موارد باشد. لذا این ایستگاه یکی از مواردی است که شایسته مطالعات بیشتر بوده و در ادامه به تحلیل دقیق‌تر وضعیت آن خواهیم پرداخت.

جدول ۴-۲. مشخصات ایستگاه O7

ایستگاه O7



مختصات محلی: تقاطع بزرگراه شهید نواب صفوی و خیابان کمیل

مختصات ایستگاه			
	x	y	کیلومتر
ابتدا	۵۳۴۴۲۳	۳۹۴۸۶۲۷/۵	۱۳/۱۷۶
مرکز	۵۳۴۴۱۳	۳۹۴۸۷۰۷	۱۳/۲۳۴
انتها	۵۳۴۴۰۳	۳۹۴۸۷۸۶/۳	۱۳/۲۴۴

سایر مشخصات	
طول ایستگاه	۱۹۰
عمق سقف ایستگاه	۱۳
روش احداث ایستگاه	زیرزمینی

شکل ۴-۳. محل احداث ایستگاه O7

۴-۳-۳. ایستگاه P7

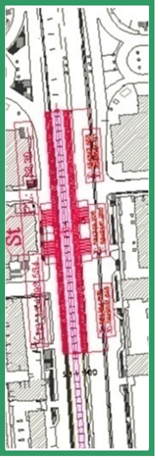
این ایستگاه سومین ایستگاه فاز ۱ خط ۷ محسوب می‌شود. از لحاظ موقعیت مکانی، ایستگاه پایین‌تر از تقاطع بزرگراه نواب صفوی و خیابان امام خمینی قرار گرفته است. بدین صورت که ایستگاه در فاصله ۱۵۰ متر بالاتر از تقاطع خیابان مرتضوی با بزرگراه شهید نواب صفوی شروع شده و قبل از

رسیدن به تقاطع بزرگراه با خیابان امام خمینی خاتمه می‌یابد (شکل ۴-۴). مشخصات ایستگاه P7 در جدول ۴-۳ به طور خلاصه آمده است.

جدول ۴-۳. مشخصات ایستگاه P7

ایستگاه P7

مختصات محلی: تقاطع بزرگراه شهید نواب صفوی و خیابان امام خمینی(ره)



مختصات ایستگاه			
	x	y	کیلومتر
ابتدا	۵۳۴۳۵۴/۷	۳۹۴۹۳۸۱/۵	۱۳/۸۸۱
مرکز	۵۳۴۳۴۸/۸	۳۹۴۹۴۶۱/۳	۱۳/۹۹۱
انتها	۵۳۴۳۴۲/۹	۳۹۴۹۵۴۱/۱	۱۴/۰۷۱

سایر مشخصات	
طول ایستگاه	۱۹۰
عمق سقف ایستگاه	۱۳
روش احداث ایستگاه	زیرزمینی

قرارگیری ایستگاه در زیر بزرگراه و همچنین لزوم ایجاد ترانشه‌ای به عمق ۳۳ متر در صورت بکارگیری روش کندوپوش، عملاً استفاده از این روش در احداث ایستگاه را ناممکن کرده و نتیجه آنکه ایستگاه به روش زیرزمینی حفر و احداث می‌شود. عرض داخلی این ایستگاه ۱۴ متر و طول آن نیز بدون احتساب قطعه رکتی‌فایر ۱۶۰ متر و با احتساب آن ۱۹۰ متر خواهد بود. یکی از تفاوت‌های این ایستگاه با ایستگاه O7 در آن است که قطعه رکتی‌فایر این ایستگاه در پایین‌دست آن قرار دارد. در حالی که در مورد ایستگاه O7 این قطعه از ایستگاه در بالادست قرار داشت.

شکل ۴-۴. محل احداث ایستگاه P7

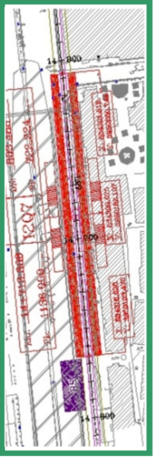
سازه‌های سطحی و ساختمان‌های اطراف این ایستگاه نیز نسبتاً بلند و مرتفع هستند. در این بخش از بزرگراه نواب نیز می‌توان ساختمان‌هایی با تعداد طبقات ۱۳، ۱۴ و یا ۱۵ طبقه یافت. با توجه به واقع شدن ایستگاه در مرکز بزرگراه، ساختمان‌های هر دو طرف بزرگراه دارای اهمیت هستند. به‌خصوص ساختمان ۱۵ طبقه‌ای که مربوط به شرکت آب و فاضلاب منطقه ۵ تهران است و در تقاطع خیابان امام خمینی (ره) واقع شده، دارای اهمیت اساسی است و لازم است کنترل بیشتری روی آن صورت گیرد. این موارد به این نتیجه منتهی می‌شود که این ایستگاه نیز به عنوان یکی از گزینه‌های مطالعات بیشتر و دقیق‌تر قرار گیرد.

۴-۳-۴. ایستگاه Q7

این ایستگاه هفدهمین ایستگاه خط ۷ و چهارمین ایستگاه فاز ۱ محسوب می‌شود. محل قرارگیری این ایستگاه در تقاطع خیابان دامپزشکی با بزرگراه شهید نواب صفوی است. به این صورت که ایستگاه از فاصله ۱۱۰ متری بالاتر از تقاطع خیابان شکوفه آغاز شده و دقیقاً در تقاطع خیابان دامپزشکی با بزرگراه پایان می‌یابد. مشخصات این ایستگاه در جدول ۴-۴ آمده است.

جدول ۴-۴. مشخصات ایستگاهQ7

ایستگاه Q7	مختصات محلی: تقاطع بزرگراه شهید نواب صفوی و خیابان دامپزشکی



مختصات ایستگاه			
	x	y	کیلومتر
ابتدا	۵۳۴۳۱۶/۶	۳۹۵۰۱۰۳/۵	۱۴/۶۰۳
مرکز	۵۳۴۳۰۹	۳۹۵۰۱۸۹/۱	۱۴/۷۱۳
انتها	۵۳۴۳۰۱/۵	۳۹۵۰۲۶۰/۷	۱۴/۷۹۳

سایر مشخصات	
طول ایستگاه	۱۹۰
عمق سقف ایستگاه	۲۹
روش احداث ایستگاه	زیرزمینی

در میان سایر ایستگاه‌های خط ۷، این ایستگاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دلیل این موضوع در چندین عامل است. نخست آنکه این ایستگاه یک ایستگاه دوگانه محسوب شده و محل تلاقی دو

خط مترو ۷ و ۲ می‌باشد. به همین سبب در بیشتر موارد این ایستگاه با نام I2Q7 یعنی ایستگاه I از خط ۲ و ایستگاه Q از خط ۷ شناخته می‌شود. البته این دو ایستگاه دقیقاً در یک نقطه و درست در زیر یکدیگر قرار نگرفته‌اند بلکه ایستگاه I2 در فاصله ۷۵ متر بالاتر از ایستگاه Q7 واقع شده و نسبت به امتداد خط ۷ زاویه ۶۰ درجه می‌سازد. دلیل دوم اهمیت این ایستگاه، مجاورت آن با ورودی تونل زیرگذر توحید است (شکل ۴-۵). این مجاورت به این صورت است که در ۸۴ متر ابتدایی، ایستگاه به موازات ورودی تونل توحید و در بقیه طول آن، ایستگاه به موازات خود آن قرار گرفته است. هر چند که هر دو این دلایل باعث پیچیده شدن عملیات حفر و احداث این ایستگاه خواهد شد، اما نمی‌توان اینچنین نتیجه گرفت که این دلایل باعث تشدید نشست در سطح زمین و یا خسارات ساختمان‌های سطحی گردد. به خصوص نمی‌توان انتظار داشت که ایستگاه I2 به واسطه فاصله ۷۵ متری از این ایستگاه تأثیر زیادی در پدیده نشست حاصل از این ایستگاه داشته باشد. از سویی دیگر ساختمان‌های اطراف این ایستگاه در مقایسه با ایستگاه‌های قبلی ارتفاع کمتری داشته و بیشتر دارای طبقات ۵، ۸ و در یک مورد ۱۰ طبقه هستند. نتیجه آن‌که میزان ریسک پیش‌بینی شده برای این ایستگاه در مقایسه با دو ایستگاه قبل کمتر می‌باشد. با این وجود این ایستگاه را نیز در ادامه مورد تحلیل دقیق‌تر قرار خواهیم داد.

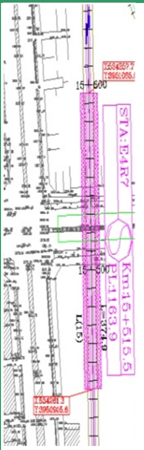
شکل ۴-۵. محل احداث ایستگاه Q7

۴-۳-۵. ایستگاه E4R7

این ایستگاه هجدهمین ایستگاه خط ۷ و پنجمین ایستگاه فاز ۱ بخش شمالی-جنوبی آن محسوب می شود. ایستگاه مورد نظر در محل تقاطع بزرگراه شهید نواب صفوی با خیابان آزادی واقع شده است (شکل۴-۶). مشخصات این ایستگاه در جدول ۴-۵ ذکر شده است.

جدول ۴-۵. مشخصات ایستگاه E4R7

ایستگاه E4R7



مختصات محلی: تقاطع بزرگراه شهید نواب صفوی و خیابان آزادی

مختصات ایستگاه			
	x	y	کیلومتر
ابتدا	۵۳۴۲۶۱/۳	۳۹۵۰۹۰۵/۶	۱۵/۴۵۵
مرکز	۵۳۴۲۵۰	۳۹۵۰۹۸۳/۲	۱۵/۵۱۵
انتها	۵۳۴۲۵۷/۷	۳۹۵۱۰۶۵/۵	۱۵/۶۲۵

سایر مشخصات	
طول ایستگاه	۱۹۰
عمق سقف ایستگاه	۲۸
روش احداث ایستگاه	زیرزمینی

این ایستگاه نیز همچنان که از نام آن بر می‌آید، یک ایستگاه مشترک بین دو خط ۴ و ۷ است. خط ۴ مترو تهران در این محل به صورت شرقی-غربی و عمود بر خط ۷ قرار گرفته است. نکته دیگری که در مورد این ایستگاه مهم است آن است که این ایستگاه نیز همانند ایستگاه قبل در مجاورت و به بیانی دیگر، در زیر تونل توحید قرار گرفته است. با این وجود ساختمان‌های سطحی در محل این ایستگاه بسیارکم بوده به طوری که در قسمت جنوبی ایستگاه هیچ ساختمانی روی سطح زمین وجود ندارد و در قسمت شمالی نیز ساختمان‌هایی با حداکثر تعداد طبقات ۳ تا ۴ طبقه قرار دارند. از این سو، ساختمان‌های واقع شده در محل این ایستگاه حالت بحرانی نداشته و از حساسیت بسیارکمتری برخوردارند. لذا این ایستگاه مورد مطالعه بیشتر قرار نمی‌گیرد.

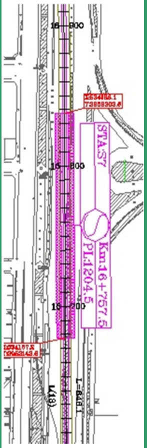
شکل ۴-۶. محل احداث ایستگاه E4R7

۴-۳-۶. ایستگاه S7

این ایستگاه که نوزدهمین ایستگاه خط ۷ می باشد، در منطقه جمشیدیه و در محل تقاطع خیابان دکتر فاطمی با بزرگراه شهید چمران واقع شده است. بخشی از مشخصات این ایستگاه در جدول ۴-۶ آمده است.

جدول ۴-۶. مشخصات ایستگاه S7

ایستگاه S7	مختصات محلی: تقاطع بزرگراه شهید چمران و خیابان دکتر فاطمی



مختصات ایستگاه			
	x	y	کیلومتر
ابتدا	۵۳۴۱۸۷/۲	۳۹۵۲۱۴۳/۶	۱۶/۶۷۷
مرکز	۵۳۴۱۸۶/۶	۳۹۵۲۲۲۳/۶	۱۶/۷۵۷
انتها	۵۳۴۱۸۶/۱	۳۹۵۲۳۰۳/۶	۱۵/۸۳۷

سایر مشخصات	
طول ایستگاه	۱۹۰
عمق سقف ایستگاه	۲۸
روش احداث ایستگاه	زیرزمینی

محل قرارگیری این ایستگاه به گونه‌ای است که در مجاورت با ورودی تونل زیرگذر توحید از سمت شمال قرار گرفته است (شکل ۴-۷). از نظر ساختمان‌های سطحی، این ایستگاه موقعیت حساسی ندارد، به گونه‌ای که در سمت راست آن (شرق) مناطق اداری و نظامی قرار گرفته است که

اکثراً بدون ساختمان قابل ذکری است. در سمت چپ (غرب) ایستگاه نیز ساختمان‌های محدودی با تعداد طبقات ۳ تا ۵ طبقه قرار گرفته‌اند. این دلایل سبب شده‌اند که این ایستگاه نیز از نظر خسارت وارده به ساختمان‌های سطحی بحرانی تشخیص داده نشود و مورد مطالعه بیشتر قرار نگیرد.

شکل ۴-۷. محل احداث ایستگاه S7

۴-۳-۷. ایستگاه R6T7

این ایستگاه بیستمین ایستگاه خط ۷ و هفتمین ایستگاه فاز ۱ آن محسوب می‌شود. ایستگاه موردنظر در تقاطع دو بزرگراه شهید چمران و جلال آل احمد قرار گرفته است.

جدول ۴-۷. مشخصات ایستگاه R6T7

ایستگاه R6T7

مختصات محلی: تقاطع دو بزرگراه شهید چمران و جلال آل احمد

مختصات ایستگاه			
	x	y	کیلومتر
ابتدا	۵۳۴۴۶۶/۶	۳۹۵۳۵۹۴/۵	۱۸/۱۵۳
مرکز	۵۳۴۵۰۳/۷	۳۹۵۳۶۶۵/۴	۱۸/۲۶۳
انتها	۵۳۴۵۴۰/۸	۳۹۵۳۷۳۶/۲	۱۵/۳۴۳

سایر مشخصات	
طول ایستگاه	۱۹۰
عمق سقف ایستگاه	۲۰
روش احداث ایستگاه	زیرزمینی

این ایستگاه محل تقاطع دو خط مترو ۷ و ۶ تهران است و به واقع یک ایستگاه مشترک محسوب می‌شود. البته ایستگاه R6 که در بالای T7 و عمود بر آن طراحی شده است، هنوز احداث نشده و در هنگام توسعه خط ۶ احداث خواهد شد. از این حیث این موضوع تأثیری بر روی این ایستگاه ندارد. از طرفی موقعیت مکانی این ایستگاه نیز به نحوی است که تا فواصل تأثیرگذار، هیچ ساختمان و یا برج بلندی وجود ندارد که از ساخت و حفر ایستگاه تأثیر پذیرد. بیشتر فضای اطراف این ایستگاه را خیابان‌ها و فضای سبز در بر گرفته‌اند (شکل۴-۸). از این نظر به دلیل عدم حضور هیچ ساختمان قابل توجهی در بالای این ایستگاه، مطالعه ریسک خسارات وارده به ساختمان‌ها برای این ایستگاه در همین جا خاتمه خواهد یافت.

شکل ۴-۸. محل احداث ایستگاه T7

۴-۳-۸. ایستگاه U7

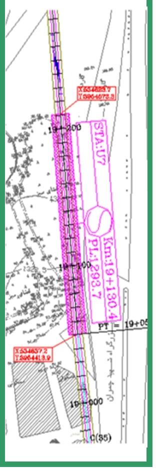
آخرین ایستگاه فاز ۱ و بیست و یکمین ایستگاه خط ۷، ایستگاه U7 می‌باشد. برخلاف ایستگاه‌های قبلی که در اکثر موارد در زیر بزرگراه‌های مسیر احداث می‌شدند، این ایستگاه در حاشیه غربی بزرگراه چمران و کمی پایین‌تر از پارک گفتگو در یک محوطه باز متعلق به شهرداری تهران احداث خواهد شد.

این ایستگاه که در کیلومتر ۱۹/۱۳۰ خط ۷ قرار گرفته است، از جهتی دیگر نیز با سایر ایستگاه‌ها متفاوت است و آن اینکه این ایستگاه به منظور پشتیبانی و خدمات‌رسانی به TBM نیز مورد استفاده

قرار خواهد گرفت و به همین منظور بایستی ایستگاه به صورت روباز (کندوپوش) حفر شود. به همین جهت بر خلاف ایستگاه‌های قبل که بعد از حفر تونل در محل موردنظر، ایستگاه به دنبال آن احداث می‌شود، این ایستگاه قبل از رسیدن تونل به محل آن باید حفر و آماده سرویس‌دهی شود. در نتیجه مطالعه ریسک آسیب‌پذیری ساختمان‌های سطحی برای این ایستگاه منتفی خواهد بود.

جدول ۴-۸. مشخصات ایستگاه U7

ایستگاه U7



مختصات محلی: حاشیه غربی بزرگراه چمران و پایین‌تر از پارک گفتگو

مختصات ایستگاه			
	x	y	کیلومتر
ابتدا	۵۳۴۶۳۷/۲	۳۹۵۴۴۱۳/۹	۱۹/۰۵۰
مرکز	۵۳۴۶۳۰/۵	۳۹۵۴۴۹۳/۶	۱۹/۱۳۰
انتها	۵۳۴۶۲۳/۷	۳۹۵۴۵۷۳/۳	۱۹/۲۱۰

سایر مشخصات	
طول ایستگاه	۱۹۰
عمق سقف ایستگاه	۱۳
روش احداث ایستگاه	روباز

در نهایت می‌توان نتایج مطالعات این فصل را به طور خلاصه در شکل ۴-۹ نشان داد.

	وضعیت ساختمان‌های اطراف	روش احداث ایستگاه	لزوم مطالعات تکمیلی
ایستگاه N7	عادی	روباز	غیر ضروری
ایستگاه O7	بحرانی	زیرزمینی	ضروری
ایستگاه P7	بحرانی	زیرزمینی	ضروری
ایستگاه Q7	نسبتاً بحرانی	زیرزمینی	نسبتاً ضروری
ایستگاه R7	عادی	زیرزمینی	غیر ضروری
ایستگاه S7	عادی	زیرزمینی	غیر ضروری
ایستگاه T7	عادی	زیرزمینی	غیر ضروری
ایستگاه U7	عادی	روباز	غیر ضروری

شکل ۴-۹. خلاصه نتایج فصل ۴

۴-۴. جمع‌بندی

با توجه به دو معیار روش احداث ایستگاه و تعداد طبقات ساختمان‌های سطحی ، ۳ ایستگاه O7، P7 و Q7 به عنوان ایستگاه‌هایی که بیشترین ریسک خسارت ساختمان‌های سطحی برای آن‌ها وجود دارند انتخاب شدند. این ایستگاه‌ها در فصل آینده مورد تحلیل قرار خواهند گرفت.

فصل پنجم

تخمین و رده‌بندی خسارات ساختمان‌ها در محل ایستگاه‌های

O7 ، P7 و Q7

۵-۱. مقدمه

در این فصل به تخمین و رده‌بندی خسارات ساختمان‌ها در محل ایستگاه‌های O7 ، P7 و Q7 خواهیم پرداخت. همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد، برای تخمین خسارات سازه‌های سطحی در یک محدوده، ابتدا باید درک درستی از نشست در آن منطقه داشت. لذا در این فصل سعی بر آن است که ابتدا مقادیر نشست ناشی از احداث ایستگاه‌ها در سطح زمین را بدست آوریم. به این منظور از نرم‌افزار FLAC3D بهره گرفته شده است. به این ترتیب با مدل‌سازی ایستگاه و محیط اطراف آن در نرم‌افزار FLAC3D مقادیر نشست در سطح زمین بدست می‌آید. سپس با استفاده از این مقادیر نشست و از طریق رویکرد توصیف شده در فصل سوم میزان خسارت احتمالی وارده به ساختمان‌های روی سطح زمین برآورد خواهد شد.

۵-۲. ارزیابی ریسک خسارات

در فصل بررسی مقدماتی ریسک اشاره شد که که در میان ایستگاه‌های فاز ۱ خط ۷ مترو تهران، سه ایستگاه O7، P7 و Q7 ایستگاه‌هایی هستند که ساختمان‌های اطراف آن‌ها بیش‌ترین ریسک خسارات را دارا می‌باشند. این موضوع به دو دلیل بود، نخست آن‌که روش حفر این سه ایستگاه به صورت زیرزمینی است و دوم آنکه تعداد طبقات و تراکم ساختمان‌ها در محل این سه ایستگاه بیش‌تر و بحرانی‌تر است. در اینجا میزان ریسک و رده‌بندی خسارات ساختمان‌ها در محل این سه ایستگاه با جزئیات بیشتری بررسی و مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

به منظور بررسی ریسک خسارات برای این سه ایستگاه باید از رویکردها و روش‌های استاندارد موجود در این زمینه استفاده کرد. پرکاربردترین واستانداردترین رویکرد موجود در بررسی میزان ریسک خسارات سازه‌های سطحی ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی، رویکردی است که در فصل سوم و در مبحث ۳-۳ به آن اشاره شده است. در این مطالعه نیز از همین رویکرد برای ارزیابی ریسک خسارات ساختمان‌ها استفاده می‌شود. در این روش سه مرحله ارزیابی مقدماتی، ارزیابی مرحله دوم و

ارزیابی تفصیلی قابل تفکیک است. این رویکرد سه مرحله‌ای پارامترهایی از نشست ساختمان در حالت بایر مانند حداکثر نشست، حداکثر شیب نشست، کرنش‌های افقی و ... را گرفته و طی یک فرآیند الگوریتم‌وار، رده‌بندی خسارت ساختمان را مشخص می‌کند. نتیجه این ارزیابی، همانطور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، به دو گونه می‌تواند باشد. در صورتی که رده خسارتی تعیین شده ۱ یا ۲ باشد، میزان خسارت ناچیز و اندک پیش‌بینی می‌شود، اما در صورتی که رده خسارتی معین شده بیشتر باشد، باید راهکارهای کنترلی و تدابیر احتیاطی برای کم کردن خسارات پیش‌بینی شوند.

میزان نشست و پارامترهای مختلف آن یکی از ورودی‌های فرآیند ارزیابی ریسک به شمار می‌آید. در نتیجه نخستین گام برای ارزیابی ریسک خسارات ساختمان‌ها آن است که میزان نشست و سایر پارامترهای مربوط به نشست برای آن ساختمان برآورد و محاسبه شود. برآورد میزان نشست در اثر حفر فضاهای زیرزمینی نیز روش‌های مختلفی دارد که در فصل دوم به تفصیل در مورد آن بحث شد. گفتیم که انواع این روش‌ها در سه دسته تجربی، تحلیلی و عددی طبقه‌بندی می‌شوند.

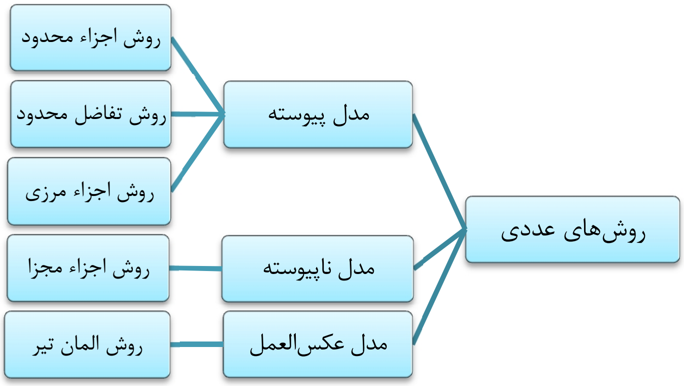
روش‌های تحلیلی موجود برای برآورد میزان نشست، عموماً برای محیط‌هایی از جنس رس و ماسه و مصالح ریزدانه ارائه شده‌اند و از طرفی دیگر همه این روش‌ها برای مقاطع حفاری دایروی (تونل‌هایی با مقطع دایره) کارایی دارند. پارامترهای استفاده شده در این روش‌ها نیز معمولاً مربوط به حفاری مکانیزه تمام مقطع (TBMها) می‌باشند. اما در این مطالعه ایستگاه‌هایی را داریم که با مقاطعی کاملاً متفاوت از دایره و در محیط‌هایی آبرفتی و شنی احداث می‌شوند. روش حفاری این ایستگاه‌ها نیز مکانیزه نیست. مجموعه این دلایل به این نتیجه منجر خواهد شد که برای تحلیل نشست در این مطالعه نمی‌توان از روش‌های تحلیلی موجود بهره برد و باید به سراغ روش‌های عددی رفته و از آنها استفاده کرد.

۵-۳. انتخاب روش عددی مناسب

امروزه یکی از روش‌های تحلیل و طراحی سازه‌های زیرزمینی استفاده از روش‌های عددی می‌باشد. به طوری که این شاخه تحلیلی از علم مکانیک (روش‌های عددی)، عامل پیشرفت قابل توجهی در ژئومکانیک بوده است. تقریباً تمام روش‌هایی که در تحلیل‌های عددی وجود دارد مانند روش اجزاء محدود، تفاضل محدود، اجزاء مرزی، اجزاء مجزا و روش‌های ترکیبی به طور چشم‌گیری در پروژه‌های عظیم و صنعتی، در سنگ یا خاک استفاده می‌شوند. با پیدایش رایانه‌های سریع، روش‌های عددی در ژئومکانیک وارد مرحله تازه‌ای شده‌اند به طوری که امروزه متناسب با روش‌های متعدد عددی نرم‌افزار مرتبط با آن نیز وجود دارد [۲۶].

۵-۳-۱. روش‌های مدل‌سازی

به طور کلی روش‌های عددی در مدل‌سازی را به دو دسته روش‌های مرزی و روش‌های ناحیه‌ای می‌توان تقسیم نمود. روش‌های مرزی به آن دسته از روش‌ها اطلاق می‌شود که در آن فقط مرز حفاری به اجزاء کوچک تقسیم شده و درون سنگ یا خاک از لحاظ ریاضی یک محیط پیوسته نامحدود در نظر گرفته می‌شود. روش‌های ناحیه‌ای به آن دسته از روش‌ها گفته می‌شود که درون محیط به اجزاء کوچک هندسی تقسیم شده و فرض می‌شود که هر کدام دارای خواصی می‌باشند. از روش‌های مرزی می‌توان به روش اجزاء مرزی و از روش‌های ناحیه‌ای می‌توان به روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود و روش اجزاء مجزا اشاره نمود. این دو دسته‌بندی تحلیلی می‌توانند به صورت شکل‌های ترکیبی ادغام شود تا مزایای هر دو روش را به حداکثر رسانده و معایب آن‌ها را به حداقل کاهش دهند. قبل از انتخاب روش مدل‌سازی مناسب برای حل مسائل مختلف بایستی مؤلفه‌های اصلی هر روش به خوبی درک شود [۲۷]. روش‌های عددی را می‌توان به طریق دیگری نیز طبقه‌بندی کرد که در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱. روش‌های عددی در ژئومکانیک

الف – روش اجزاء مرزی

اصطلاح اجزاء مرزی از آن جا نشأت گرفته است که فقط مرز مقطع مورد نظر به اجزایی تقسیم شده، به عبارت دیگر فقط سطوح حفاری آزاد برای حفاری‌های اجرا شده در اعماق کم، سطوح درزه‌های موجود و سطوح تماس لایه‌های مواد مختلف برای وقتی که محیط از مواد مختلف تشکیل شده به اجزاء کوچک تقسیم می‌شوند.

ب – روش اجزاء محدود

برای روش اجزاء مرزی مشاهده شد که شرایط روی یک سطح می‌تواند به موقعیت تمام نقاط در سرتاسر باقیمانده محیط حتی تا بی‌نهایت مربوط باشد. به عنوان مقایسه روش اجزاء محدود شرایط چند نقطه درون محیط (نقاط گره‌دار) را به موقعیت درون ناحیه‌ای بسته‌ای که توسط این نقاط تشکیل شده (المان) مرتبط سازد.

روش اجزاء محدود برای حل مواردی که با موادی با خواص ناهمگن و غیرخطی سر و کار داریم مناسب است چرا که هر المان رفتار موادی را که شامل می‌شود، مدل می‌کند. با این وجود روش اجزاء محدود برای مدل کردن مرزهای نامحدود مانند مسائلی که در حفاری‌های زیرزمینی اتفاق می‌افتد مناسب نیست، یکی از روش‌های قابل استفاده برای مرزهای نامحدود مجزا نمودن زون تاثیر حفاری و به‌کارگیری شرایط مرزی مناسب در گوشه‌هاست [۲۶].

ج - روش تفاضل محدود

روش تفاضل (تفاوت) محدود در بسیاری از مسائل مهندسی کاربرد دارد. این روش برای مدل نمودن تغییرمکان‌ها و کرنش‌های بزرگ ابزار مناسبی است. به همین جهت کاربرد آن در مسائل مهندسی مکانیک سنگ و تونل‌سازی عمومیت دارد. در این روش اصولاً محیط را پیوسته در نظر می‌گیرند. ولی باید توجه نمود که با تمهیداتی می‌توان ناپیوستگی را نیز در آن وارد نمود. در این روش مسئله اصلی وضعیت تنش وتغییرمکان در بلوک‌های قابل تغییرشکل است که از طریق یک سطح قابل تغییرشکل با یکدیگر بر هم‌کنش دارند [۲۸].

این روش مدل‌سازی عددی شبیه روش اجزاء محدود است. تنها تفاوتی که در این روش با روش اجزاء محدود وجود دارد در حل مسائل به صورت صریح می‌باشد، بدین معنی که در بازه زمانی بسیار کوتاهی، آشفتگی‌ای که بر یک نقطه از مش‌بندی وارد می‌شود، توسط زون‌های مجاور بلافصل آن تحمل می‌گردد [۲۸].

د - روش اجزاء مجزا

این روش برای مدل‌سازی منطقه بلوکی که در آن درزه‌ها، گوه‌هایی از سنگ را به وجود می‌آورند، به طوری که بتوان آن را به عنوان پیکره صلب در نظر گرفت، استفاده می‌شود. بنابراین این قطعات مستقل می‌توانند آزادانه بچرخند و یا تغییر مکان دهند لذا تغییرشکلی که در تماس‌های بلوکی رخ می‌دهد بیش‌تر از تغییرشکل سنگ بکر است. این گوه‌ها می‌توانند به صورت صلب در نظر گرفته شوند در این حالت بهتر است که درزه‌ها به صورت مجزا مدل شوند. رفتار این سیستم‌ها به قدری غیرخطی است که حتی قوانین روش اجزاء محدود درزه‌دار نمی‌توانند جواب قابل قبولی برای تحلیل‌های آن بدهد [۲۷].

۵-۳-۲. انتخاب مناسب‌ترین روش عددی

هر یک از روش‌های عددی ذکر شده دارای معایب و محاسنی است که بایستی برای هر مورد خاص و برای هدف مطالعاتی موجود بهترین روش ارائه گردد. می‌توان گفت که در بسیاری از مدل‌ها،

اهمیت شناخت محیط‌های پیوسته و ناپیوسته تأثیر بسیار زیادی در فرآیند شبیه‌سازی مسأله خواهد گذاشت، پس لازم است که از فاکتورهایی برای شناسایی انواع محیط‌ها استفاده شود. اگر محیط خاکی باشد و یا آن‌که در محیط سنگی، توده‌سنگ کم‌درزه و دارای حفاری‌های نسبتاً بزرگی باشد، در چنین حالاتی می‌توان مدل را پیوسته فرض نمود و بنابراین روش تفاضل محدود و روش اجزاء محدود مفید واقع خواهد شد. در صورتی که در محیط سنگی میانگین فاصله‌داری درزه‌ها مرتبه‌ای از ابعاد حفاری باشد، در چنین حالتی تغییرشکل‌پذیری، درون بلوک خواهد بود. در نتیجه تئوری ناپیوستگی بسیار مناسب خواهد بود و استفاده از روش المان مجزا توصیه می‌گردد [۲۹].

با توجه به این‌که محیط مورد مطالعه در این تحقیق، خاکی هموژن است، برای مدل کردن آن باید از مدل‌سازی محیط‌های پیوسته بهره گرفته و به سراغ یکی از دو روش اجزاء محدود و یا تفاضل محدود رفت. از آن‌جایی که در این تحقیق سعی بر آن است جابجایی‌های سطح زمین مورد بررسی قرار گیرند و از طرفی همانطور که گفته شد روش تفاضل محدود روشی مناسب برای مدل کردن جابجایی‌ها است، به نظر می‌رسد که روش تفاضل محدود مناسب‌ترین روش برای این مطالعه است.

۵-۳-۳. انتخاب نرم‌افزار مناسب

همانطور که پیش‌تر اشاره شد از میان روش‌های عددی ذکر شده، با توجه به محیطی که ایستگاه در آن حفر گردیده است (محیط پیوسته) و همچنین اهداف مطالعه حاضر بهترین روش، روش تفاضل محدود می‌باشد. بنابراین باید نرم‌افزاری که قادر به مدل‌سازی شرایط پیوسته باشد و نیز ویژگی وارد نمودن پارامترهای خاک را داشته باشد یافته شود. نرم‌افزارهای بسیاری در ژئومکانیک متناسب با هر روش مدل‌سازی عددی به وجود آمده است. از میان نرم‌افزارهای عددی که بر پایه روش تفاضل محدود به حل مسأله می‌پردازند، نرم‌افزار FLAC3D که نسخه سه بعدی FLAC از مجموعه نرم‌افزارهای گروه ITASCA می‌باشد، انتخاب گردید.

FLAC3D یک برنامه کامپیوتری به روش اجزاء تفاضلی صریح می‌باشد که اولین بار توسط پیتر کندال[1] با هدف تحلیل‌های مهندسی به وجود آمد. این برنامه علاوه بر محاسبات مربوط به مهندسی مکانیک سنگ و ژئوتکنیک، کاربرد بسیار گسترده‌ای در سایر علوم مکانیک در فرآیند مدل‌سازی رفتارهای پیچیده و برگشت‌ناپذیر دارد. این نرم‌افزار قادر به مدل‌سازی رفتارهای مرتبط به خاک و سنگ و دیگر موادی که در حالت جریان پلاستیک قرار می‌گیرند، می‌باشد. همچنین توانایی مدل کردن رفتارهای خطی و غیرخطی را براساس قانون تنش و کرنش دارد [۳۰].

FLAC3D با استفاده توامان از محاسبات لاگرانژی صریح و زون‌بندی تفاضلی مدل، این اطمینان را به کاربر می‌دهد که جریان پلاستیک و گسیختگی مربوط به این حالت صحیح مدل شده است.

۵-۴. تحلیل ایستگاه O7

همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، موقعیت قرارگیری ایستگاه O7 به گونه‌ای است که بیش‌تر در کناره غربی بزرگراه نواب قرار گرفته است، به طوری که فاصله جانبی دیواره ایستگاه و ساختمان‌های غربی بزرگراه اغلب کمتر از ۱۰ متر و گاهاً کمتر از ۶ متر است. این فاصله در مورد ساختمان‌های شرقی بزرگراه به بیش از ۴۰ متر می‌رسد. لذا در محدوده ایستگاه، مطالعات بر روی ساختمان‌های غربی متمرکز می‌شود. در کناره غربی ایستگاه ۶ ساختمان مرتفع قابل تشخیص است که از شماره ۱ تا ۶ نام‌گذاری می‌شوند (شکل۵-۲). تعداد طبقات این ساختمان‌ها به ترتیب ۱۱، ۱۱، ۱۴، ۵، ۱۴ و ۱۴ طبقه است. برای مطالعه پارامترهای مربوط به نشست، ۲ نقطه مرجع برای هر ساختمان در نظر گرفته می‌شود. به این صورت که نقاط مرجع ۱ و ۲ مربوط به ساختمان شماره ۱ و به همین ترتیب نقاط مرجع ۱۱ و ۱۲ مربوط به ساختمان شماره ۶ است. اطلاعات مربوط به نشست برای این نقاط توسط تاریخچه‌ها[2] در نرم‌افزار FLAC3D کنترل می‌شود.

[1]. Peter Cundall
[2] .History

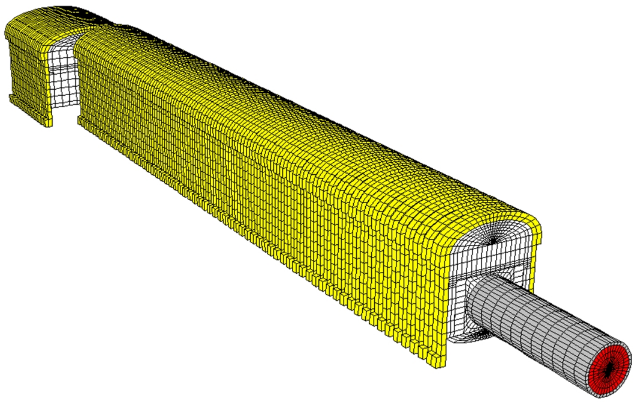
شکل ۵-۲. موقعیت ساختمان‌ها نسبت به ایستگاه O7

۵-۴-۱. هندسه مدل

بدون شک اولین گام برای تحلیل مسئله به روش عددی، ایجاد هندسه مدل است. هندسه مدل را می‌توان به چند بخش تقسیم کرد. هندسه نگهداری ایستگاه (اولیه و ثانویه)، تونل، نگهداری تونل، ایستگاه و خاک‌های دربرگیرنده این بخش‌ها را تشکیل می‌دهند. مدلی که برای ایستگاه O7 ایجاد شده است، ۲۵۰ متر طول دارد که ۱۹۰ متر از این طول مربوط به ایستگاه است. بدین ترتیب مدل از۳۰ متری قبل از ایستگاه شروع شده و تا ۳۰ متری بعد از ایستگاه ادامه می‌یابد. با توجه به عرض حدود ۲۰ متری ایستگاه و نگهداری‌های آن، عرض مدل ۱۰۰متر (۵ برابر عرض ایستگاه) انتخاب شده است. که ایستگاه در مرکز این عرض ۱۰۰ متری قرار دارد. ارتفاع مدل ۴۷ متر است که با توجه به قرارگیری مبدأ مختصات در عمق ۱۷ متری مدل، ارتفاع نواحی در مدل بین ۳۰- تا ۱۷ متر تغییر می‌کند.

همانطور که در شکل ۵-۳ دیده می‌شود، ایستگاه O7 مانند تمام ایستگاه‌های دیگر این مسیر از دو قطعه تشکیل شده است. قطعه اول که قطعه اصلی ایستگاه است، ۱۶۰ متر طول دارد و سکوها و

دسترسی عموم مردم به مترو از طریق این قطعه است. قطعه دوم با طول ۳۰ متری خود، به قطعه رکتی‌فایر موسوم است و به منظور کاربری‌های پشتیبانی و اطفاء حریق استفاده می‌شود. این دو قطعه هندسه‌ای کاملاً متفاوت دارند. در زیر هر جزء از هندسه مدل به تفصیل بررسی شده است.



شکل ۵-۳. هندسه ایستگاه در مدل ایجاد شده

هندسه نگهداری ایستگاه

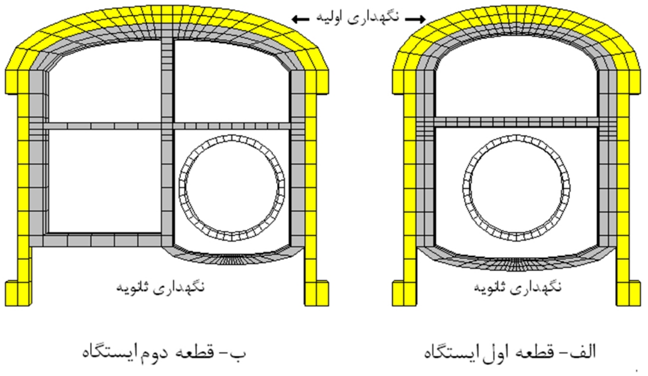
نگهداری ایستگاه O7 به دو بخش مجزای نگهداری اولیه و نگهداری ثانویه تقسیم می‌شود. هر دو جزء این نگهداری از جنس بتن مسلح است. منظور از نگهداری اولیه به هیچ وجه آن نوع نگهداری نیست که اغلب به منظور کاربرد کوتاه‌مدت و با استحکام و مقاومت کم احداث شود بلکه مقصود از واژه اولیه، آن است که این نگهداری ابتدا احداث می‌شود و بعد از آن نگهداری ثانویه احداث می‌شود.

نگهداری اولیه را می‌توان به دو جزء شمع‌ها و ریب‌ها تقسیم کرد. این نگهداری قبل از حفر و کندن خاک درون ایستگاه احداث می‌شود. ضخامت بتن در قسمت ریب‌ها (قسمت گنبدی شکل) ۱/۵ متر و در شمع‌ها (پایه‌ها) ۱ متر است. نگهداری اولیه به طور کامل ایستگاه را در برنمی‌گیرد بلکه به صورت قطعات ۱/۲۵ متری و به فواصل ۱/۲۵ متری از همدیگر در راستای ایستگاه احداث می‌شوند، نتیجه آن‌که در بین دو قطعه مجاور از نگهداری اولیه در راستای طولی ۱/۲۵ فضا وجود دارد که دست‌نخورده باقی مانده و از جنس خاک خواهد بود.

در طی یک فرآیند مرحله به مرحله، حین احداث نگهداری اولیه، خاک زیر آن نیز حفر شده و محیط برای احداث نگهداری ثانویه آماده می‌شود. نگهداری ثانویه نیز بعد از حفر محیط داخلی ایستگاه احداث می‌شود. کل فرآیند احداث نگهداری اولیه، حفاری و احداث نگهداری ثانویه را می‌توان در یک سیکل ۲۴ مرحله‌ای نشان داد.

نگهداری ثانویه ایستگاه که نگهداری اصلی آن نیز محسوب می‌شود بعد از احداث نگهداری اولیه و در زیر آن احداث می‌شود. در قطعه اول ایستگاه که از طول ۰ تا ۱۶۰ متری قرار گرفته است، نگهداری اصلی ایستگاه به شکل نعل اسبی است. البته کف این نگهداری نیز مانند سقف آن حالت گنبدی شکل دارد. ضخامت بتن در دیواره‌های این قسمت ۱/۵ متر است. ضخامت بتن در سقف متغیر است، به طوری که از مقدار ۰/۸ متر در سقف شروع می‌شود و با افزایش تدریجی تا رسیدن به کناره‌ها، ضخامت ۱/۵ را به خود می‌گیرد. در مورد کف این نگهداری هم حالت سقف برقرار است. علاوه بر اجزاء ذکر شده، نگهداری اصلی در این قطعه جزء دیگری نیز دارد و آن تیری افقی است که با ضخامت ۰/۸ متر بین دو دیواره ایستگاه قرار گرفته است (شکل ۵-۴ الف).

همانطور که در شکل ۵-۴ نشان داده شده است، هندسه نگهداری اصلی در قطعه دوم به کلی متفاوت است. عرض داخلی ایستگاه در این قسمت ۲۱ متر است، در حالی که در قطعه قبل ۱۴ متر بود. در این قطعه دو قطعه تیر افقی و عمودی فضای داخلی ایستگاه را به چهار قسمت تقسیم می‌کنند. برخلاف قطعه قبلی، نگهداری ثانویه در این قطعه نسبت به صفحه x=0 متقارن نیست، دلیل نخست این امر آن است که کف ایستگاه در قسمت سمت راست به صورت منحنی و در قسمت سمت چپ به صورت صاف است. دلیل دیگر آن است که صفحه x=0 در این قطعه در مرکز دو قطعه سمت راست قرار گرفته است. ضخامت بتن در دیواره‌ها و سقف ۱/۲ متر ، در تیر افقی۰/۵ متر و در تیر عمودی ۱ متر است. ضخامت بتن در کف سمت چپ۱ متر و در کف سمت راست بین ۰/۸ تا ۱/۲ متر متغیر است(شکل ۵-۴ ب). نگهداری ثانویه در مدل ایجاد شده تحت گروه Support شناخته می‌شود.



شکل ۵-۴. هندسه قطعه اول و دوم ایستگاه

هندسه تونل

برای ایجاد هندسه تونل در مدل، از یک شکل استوانه‌ای با شعاع ۴ متر استفاده شده است. مرکز این تونل که در طول ۲۵۰ متر از مدل (در جهت y) گسترش دارد، در مختصات z=-10 و x=0 قرار گرفته است. این بخش از مدل با نام گروه Tunnel شناخته می‌شود. محل قرارگیری تونل در وسط ایستگاه است.

هندسه نگهداری تونل

نگهداری تونل در حقیقت به شکل یک پوسته استوانه‌ای شکل است که به دور تونل ایجاد می‌شود. روند تحلیل در این مدل به این صورت است که در یک مرحله، آن بخشی از تونل و نگهداری آن که در داخل ایستگاه قرار می‌گیرند، از مدل حذف می‌شوند. لذا در هنگام ایجاد هندسه نگهداری تونل، بخشی از آن با نام گروه Tunnelsupport و بخشی با نام گروه Rings ایجاد می‌شوند. گروه Tunnelsupport آن بخش از نگهداری است که در داخل ایستگاه‌ها قرار می‌گیرند و گروه Rings آن بخش از نگهداری تونل است که خارج محیط ایستگاه ایجاد می‌شود.

هندسه خاک‌های دربرگیرنده

همان‌طور که گفته شد ایستگاه O7 در یک محیط خاکی احداث می‌شود. علاوه بر هندسه‌های ذکر شده قبلی باید هندسه خاک‌های دربرگیرنده آن‌ها نیز تعریف شود. این هندسه در حقیقت به عنوان پوشاننده و کامل‌کننده هندسه‌های قبلی به حساب می‌آید. هندسه خاک به شکلی احداث و

ایجاد می‌شود که از مرز نگهداری‌های ایستگاه شروع می‌شود و در جهت x تا مختصات ۵۰- و ۵۰+ ادامه می‌یابد. در جهت y نیز این هندسه از عرض ۳۰- تا ۲۲۰+ گسترش دارد. آن‌چه هندسه خاک را در جهتz متفاوت می‌سازد، وجود لایه خاک روباره در عمق ۰ تا ۳ متری سطح زمین است. به همین سبب هندسه خاک در راستای z به صورت دو لایه کاملاً مجزا از تراز ۳۰- تا ۱۴ و از ۱۴ تا ۱۷ متری ایجاد می‌گردد. در ایجاد هندسه خاک سعی شده است که تا حد ممکن نواحی با ابعاد یکسان ۲×۲×۲ احداث شوند. هندسه خاک روباره با نام گروه Soil1 و مابقی هندسه خاک با نام گروه Soil در مدل شناخته می‌شوند.

هندسه ایستگاه

منظور از هندسه ایستگاه آن بخش از هندسه مدل است که در داخل هندسه نگهداری ایستگاه قرار می‌گیرد. این بخش در ابتدا از جنس خاک بوده و در مرحله‌ای از تحلیل مدل حفر شده و در نهایت یک فضای خالی از آن باقی خواهد ماند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، قسمتی از فضای داخلی هندسه نگهداری ایستگاه توسط هندسه تونل و نگهداری آن اشغال می‌شود. مابقی این فضا نیز هندسه‌سازی شده و با نام هندسه ایستگاه شناخته می‌شود. این هندسه با نام گروه Station در مدل ایجاد شده است.

۵-۴-۲. خصوصیات مصالح

پس از آن که هندسه مدل ایجاد گردید، نوبت به معرفی مدل رفتاری و تخصیص خصوصیات مواد و مصالح می‌رسد. در مراحل مختلف این مدل‌سازی ۴ نمونه مصالح مجزا به هندسه‌های این مدل نسبت داده شده است. ۲ نمونه خاک و ۲ نمونه بتن از جمله این ۴ نمونه هستند. منظور از ۲ نمونه خاک، خاک روباره در عمق ۰ تا ۳ متری سطح زمین و خاک اصلی و منظور از ۲ نمونه بتن، بتن‌هایی است که در پوشش بتنی تونل و پوشش بتنی ایستگاه استفاده می‌شود.

قبل از تخصیص خصوصیات مصالح، ابتدا بایستی مدل رفتاری آن‌ها مشخص شود. در نرم‌افزار FLAC3D ۱۱ مدل از پیش طراحی شده وجود دارد. این ۱۱ مدل را می‌توان به صورت ۱ مدل تهی، ۳ مدل الاستیک و ۷ مدل پلاستیک تقسیم‌بندی نمود. برای ۲ نمونه مصالح خاکی بایستی از مدل‌های الاستوپلاستیک بهره گرفت. در میان مدل‌های موجود برای مصالحی که رفتار پلاستیک دارند، مدل مور-کولمب برای دو تیپ خاک موجود انتخاب شده است. این مدل پرکاربردترین و مهم‌ترین مدل برای مصالحی که رفتار پلاستیک دارند به شمار می‌رود.

برای تخصیص مدل رفتاری به ۲ نمونه بتن موجود نیز باید از مدل‌های الاستیک بهره جست. در این‌جا مدل الاستیک ایزوتروپ برای ۲ نمونه بتن انتخاب شده است.

پس از انتخاب مدل رفتاری مناسب برای مواد، در گام بعدی باید خصوصیات این مواد را مشخص کنیم. خصوصیات مورد استفاده در FLAC3D شامل خصوصیات تغییرشکل‌پذیری و خصوصیات مقاومتی مصالح می‌شود. انتخاب خصوصیات مصالح گاهی اوقات چالشی‌ترین بخش در فرآیند مدل‌سازی می‌باشد. این بیش‌تر به علت عدم قطعیتی است که در پایگاه داده‌ای در ژئومکانیک وجود دارد[۲۴].

برای تخصیص خصوصیات مصالح باید به این نکته توجه شود که پارامترهای مورد نیاز برای توصیف خصوصیات یک ماده در FLAC3D بستگی به نوع مدل رفتاری انتخاب شده برای آن ماده دارد. برای توصیف مصالحی که از مدل رفتاری مور-کلمب پیروی می‌کنند باید پارامترهای مدول تغییرشکل حجمی (K) و برشی (G)، چسبندگی (c)، زاویه اصطکاک داخلی (φ)، زاویه اتساع (ψ) و مقاومت کششی (σ_t) تعریف شوند.

پارامترهای لازم برای تخصیص مواد در حالت رفتار الاستیک ایزوتروپ، مدول حجمی (K) و مدول برشی (G) می‌باشد. البته توجه شود که به جای استفاده از این دو مدول، می‌توان از مدول یانگ (E) و ضریب پواسون (ν) استفاده کرد. ولی بهتر است که از مدول برشی و مدول حجمی استفاده شود[۲۴].

معادلات تبدیل (E,ν) به (K,G) عبارتند از :

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \qquad (۵-۱)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad (۵-۲)$$

با توجه به اطلاعات و گزارش‌های بدست آمده از شرکت مهندسی سپاسد به ویژه گزارش ژئوتکنیک ایستگاه O7 می‌توان خصوصیات و مدل رفتاری مصالح توصیف شده در این مدل‌سازی را در قالب جدول ۵-۱ خلاصه نمود.

جدول ۵-۱. خصوصیات مصالح در مدل‌سازی ایستگاه O7 [۳۱]

مصالح	مدل رفتاری	مدول یانگ E (GPa)	ضریب پواسون ν	چسبندگی C (MPa)	اصطکاک داخلی φ	مقاومت کششی σ_t (MPa)	چگالی (gr/cm^3)
خاک روباره	مور-کلمب	۰/۰۱۰	۰/۳	۰/۰۱۰	۲۰	۰/۰۱۵۴	۱/۸
خاک اصلی	مور-کلمب	۰/۰۷۵	۰/۲۸	۰/۰۳۰	۳۳	۰/۰۴۶	۱/۹
بتن۱ *	الاستیک	۳۴/۵۲۵	۰/۲	-	-	-	۲/۵
بتن۲ **	الاستیک	۲۰	۰/۲	-	-	-	۲/۵

* بتن مورد استفاده در لاینینگ تونل

** بتن مورد استفاده در نگهداری ایستگاه

۵-۴-۳. شرایط مرزی

شرایط مکانیکی که می‌تواند در مرزها به‌کار رود، به دو نوع اصلی تقسیم می‌شود: تعیین جابجایی یا تعیین تنش[۲۴]. در این مدل‌سازی از مرزهای جابجایی استفاده شده است. به این صورت که با استفاده از دستور Fix صفحه z=-30 در راستای z، صفحات x=50 و x=-50 در راستای x و صفحات y=-30 و y=220 در راستای y ثابت شده‌اند. این مرزها مرز مصنوعی مدل محسوب شده و تنها مرز طبیعی مدل که یک مرز آزاد است، در صفحه z=17 قرار دارد. در حقیقت این نوع مرزهای مصنوعی معادل مرزهای غلطکی محسوب می‌شوند.

۵-۴-۴. تنش‌های برجا

در نرم‌افزار FLAC3D بایستی قبل از اجرای مدل میزان تنش‌ها در هر زون مشخص شود. راحت‌ترین راه نیل به این هدف تعریف میزان تنش در جهات اصلی مدل برای هر زون است. بدین ترتیب که توسط فرمان initial در سه جهت x، y و z مقادیر S_{xx}، S_{yy} و S_{zz} تعریف می‌شود.

در این‌جا تنش S_{zz} همان تنش هیدرواستاتیک است و براساس رابطه معروف ρgh معین می‌گردد. به این منظور با توجه به موقعیت مبدا مختصات در مدل، یک مقدار اولیه برای S_{zz} تعریف می‌شود و سپس مقدار S_{zz} در ترازهای بالاتر و پایین‌تر توسط گرادیانی برحسب z معین می‌گردد. مقدار این گرادیان یقیناً برابر ρg و علامت آن بنا به موقعیت نقطه z=0 در مدل تعیین می‌شود. این مقداردهی باید در نهایت به صورتی باشد که مقدار S_{zz} در سطح زمین صفر و در عمق H متری از سطح زمین ρgh- باشد. آن‌چه می‌تواند باعث عدم قطعیت در مقدار S_{zz} شود، مقدار ρ یا همان چگالی است. این مقدار به طور مستقیم از نتایج آزمایشگاهی حاصل می‌شود و تغییرات آن در گستره محدودی خلاصه می‌شود. نتیجه آن‌که میزان عدم قطعیت S_{zz} تعیین شده در مدل بسیار کم است.

جهت تعیین مقادیر تنش در دو راستای x وy باید نسبت تنش‌های افقی به قائم (K) مشخص باشد. در صورتی که آزمایشات برجا برای تعیین تنش‌های برجا انجام شده باشد، تعیین میزان تنش‌ها در دو راستای x وy بسیار راحت‌تر خواهد بود. در غیر این صورت باید به رابطه‌هایی مراجعه شود که مقدار k را به طور غیر مستقیم و از طریق سایر داده‌های آزمایشگاهی تعیین می‌کنند. مهم‌ترین روابط تعیین مقدار k به این صورت هستند.

$$K = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (۵-۳)$$

$$K = 1 - \sin\varphi \quad (۵-۴)$$

رابطه ۵-۳ بیشتر در محیط‌های سنگی کارایی دارد، در حالی که رابطه ۵-۴ که به رابطه جکی نیز معروف است، رابطه‌ای تجربی است که ضریب فشار جانبی را برای خاک‌های دانه‌ای در حال سکون

تولید می‌کند. از آن‌جایی که محیط کاری ما نیز خاک هموژن و پیوسته است، رابطه دوم برای آن مناسب‌تر می‌باشد و لذا از این رابطه جهت تعیین میزان K استفاده می‌شود. حال با در دست داشتن مقدارK، می‌توان همان‌طور که برای S_{zz} گفته شد مقادیر S_{xx} وS_{yy} را نیز تعیین کرد. در انتها این تخصیص تنش باید طوری انجام شده باشد که تنش‌های افقی در هر نقطه در عمقH از سطح زمین برابر kρgh- باشد.

۵-۴-۵. تاریخچه‌ها

یکی از امکانات نرم‌افزار FLAC3D تاریخچه است. این قابلیت می‌تواند اطلاعات کافی در رابطه با تنش‌ها، کرنش‌ها، جابجایی، سرعت و غیره را در نقاطی که کاربر معین می‌کند به عنوان یک رکورد ثبت کند. در این مطالعه، تاریخچه‌ها این امکان را مهیّا نموده‌اند که جابجایی را در نقاط دلخواه ثبت کرده و از آن‌ها برای محاسبه نشست بهره گرفت. علاوه بر نقاط مرجع که جابجایی آن‌ها به عنوان تاریخچه ثبت می‌شود، گروهی دیگر از نقاط نیز در سطح زمین به عنوان تاریخچه انتخاب شده‌اند تا بتوان با اطلاعات جابجایی آن‌ها تصویری کامل‌تر از جابجایی سطح زمین ارائه داد. علاوه بر این‌ها نیز تاریخچه‌های دیگری به منظور کنترل عملکرد شبیه‌سازی در مراحل مختلف، به کار گرفته شده‌اند.

۵-۴-۶. تحلیل مدل

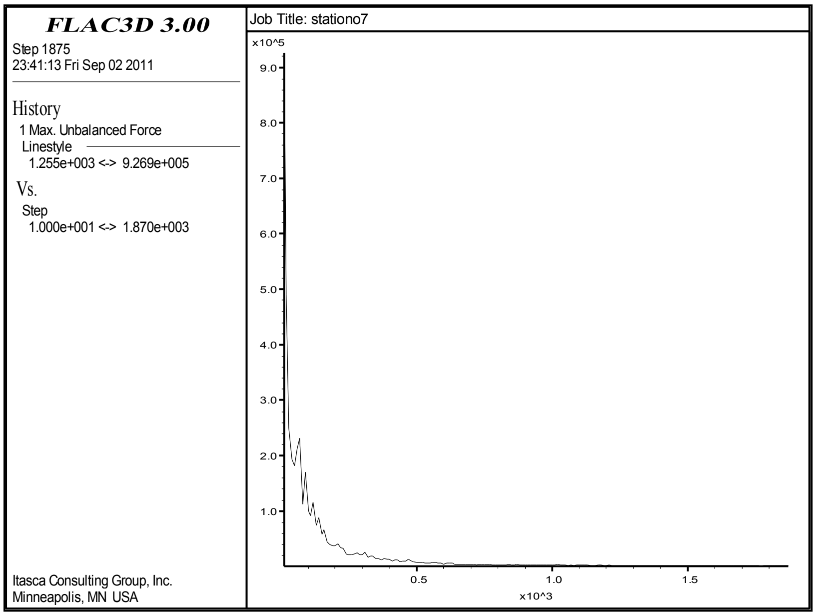
می‌توان کلیه مراحل حل مدل تا بدست آوردن مقادیر جابجایی در نقاط موردنظر را در سه فاز مجزا تقسیم‌بندی کرد :

فاز ۱ : تعادل

در این مرحله از تحلیل پیش از انجام هرگونه حفاری در مدل، مدل حل می‌شود. این کار برای تطبیق شرایط برجا با شرایط مدل‌سازی و بر اساس پیشنهاد ITASCA صورت می‌گیرد. این مرحله در مدل‌سازی عددی در ژئومکانیک اهمیت بسیاری دارد، چرا که به مدل این اجازه داده می‌شود تا

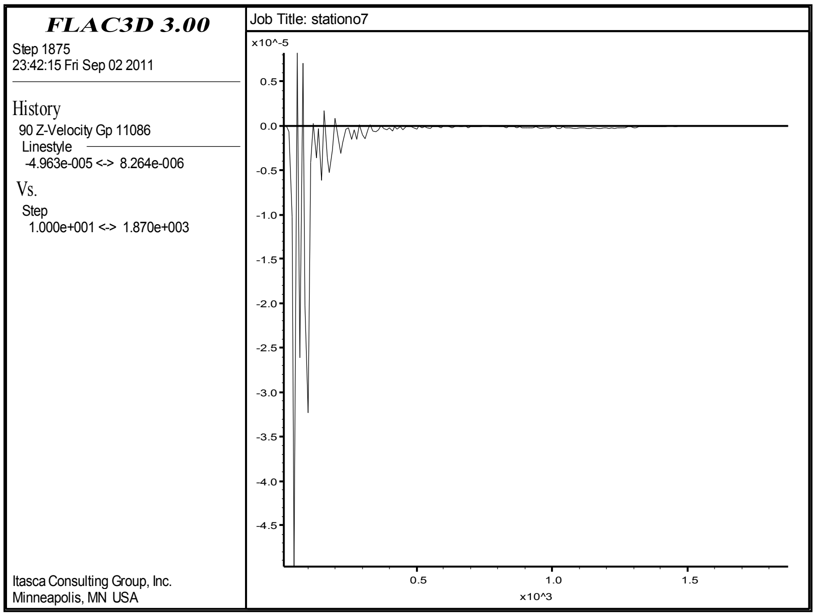
نیروهای نامتعادلی[1] که به مدل وارد می‌گردد را حذف نماید. سوالی که اینجا مطرح است آن است که آیا مدل‌سازی به طور صحیح صورت گرفته است؟ لذا برای اطمینان از صحت مدل‌سازی، از فاکتورهایی که توسط ITASCA پیشنهاد شده است بهره گرفته می‌شود. ثابت شدن جابجایی‌ها پس از حل و مینیمم شدن نیروهای نامتعادل به ۰.۱ درصد مقدار اولیه و یکنواخت شدن کنتورهای تنش‌های برجا در صورتی که تنش‌های برجا را نیز داشته باشیم، از عوامل اصلی برای اثبات حل صحیح مساله هستند.

برای بررسی تعادل مدل، سه نمودار نسبت نیروهای نامتعادل (شکل۵-۵)، سرعت (شکل ۵-۶) و جابجایی (شکل ۵-۷) ارائه شده است. البته از آن‌جایی که از دستور Solve برای حل مدل استفاده شده است، تعادل مدل در پایان فاز اول کاملاً بدیهی و محرز است.

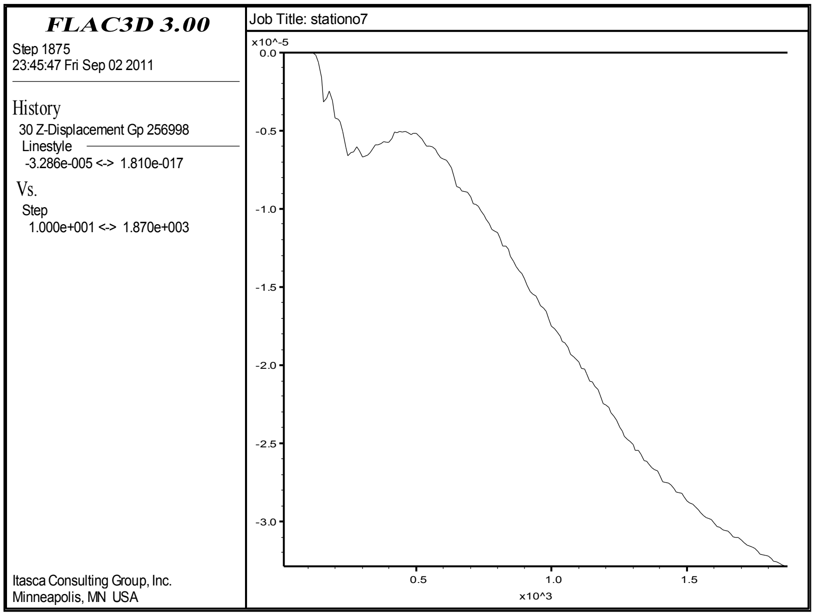


شکل ۵-۵. نمودار حداکثر نیروی نامتعادل

[1] . Unbalanced Force



شکل ۵-۶. نمودار سرعت نقطه گرهی ۱۱۰۸۶



شکل ۵-۷. نمودار جابجایی نقطه گرهی ۲۵۶۹۹۸

فاز ۲: حفر تونل

یکی از چالش‌هایی که این مطالعه با آن مواجه شد، در دسترس نبودن اطلاعات و داده‌های مناسب برای اعتبارسنجی مدل‌سازی، در پایان کار است. همان‌طور که گفته شد، هدف این مدل‌سازی، برآورد میزان جابجایی‌ها در سطح زمین ناشی از حفر ایستگاه‌ها است. به منظور

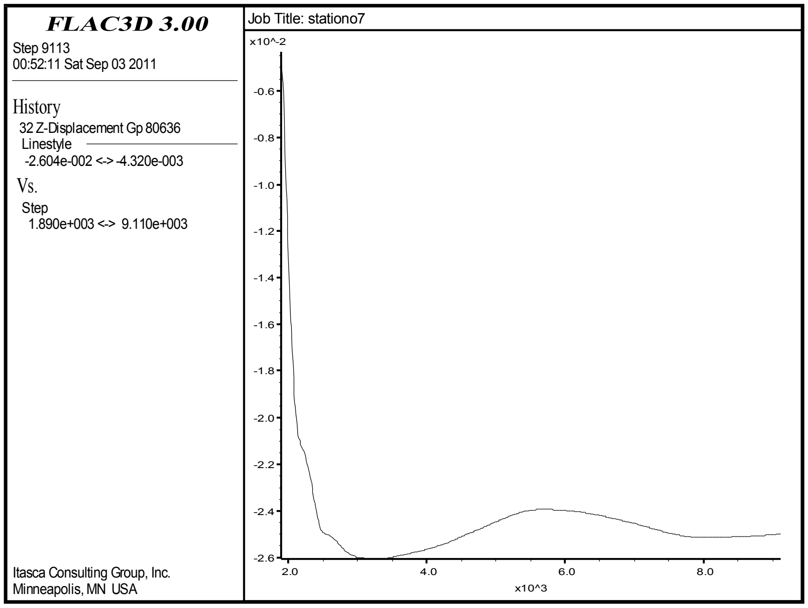
اعتبارسنجی نتایج این مدل‌سازی باید مقادیر واقعی نشست و جابجایی بعد از حفر ایستگاه‌ها در دسترس باشد. اما با توجه به این‌که تا زمان انجام این مطالعه، ایستگاه‌های مورد نظر این پروژه حفر و احداث نشده‌اند، لذا داده‌های واقعی نشست و جابجایی در سطح زمین موجود نبوده و اعتبارسنجی امکان‌پذیر نیست.

به منظور غلبه بر این مشکل راه حل دیگری اندیشیده شده است. با توجه به این‌که تونل خط ۷ مترو در فاز ۱ قبل از ایستگاه‌های آن حفر می‌شود، در حال حاضر در محدوده دو ایستگاه O7 و P7، تونل مترو حفر شده است. در مقاطعی از این تونل، بعد از حفر و احداث تونل، داده‌های نشست ناشی از آن اندازه‌گیری و ثبت شده است. با در دست داشتن این داده‌ها می‌توان مدل را در همین مرحله، یعنی مرحله حفر تونل اعتبارسنجی کرد و سپس با مدل اعتبارسنجی شده بقیه مراحل مدل‌سازی را انجام داد. به همین جهت فاز دوم از مدل‌سازی تعریف شده است. در این فاز، بعد از تعادل مدل در فاز اول، هندسه تونل در مدل به حالت تهی درآمده و به اصطلاح حفر می‌شود. برای اعمال سیستم نگهداری نیز، خصوصیات بتن ۱ به هندسه نگهداری تونل (Tunnelsupport و Rings) اختصاص می‌یابد. حال می‌توان گفت که تونل حفر شده و سیستم نگهداری آن نیز اعمال شده است. قبل از آن که مدل حل شود باید جابجایی‌ها و سرعت‌های موجود در مدل صفر شوند. این کار به این دلیل انجام می‌شود که جابجایی‌های ناشی از فاز اول حل مدل به فاز دوم آن انتقال پیدا نکند. در نتیجه با این کار تمام جابجایی‌های ثبت شده در انتهای فاز دوم، تنها ناشی از حفر تونل خواهد بود. در انتها نیز مدل توسط دستور Solve حل می‌شود.

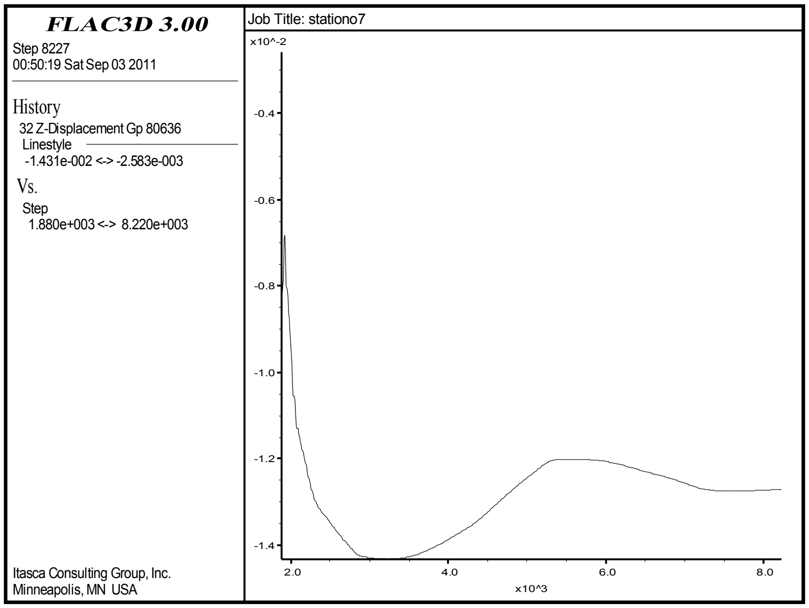
پس از حل مدل و تعادل دوباره آن باید به مقایسه داده‌های واقعی نشست و داده‌های نشست به‌دست آمده از مدل‌سازی پرداخت. براساس گزارش‌های حاصل شده از شرکت مهندسی سپاسد، در مقطعی که در کیلومتر ۱۳/۲۱۰ خط ۷ قرار دارد، میزان نشست حداکثر در سطح زمین برابر ۱ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. برای بررسی میزان نشست پیش‌بینی شده توسط مدل‌سازی در این

نقطه باید میزان جابجایی عمودی نقطه‌ای به مختصات (۱۷، ۵۵، ۰) که از قبل به عنوان یک تاریخچه در نظر گرفته شده بود، کنترل شود.

مقدار نشست برآورد شده توسط مدل در این نقطه ۲/۵ سانتی‌متر است(شکل ۵-۸). بنابراین در این مرحله بایستی بعضی پارامترها چنان تغییر پیدا کنند که میزان نشست تخمینی در مدل‌سازی به مقدار واقعی نزدیک‌تر شود. در این‌جا به نظر می‌رسد که پارامترهای مدول یانگ (E) و چسبندگی (C) خاک از عدم قطعیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها برخوردار باشند. با تغییر این پارامترها مشخص گردید هنگامی که مقادیر E و C، ۱/۳ برابر مقادیر اولیه خود باشند، مقدار نشست تخمینی درمقطع مورد نظر ۱/۲ سانتی‌متر است. با توجه به اختلاف اندک این مقدار با اندازه واقعی، همین حالت را به عنوان شرایط جدید مدل‌سازی پذیرفته و بر اساس آن سایر مراحل مدل‌سازی را ادامه داده می‌شود.



شکل ۵-۸. مقدار نشست تخمینی قبل از اصلاح مدل



شکل ۵-۹. مقدار نشست تخمینی بعد از اصلاح مدل

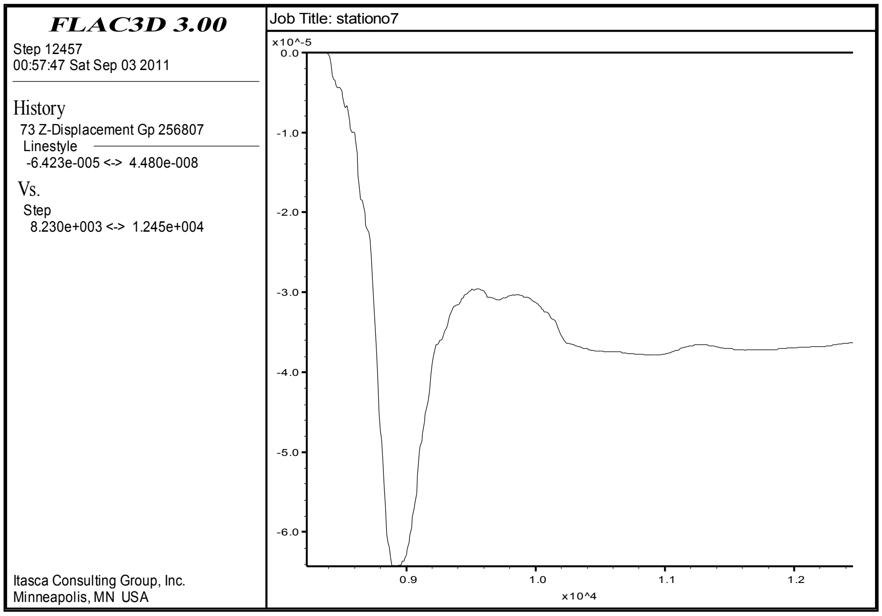
فاز ۳ : حفر ایستگاه

پس از اصلاح مدل‌سازی در فاز دوم نوبت به مرحله اصلی مدل‌سازی می‌رسد. در این مرحله ایستگاه مترو حفر شده، نگهداری‌های آن اعمال شده و آن قسمت از تونل مترو که در درون ایستگاه قرار می‌گیرد نیز حفر می‌شود. پس از حل مدل در این مرحله میزان جابجایی‌ها در سطح زمین به‌دست می‌آید.

در این مرحله به عنوان اولین گام، میزان جابجایی‌ها و سرعت‌های ناشی از مرحله قبل به صفر رسانده می‌شوند. از آن‌جایی که هندسه تونل در فاز قبلی حفر شده بود، در این مرحله کافی است نگهداری تونل (Tunnelsupport) و مابقی قسمت داخلی ایستگاه (Station) حفر شود. به این ترتیب کل محیط داخلی ایستگاه تهی می‌شود. در گام بعدی با تخصیص خصوصیات بتن ۲ به نگهداری اولیه و ثانویه ایستگاه، عملاً نگهداری ایستگاه نیز فعال می‌شود. در این مرحله مدل آماده حل شده است. بنابراین با دستور Solve مدل حل می‌شود.

پس از حل مدل و به تعادل رسیدن آن، می‌توان داده‌های نهایی مدل‌سازی را از طریق تاریخچه‌های آن برداشت کرد. داده‌های موردنظر، جابجایی عمودی در محل نقاط مرجع است. در

شکل ۵-۱۰ میزان نشست در نقطه مرجع ۴ به عنوان نمونه نشان داده شده است. می‌توان نتایج سایر تاریخچه‌ها را در قالب جدول ۵-۲ گزارش کرد.



شکل ۵-۱۰. میزان نشست در نقطه مرجع ۴

جدول ۵-۲. میزان نشست در نقاط مرجع ایستگاه O7

نقاط مرجع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
میزان نشست (mm)	+۰/۰۶	-۰/۰۱	+۰/۰۰۵	-۰/۰۳	-۰/۲	-۰/۰۳	+۰/۰۱	+۰/۰۱	-۰/۱	-۰/۰۶	-۰/۱۶	-۰/۱۵

۵-۴-۷. ارزیابی ریسک

با توجه به داده‌های جدول ۵-۲، می‌توان برای هر ساختمان، ارزیابی ریسک را به صورت زیر انجام داد.

ساختمان شماره ۱

همان‌طور که پیش‌تر گفتیم دو نقطه مرجع شماره ۱ و ۲ مختص ساختمان شماره ۱ می‌باشند. برای ارزیابی ریسک خسارت ابتدا باید ارزیابی مقدماتی انجام شود. در مرحله ارزیابی مقدماتی باید دو پارامتر حداکثر نشست و حداکثر شیب را محاسبه کرد. مقادیر جدول ۵-۲ به عنوان حداکثر نشست

در نقاط مرجع در نظر گرفته می‌شود. پارامتر حداکثر شیب نیز، شیب خط مستقیمی است که دو نقطه مرجع سازه را به هم وصل می‌کند.

میزان نشست در نقطه مرجع 1 : $S_{max} = +0.06\ mm$

میزان نشست در نقطه مرجع 2 : $S_{max} = -0.01\ mm$

$$\theta = \frac{\text{اختلاف نشست دو نقطه}}{\text{فاصله طولی دو نقطه}} = \frac{0.07 \times 10^{-3}\ m}{10\ m} = \frac{0.0035}{500}$$

همان‌طور که پیش‌تر در مبحث ارزیابی مقدماتی ریسک بیان شد، در صورتی که مقادیر حداکثر نشست از ۱۰ میلی‌متر و مقدار θ نیز از $\frac{1}{500}$ کمتر باشند، ریسک خسارت ساختمان ناچیز است و در غیر این‌صورت باید به ارزیابی مرحله دوم مراجعه کرد. از آن‌جایی که مقادیر حداکثر نشست از ۱۰ میلی‌متر کمتر بوده و مقدار $\theta = \frac{0.0035}{500}$ بسیار کمتر از $\frac{1}{500}$ است، میزان ریسک خسارت این ساختمان در رده ناچیز قرار می‌گیرد.

ساختمان شماره ۲:

برای ارزیابی ریسک خسارت این ساختمان باید از داده‌های نقاط مرجع ۳ و ۴ استفاده کرد.

میزان نشست در نقطه مرجع 3 : $S_{max} = +0.005\ mm$

میزان نشست در نقطه مرجع 4 : $S_{max} = -0.03\ mm$

$$\theta = \frac{\text{اختلاف نشست دو نقطه}}{\text{فاصله طولی دو نقطه}} = \frac{0.08 \times 10^{-3}\ m}{12\ m} = \frac{0.0033}{500}$$

با توجه به مقادیر حداکثر نشست و مقدار θ بدست آمده از این ساختمان، ارزیابی ریسک برای این ساختمان نیز در مرحله مقدماتی خاتمه یافته و میزان ریسک در رده ناچیز ارزیابی می‌شود.

ساختمان شماره ۳

برای ارزیابی ریسک این ساختمان نیز ابتدا از ارزیابی مقدماتی استفاده می‌شود. به این منظور باید از داده‌های نقاط مرجع ۵ و ۶ استفاده کرد.

میزان نشست در نقطه مرجع 5 : $S_{max} = -0.2\ mm$

میزان نشست در نقطه مرجع 6 : $S_{max} = -0.03\ mm$

$$\theta = \frac{\text{اختلاف نشست دو نقطه}}{\text{فاصله طولی دو نقطه}} = \frac{0.97 \times 10^{-3}\, m}{24\, m} = \frac{0.02}{500}$$

همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر حداکثر نشست بسیار کمتر از ۱۰ میلی‌متر هستند و مقدار حداکثر شیب نیز کمتر از $\frac{1}{500}$ است. بنابراین میزان ریسک تخمینی برای این ساختمان در رده ناچیز قرار می‌گیرد.

ساختمان شماره ۴

برای ارزیابی ریسک ساختمان شماره ۴ از نقاط مرجع ۷ و ۸ استفاده می‌شود. مقادیر حداکثر نشست و حداکثر شیب این ساختمان به این شرح است.

میزان نشست در نقطه مرجع 7 : $S_{max} = +0.01\, mm$

میزان نشست در نقطه مرجع 8 : $S_{max} = +0.01\, mm$

$$\theta = \frac{\text{اختلاف نشست دو نقطه}}{\text{فاصله طولی دو نقطه}} = 0$$

همان‌طور که دیده می‌شود در نقاط مرجع مربوط به این ساختمان برآمدگی مشاهده می‌شود و از آن‌جایی که مقادیر این برآمدگی یکسان است، مقدار حداکثر شیب نیز صفر خواهد شد. بنابراین رده خسارتی تخمینی برای این ساختمان نیز ناچیز و اندک پیش‌بینی می‌شود.

ساختمان شماره ۵

برای ارزیابی ریسک این ساختمان باید به نقاط مرجع ۹ و ۱۰ مراجعه شود. با استفاده از این دو نقطه مرجع می‌توان مقادیر حداکثر نشست و حداکثر شیب نشست را به این صورت محاسبه کرد.

میزان نشست در نقطه مرجع 9 : $S_{max} = -0.1\, mm$

میزان نشست در نقطه مرجع 10 : $S_{max} = -0.06\, mm$

$$\theta = \frac{\text{اختلاف نشست دو نقطه}}{\text{فاصله طولی دو نقطه}} = \frac{0.94 \times 10^{-3}\, m}{24\, m} = \frac{0.019}{500}$$

میزان حداکثر نشست و مقدار شیب نشست بدست آمده برای این ساختمان نیز حکایت از آن دارد که میزان ریسک خسارت این ساختمان نیز اندک و ناچیز است.

ساختمان شماره ۶

این ساختمان که آخرین ساختمان مورد مطالعه در محدوده این ایستگاه است، تقریباً بر روی قطعه رکتی‌فایر ایستگاه قرار می‌گیرد. برای مطالعه ریسک خسارت این ساختمان نیز از دو نقطه مرجع ۱۱ و ۱۲ بهره می‌گیریم. با در دست داشتن داده‌های این دو نقطه مرجع مقادیر حداکثر نشست و مقدار شیب به این صورت خواهد بود.

میزان نشست در نقطه مرجع 11 : $S_{max} = -0.16\ mm$

میزان نشست در نقطه مرجع 12 : $S_{max} = -0.15\ mm$

$$\theta = \frac{\text{اختلاف نشست دو نقطه}}{\text{فاصله طولی دو نقطه}} = \frac{0.01 \times 10^{-3}\ m}{22\ m} = \frac{0.00022}{500}$$

با توجه به نتایج بالا، مشاهده می‌شود که مقادیر حداکثر نشست بسیار کمتر از ۱۰ میلی‌متر و مقدار حداکثر شیب نیز کمتر از $\frac{1}{500}$ است. در نتیجه ارزیابی ریسک این ساختمان نیز در مرحله مقدماتی خاتمه یافته و میزان خسارت این ساختمان ناچیز و اندک رده‌بندی می‌شود.

جدول ۵-۳. نتایج ارزیابی ریسک ساختمان‌ها در محدوده ایستگاه O7

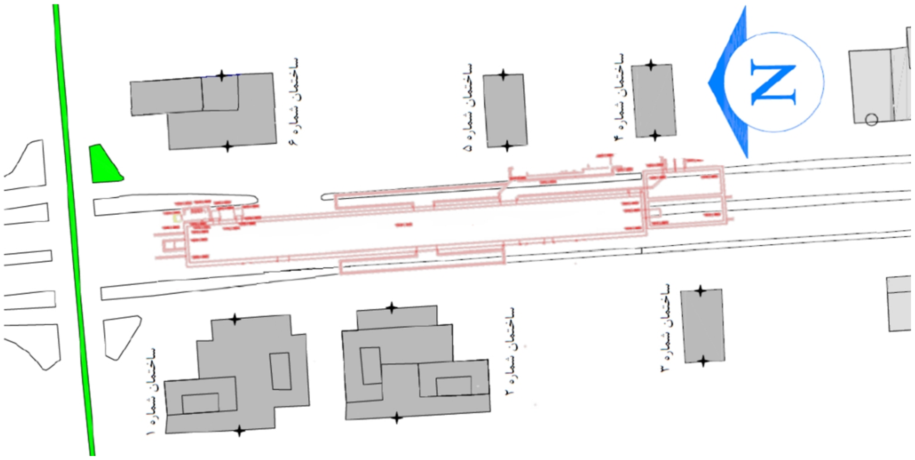
ساختمان‌ها	ساختمان ۱		ساختمان ۲		ساختمان ۳		ساختمان ۴		ساختمان ۵		ساختمان ۶	
نقاط مرجع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
میزان نشست (mm)	+۰/۰۶	-۰/۰۱	+۰/۰۰۵	-۰/۰۳	-۰/۲	-۰/۰۳	+۰/۰۱	+۰/۰۱	-۰/۱	-۰/۰۶	-۰/۱۶	-۰/۱۵
شیب نشست (θ)	$\frac{0.0035}{500}$		$\frac{0.0033}{500}$		$\frac{0.02}{500}$		0		$\frac{0.019}{500}$		$\frac{0.00022}{500}$	
رده خسارت	ناچیز		ناچیز		ناچیز		ناچیز		ناچیز		ناچیز	

۵-۵. تحلیل ایستگاه P7

پیش‌تر به این موضوع اشاره شد که ایستگاه P7 به گونه‌ای احداث شده است که فاصله جانبی آن تا ساختمان‌های دو طرف بزرگراه شهید نواب صفوی تقریباً یکسان است. این فاصله از ۱۰ تا ۲۴ متر متغیر است. این موضوع سبب می‌شود که هم ساختمان‌های غربی و هم ساختمان‌های شرقی ایستگاه مورد توجه و مورد مطالعه قرار گیرند. از میان ساختمان‌های اطراف ایستگاه P7، ۶ ساختمان به

واسطه نزدیکی به ایستگاه و تعداد طبقات زیاد انتخاب می‌شوند. این ساختمان‌ها مطابق شکل ۵-۱۱ از شماره ۱ تا ۶ نام‌گذاری می‌شوند. تعداد طبقات این ۶ ساختمان به ترتیب ۱۴،۱۴،۱۱،۱۱،۱۴ و ۱۵ طبقه است. ساختمان شماره ۶ که ۱۵ طبقه دارد در میان سایر ساختمان‌ها از حساسیت بیش‌تری برخوردار است. همانند آن‌چه برای ایستگاه قبل انجام شد، در این‌جا نیز برای هر ساختمان دو نقطه مرجع تعیین می‌شود تا مطالعات از طریق این نقاط مرجع دنبال شوند.

تحلیل ایستگاه P7 از بسیاری جهات مشابه تحلیل ایستگاهO7 است. این شباهت در بخش‌های هندسه مدل‌سازی، خصوصیات مصالح، شرایط مرزی، تنش‌های برجا و غیره وجود دارد. به همین جهت برای جلوگیری از تکرار مباحثی که در بخش تحلیل ایستگاه O7 گفته شد، تنها به ذکر تفاوت‌های جزئی موجود بین این دو تحلیل پرداخته می‌شود و بیش‌تر به بررسی نتایج تحلیل پرداخته خواهد شد.



شکل ۵-۱۱. موقعیت ساختمان‌ها نسبت به ایستگاه P7

در بخش هندسه مدل‌سازی، دو تفاوت عمده بین ایستگاه O7 وP7 وجود دارد. نخست آن‌که قطعه دوم (رکتی‌فایر) ایستگاه P7 با وجود آن‌که از لحاظ هندسی کاملاً شبیه قطعه دوم ایستگاه قبل است، اما برخلاف ایستگاه قبلی، قبل از قطعه اصلی آن (پایین دست آن) قرار گرفته است.

وجه تمایز دوم در آن است که عرض مدل این ایستگاه نسبت به ایستگاه O7، هم در جهت مثبت و هم در جهت منفی ۲۰ متر افزایش پیدا کرده است . این تفاوت به سبب نیاز به عرض بیش‌تر

برای مدل کردن ساختمان‌ها در دو طرف ایستگاه است. البته این تفاوت تنها در هندسه خاک‌های دربرگیرنده مدل تأثیر گذاشته و سایر بخش‌های هندسه مدل دست‌خوش تغییر نخواهند شد.

با توجه به این که ساخت‌گاه زمین‌شناسی این ایستگاه کاملاً با ایستگاه O7 مشابه است، خصوصیات مصالح و مدل رفتاری تخصیص داده شده به آن برای این ایستگاه کاملاً با وضعیت ایستگاه قبل یکسان است. به این ترتیب دو تیپ از مصالح یعنی خاک روباره و خاک اصلی با مدل رفتاری مور-کولب و دو نوع دیگر یعنی بتن ۱و بتن ۲ با مدل رفتاری الاستیک و مطابق جدول ۵-۱ توصیف می‌شوند.

شرایط مرزی و وضعیت تنش‌های برجا در ایستگاهP7 کاملاً مشابه با وضعیت ایستگاه قبلی است. به عبارت دیگر از مرزهای مصنوعی غلطکی جابجایی ثابت برای شرایط مرزی و از تنش‌های هیدرواستاتیک برای تنش‌های برجا استفاده شده است. تنها تفاوت در این بخش، درمورد شرایط مرزی در راستای x است که با توجه به عرض بیش‌تر مدل به جای صفحات x=50 و x=-50 صفحات x=70 و x=-70 ثابت شده‌اند. برای ثبت مقادیر جابجایی در مدل‌سازی نیز مانند تحلیل قبلی از تاریخچه‌ها استفاده شده است. علاوه بر ۱۲ نقطه مرجع ذکر شده نیز چندین تاریخچه دیگر در مدل‌سازی به کار گرفته شده‌اند تا تصویری دقیق‌تر از وضعیت نشست ایجاد کنند.

۵-۵-۱.تحلیل مدل

در تحلیل مدل ایستگاهP7 نیز مانند ایستگاهO7 سه فاز مجزا ایجاد شده است که به این صورت هستند.

فاز ۱: تعادل

در این مرحله از تحلیل، مدل ایجاد شده بدون ایجاد هرگونه حفاری حل می‌شود. این کار به منظور حذف نیروهای نامتعادل و ایجاد تعادل اولیه در مدل ایجاد می‌شود. برای تحقیق تعادل مدل می‌توان از سه نمودار نسبت نیروهای نامتعادل، سرعت و جابجایی استفاده کرد. اما ماهیت دستور Solve به گونه‌ای است که حل مدل را با تعداد گام نامشخص تا جایی ادامه می‌دهد که تعادل مدل

حاصل شود. بنابراین از آن‌جایی که ما در همه مراحل حل مدل از این دستور استفاده می‌کنیم، تعادل آن در همه این مراحل بدیهی است.

فاز ۲:حفر تونل

این مرحله از حل مدل دو هدف را دنبال می‌کند. هدف نخست اصلاح مدل‌سازی و تطبیق آن با شرایط واقعی و به گونه‌ای اعتبارسنجی مدل و هدف دوم خنثی کردن جابجایی‌های ناشی از حفر تونل است.

در این مرحله از مدل‌سازی با در دست داشتن اطلاعات واقعی از جابجایی سطح زمین ناشی از حفر تونل در بعضی مقاطع و مقایسه با نتایج بدست آمده از مدل‌سازی در همان مقاطع به اصلاح مدل‌سازی پرداخته می‌شود. به این‌صورت که بعضی از پارامترها که در مدل‌سازی از عدم قطعیت بیش‌تری برخوردارند به قدری تغییر می‌یابند که داده‌های واقعی و داده‌های ناشی از مدل‌سازی مطابقت خوبی با یکدیگر پیدا کند.

از سویی دیگر با توجه به این‌که هدف مدل‌سازی ثبت و تخمین جابجایی‌هایی است که تنها ناشی از حفر ایستگاه باشند، قبل از مرحله حفر ایستگاه بایستی تونلی که از درون آن می‌گذرد حفر شده و جابجایی‌های آن خنثی و صفر شوند. به این ترتیب جابجایی‌هایی که در مرحله بعد در مدل ثبت می‌شوند، تنها ناشی از حفر ایستگاه خواهند بود.

با توجه به مباحثی که مطرح شد، برای حفر تونل در مدل ابتدا هندسه تونل (Tunnel) توسط دستور Null حفر می‌شود و سپس خصوصیات مربوط به بتن ۱ به هندسه نگهداری تونل (Tunnelsupport وRings) اختصاص داده می‌شود. حال پس از صفر کردن جابجایی‌ها و سرعت‌های موجود در مدل، ناشی از مرحله قبل، با دستورSolve مدل حل می‌شود.

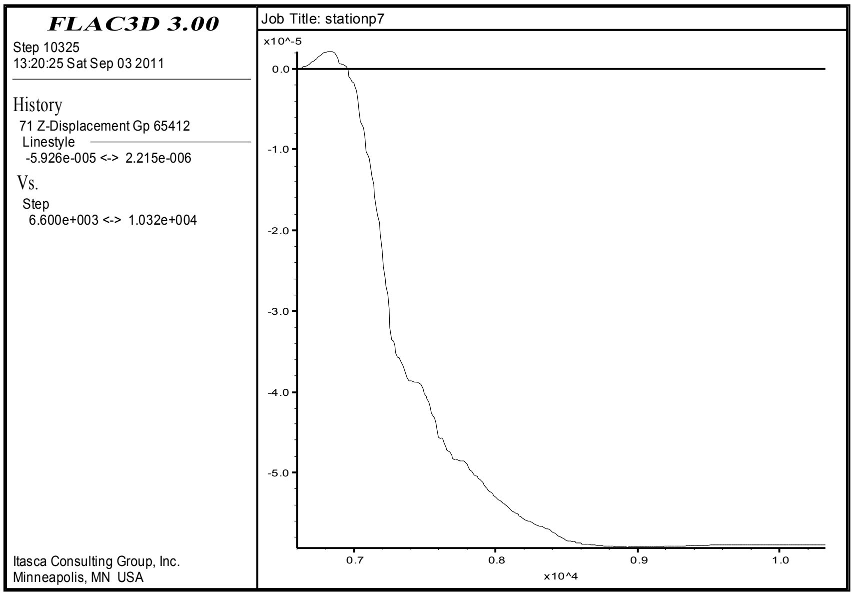
بر اساس داده‌های موجود، میزان نشست واقعی ناشی از حفر تونل در مقطعی در کیلومتر ۱۴/۰۰۰ خط ۷ مترو، برابر با ۰/۸ سانتی‌متر و در مقطعی دیگر در کیلومتر ۱۴/۰۴۰ برابر ۰/۶ سانتی‌متر ثبت شده است. برای مقایسه داده‌های واقعی با نتایج مدل‌سازی باید بعد از حل و به تعادل

رسیدن مدل به سراغ تاریخچه‌ها در نقاط مورد نظر رفت. مقطع ۱۴/۰۰۰، معادل تاریخچه در نقطه‌ای با مختصات (۰،۱۲۰،۱۷) و مقطع ۱۴/۰۴۰، معادل تاریخچه در نقطه‌ای با مختصات (۰،۱۶۰،۱۷) در مدل است. با توجه به این‌که میزان نشست تخمینی توسط مدل در این دو نقطه به ترتیب ۲/۶ و ۲/۴ سانتی‌متر بوده است، می‌توان با تغییر دو پارامتر مدول یانگ (E) و چسبندگی (C) خاک که نسبت به سایر پارامترها از عدم قطعیت بیش‌تری برخوردارند، به اصلاح مدل‌سازی پرداخت. با تغییر چندباره این دو پارامتر مشخص گردید که با ۱/۵ برابر کردن مقادیر E و C، مقدار نشست در این دو نقطه ۰/۹ و ۰/۹ سانتی‌متر برآورد می‌شود. با توجه به نزدیکی این مقادیر نشست با مقادیر واقعی، می‌توان همین حالت مدل‌سازی را پذیرفته و همین مقادیر E و C را به عنوان مقادیر اصلاح شده نهایی اعمال کرد. حال از این مدل اصلاح شده برای ادامه سایر مراحل مدل‌سازی استفاده می‌شود.

فاز ۳: حفر ایستگاه

اهمیت این مرحله از تحلیل مدل در آن است که در آن نتایج پایانی مدل‌سازی بدست می‌آیند. اولین گام در این مرحله خنثی و صفر کردن جابجایی‌ها و سرعت‌های ناشی از مرحله قبل است. به این ترتیب جابجایی‌های ناشی از حفر تونل در سطح زمین بر نتایج نهایی ما بی‌تأثیر خواهد بود. در گام بعدی به حفر فضای داخلی ایستگاه پرداخته می‌شود. این فضا شامل دو گروه هندسه Station و TunnelSupport است. با استفاده از دستور Null هر دو این هندسه‌ها حفر می‌شوند. در گام بعد، بعد از حفر فضای داخلی ایستگاه نوبت به اعمال سیستم‌های نگهداری دوگانه ایستگاه می‌رسد. با اختصاص خصوصیات مصالح بتن ۲ به نگهداری اولیه و ثانویه، نگهداری‌های ایستگاه نیز فعال می‌شوند. در انتها پس از تخصیص تاریخچه‌ها به مدل، با دستور Solve مدل حل می‌شود.

در نهایت پس از آن‌که مدل حل شده و به تعادل رسید، می‌توان نتایج نهایی مدل‌سازی که همان میزان جابجایی در نقاط مرجع است را از طریق تاریخچه‌ها برداشت کرد. شکل ۶-۱۲ میزان نشست در نقطه مرجع ۲ را به عنوان نمونه‌ای از چگونگی استخراج مقادیر جابجایی عمودی نشان می‌دهد. سایر نتایج در جدول ۵-۴ گزارش شده‌اند.



شکل ۵-۱۲. میزان نشست در نقطه مرجع ۲ در محدوده ایستگاه P7

جدول ۵-۴. میزان نشست در نقاط مرجع ایستگاه P7

نقاط مرجع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
میزان نشست (mm)	-۰/۰۲۵	-۰/۰۶	-۰/۲۸	-۰/۰۹	+۰/۰۱	-۰/۰۷	+۰/۰۰۵	-۰/۰۷	+۰/۰۲	-۰/۰۸	-۰/۰۶	-۰/۰۶

۵-۵-۲. ارزیابی ریسک

پس از اتمام مدل‌سازی و حاصل شدن داده‌های مربوط به نشست در نقاط مرجع، می‌توان به ارزیابی ریسک خسارت ساختمان‌های مورد نظر در محدوده ایستگاه P7 پرداخت. همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد، برای ارزیابی ریسک خسارات از رویکرد تشریح شده در بخش ۳-۳ استفاده می‌شود.

مطابق آن‌چه که در مورد ساختمان‌های محدوده ایستگاه O7 گفته شد، برای ساختمان‌های حاضر نیز ابتدا ارزیابی مقدماتی ریسک انجام می‌شود. به سبب شباهت تحلیل ساختمان‌ها در این ایستگاه با تحلیل ساختمان‌های ایستگاه قبل و به منظور جلوگیری از تکرار مباحث، در این‌جا به جزئیات تحلیل ریسک ساختمان‌ها پرداخته نمی‌شود و تنها بر اساس روابط و محاسباتی که در تحلیل

قبلی به آن اشاره شد، میزان حداکثر نشست و شیب نشست برای هریک از ساختمان‌ها محاسبه شده و در جدول ۵-۵ ارائه می‌شود.

جدول ۵-۵. نتایج ارزیابی ریسک ساختمان‌ها در محدوده ایستگاه P7

ساختمان‌ها	ساختمان ۱		ساختمان ۲		ساختمان ۳		ساختمان ۴		ساختمان ۵		ساختمان ۶	
نقاط مرجع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
میزان نشست (mm)	−۰/۰۲۵	−۰/۰۶	−۰/۲۸	−۰/۰۹	+۰/۰۱	−۰/۰۷	+۰/۰۰۵	−۰/۰۷	+۰/۰۲	−۰/۰۸	−۰/۰۶	−۰/۰۶
شیب نشست (θ)	$\frac{0.00073}{500}$		$\frac{0.004}{500}$		$\frac{0.002}{500}$		$\frac{0.001}{500}$		$\frac{0.001}{500}$		0	
رده خسارت	ناچیز		ناچیز		ناچیز		ناچیز		ناچیز		ناچیز	

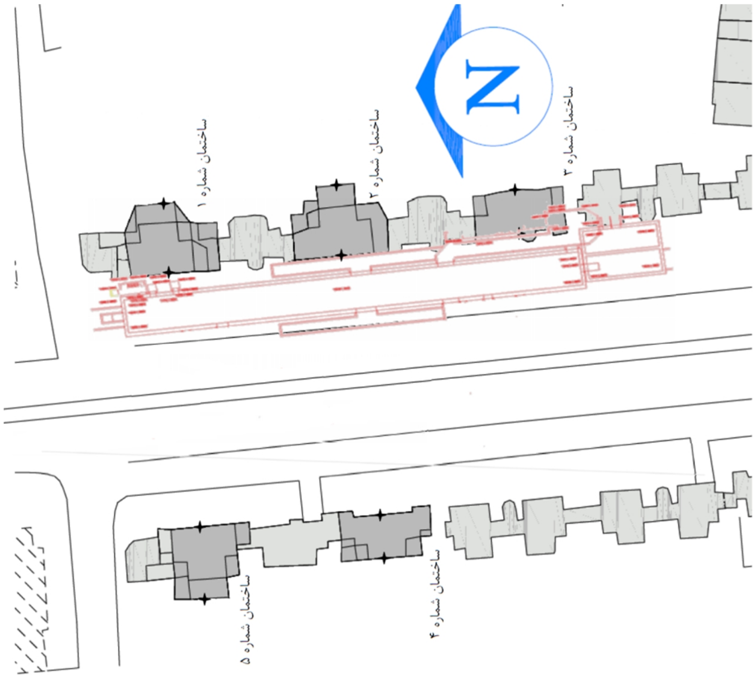
پس از ارزیابی مقدماتی برای ساختمان‌ها، مشخص گردید که با توجه به مقادیر اندک نشست و شیب نشست، میزان ریسک برای آن‌ها ناچیز و اندک برآورد شده و ارزیابی ریسک در مرحله مقدماتی خاتمه می‌یابد. نتایج این ارزیابی ریسک نیز در قالب جدول ۵-۵ ارائه شده است.

۵-۶. تحلیل ایستگاه Q7

تحلیل ایستگاه Q7 از دو جهت با تحلیل دو ایستگاه قبلی متفاوت است. نخست آن‌که این ایستگاه در اعماق بیشتری نسبت به دو ایستگاه قبل قرار دارد و تفاوت دوم آن‌که این ایستگاه در کنار تونل توحید و ایستگاه I2 قرار گرفته است. به سبب فاصله زیاد، ایستگاه I2 نمی‌تواند تأثیر زیادی در تحلیل این ایستگاه داشته باشد، اما اندرکنش سازه‌های تونل توحید با ایستگاه از اهمیت بیشتری برخوردار است.

موقعیت محلی ایستگاه Q7 به گونه‌ای است که در شرق بزرگراه شهید نواب صفوی و همچنین در کناره شرقی تونل توحید و رمپ ورودی آن قرار دارد. از سویی دیگر فاصله جانبی ساختمان‌های کناره شرقی بزرگراه تا ایستگاه عموماً کمتر از ۱ متر و در بیشترین حالت ۳ متر است. این موضوع سبب می‌شود که با وجود تعداد طبقات اندک این ساختمان‌ها، ارزیابی ریسک خسارات برای آن‌ها از

اهمیت خاصی برخوردار باشد. در مجموع در محدوده این ایستگاه ۵ ساختمان مورد مطالعه قرار خواهد گرفت که با شماره‌های ۱ تا ۵ مطابق شکل ۵-۱۳ شناسایی می‌شوند. تعداد طبقات این ساختمان‌ها به ترتیب ۱۰، ۸، ۸، ۸ و ۸ طبقه است. همانند آن‌چه در مورد ایستگاه‌های قبلی انجام شد، برای هریک از این ساختمان‌ها دو نقطه مرجع تعیین می‌شود که رفتار نشست ساختمان با این دو نقطه کنترل خواهد شد. شماره‌گذاری این نقاط به این ترتیب است که نقاط مرجع ۱ و ۲ برای ساختمان شماره ۱ و به همین ترتیب تا نقاط مرجع ۹ و ۱۰ که برای ساختمان شماره ۵ هستند.



شکل ۵-۱۳. موقعیت ساختمان‌ها نسبت به ایستگاه Q7

همانطور که پیش‌تر نیز اشاره کردیم، تحلیل ایستگاه Q7 از بعضی جهات مشابه و از بعضی جهات متفاوت با تحلیل ایستگاه O7 است. شباهت‌های مذکور در همه بخش‌های تحلیل اعم از هندسه مدل، خصوصیات مصالح، شرایط مرزی، تنش‌های برجا و غیره کم و بیش وجود دارد. لذا به جهت جلوگیری از تکرار مباحث یکسان، در این‌جا تنها به تفاوت‌های دو تحلیل اشاره می‌شود و مابقی موارد تحلیل مطابق با تحلیل ایستگاه O7 فرض می‌شود[۳۲].

۵-۶-۱. هندسه مدل

هندسه ایجاد شده برای تحلیل ایستگاه Q7 از لحاظ ابعاد کلی، متفاوت از دو ایستگاه قبل است. به سبب قرارگیری تونل توحید در کناره غربی ایستگاه، عرض مدل در این جهت کمی افزایش داشته و تا ۸۰ متر زیاد شده است. به این ترتیب عرض مدل از ۸۰- تا ۵۰+ تغییر می‌کند. از سوی دیگر به دلیل قرارگیری ایستگاه در اعماق بیشتر، ارتفاع مدل نیز کمی بیشتر شده و به ۶۳ متر رسیده است. اما طول مدل مطابق مدل‌های قبلی برابر ۲۵۰ متر است.

ایستگاه Q7 نیز از دو قطعه تشکیل شده است. قطعه اول که ۳۰ متر طول دارد به منظور کاربری پشتیبانی و اطفاء حریق به کار می‌رود و قطعه دوم که قطعه اصلی ایستگاه است، محل سکوها و دسترسی عموم مردم به قطار است. هندسه مدل ایستگاه Q7 نیز از چندین بخش تشکیل شده است. هندسه نگهداری ایستگاه، تونل، نگهداری تونل، ایستگاه، خاک‌های دربرگیرنده و هندسه تونل از جمله این اجزاء هستند. در میان این بخش‌ها، تنها هندسه تونل توحید است که در تحلیل‌های قبلی به آن پرداخته نشده است، لذا در ادامه به توصیف هندسه تونل توحید خواهیم پرداخت.

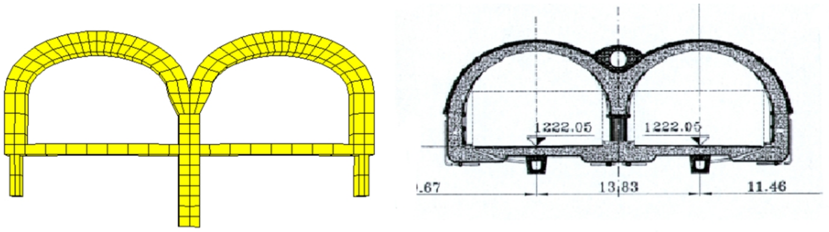
هندسه تونل توحید

پیش‌تر اشاره شد که ایستگاه Q7 در مجاورت با تونل توحید و رمپ ورودی آن قرار دارد. لذا در مدل‌سازی این ایستگاه، علاوه بر ایجاد هندسه تونل، بایستی به هندسه رمپ ورودی آن نیز پرداخته شود. هندسه تونل توحید به خصوص رمپ ورودی آن دارای پیچیدگی‌های فراوانی است که ایجاد همه آن‌ها در مدل مورد نظر، کاری سخت و ناممکن جلوه می‌نماید. لذا در ایجاد این بخش از هندسه مدل و مخصوصاً دیواره‌های رمپ ورودی، ساده‌سازی‌هایی صورت پذیرفته که پیش‌بینی می‌شود تأثیر زیادی نیز بر روی نتایج نداشته باشند. هندسه تونل توحید را نیز می‌توان به اجزایی کوچک‌تر تقسیم نمود. نگهداری تونل، تونل، شمع‌ها و دیواره رمپ این اجزاء را تشکیل می‌دهند. محل قرارگیری هندسه تونل توحید در مدل ایجاد شده را می‌توان به تفکیک تونل و رمپ ورودی آن تشریح کرد. هندسه تونل در

عرض ۱۲- تا ۴۸-، طول ۱۱۴ تا ۲۵۰ و ارتفاع ۱ تا ۱۷ متر قرار می‌گیرد. رمپ ورودی تونل نیز در عرض ۱۲- تا ۴۸-، طول ۰ تا ۱۱۴ و ارتفاع ۱۷ تا ۲۳ قرار می‌گیرد.

هندسه نگهداری تونل

همان‌طور که در شکل ۵-۱۴ دیده می‌شود، شکل کلی تونل توحید به صورت دو تونل نعل اسبی متصل به یکدیگر است که در محل اتصال آن‌ها شمع‌هایی قرار گرفته‌اند. ارتفاع تونل از زیر کف تا بالای سقف ۱۳ متر و عرض خارجی تونل ۳۶ متر است. تونل در طول ۱۱۴ متری مدل یعنی در کیلومتر ۱۴/۶۸۰ خط ۷ آغاز شده و با شیب تقریبی $\frac{1}{8.5}=\frac{16}{136}$ تا انتهای مدل ادامه دارد. ضخامت نگهداری تونل در سقف و دیواره‌ها ۲ متر و در کف تونل ۱ متر است.



ب - مقطع تونل توحید در مدل الف - مقطع حقیقی تونل توحید

شکل ۵-۱۴. مقایسه مقطع تونل توحید در حالت حقیقی با مقطع آن در مدل

هندسه تونل

این هندسه در حقیقت مربوط به فضای داخلی نگهداری تونل است که در ابتدا و در مرحله اول تحلیل از جنس خاک است، اما در مراحل بعدی خالی می‌شود تا فضای خالی درون تونل توحید ایجاد شود.

هندسه شمع‌ها

در هندسه تونل توحید دو دسته شمع قابل تشخیص هستند. نخست شمع‌های میانی که در دیواره میانی دو تونل نعل اسبی قرار گرفته‌اند. این شمع‌ها که قطری برابر ۲ متر دارند از ۷ متری زیر کف تونل شروع و تا ۵ متری بالای کف تونل ادامه دارد. دسته دوم شمع‌ها، شمع‌های کناری هستند که در زیر دیواره‌های کناری تونل قرار دارند. قطر این شمع‌ها ۱ متر بوده و ارتفاعی برابر ۴ متر دارند

یعنی از ۴ متری زیر کف آغاز و در کف تونل خاتمه می‌یابند. تفاوت اصلی این شمع‌ها با شمع‌های میانی در آن است که این شمع‌ها به صورت پیوسته‌اند اما شمع‌های میانی به صورت فاصله‌دار ایجاد می‌شوند. هر دو دسته شمع توصیف شده هم در بخش تونل و هم در بخشی از رمپ ورودی آن حضور دارند. با این استثناء که در بخش رمپ ورودی، آن جزء از شمع‌های میانی که در بالای کف رمپ قرار گرفته‌اند، حذف شده‌اند.

هندسه دیواره‌ها

هندسه رمپ ورودی تونل توحید به دو جزء دیواره و کف قابل تقسیم است. کف رمپ ورودی که از جنس بتن است همان مشخصات کف تونل توحید را دارد اما شیب آن $\frac{1}{19}$ است که نسبت به شیب کف تونل کمتر می‌باشد. دیواره‌های رمپ ورودی نیز در راستای دیواره‌های جانبی تونل، از ابتدای مدل تا صفحه y=84 ادامه پیدا می‌کنند. ضخامت این دیواره‌ها که از جنس بتن هستند ۲ متر بوده و با همان شیب کف رمپ، از عمق ۱۰ متری سطح زمین یعنی در تراز z=23 آغاز شده و در صفحه y=84 تا عمق ۱۶ متری ادامه می‌یابد. این دیواره‌ها تا سطح زمین یعنی تراز ۳۳ متری گسترش دارند.

پس از توصیف هندسه مدل، خصوصیات مصالح و مدل رفتاری اختصاص داده شده به آن‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. در این تحلیل علاوه بر هندسه‌های قبلی، هندسه‌های مربوط به تونل توحید نیز حضور دارند که باید برای آن‌ها نیز خصوصیات مصالح تعریف شود و مدل رفتاری اختصاص یابد. با توجه به داده‌های موجود و از آن‌جا که کلیه نگهداری‌های تونل توحید از جنس بتن هستند، می‌توان برای مصالح آن از تیپ بتن ۲ و مدل رفتاری الاستیک استفاده نمود. سایر بخش‌های مدل، مصالح و خصوصیات رفتاری مشابه با تحلیل ایستگاه O7 را به خود اختصاص می‌دهند. به این صورت که خاک روباره و خاک اصلی با مدل رفتاری مور-کولمب و نگهداری تونل با بتن ۱ و نگهداری ایستگاه با بتن ۲ و رفتار الاستیک تعریف می‌شوند. مشخصات این مصالح پیش‌تر در جدول ۵-۱ بیان شده است.

شرایط مرزی و وضعیت تنش‌های برجا در ایستگاه Q7 نیز کم و بیش مشابه با ایستگاه O7 است. یعنی برای مرزهای مدل از مرزهای مصنوعی غلطکی جابجایی ثابت استفاده شده است و برای

توصیف تنش‌های برجا در مدل، از تنش‌های هیدرواستاتیک بهره‌گیری شده است. اما از آن‌جا که ابعاد مدل ایستگاه Q7 کمی بزرگ‌تر از مدل O7 است، در نتیجه مرزهای مصنوعی کمی جابجا شده و مقادیر تنش‌های هیدرواستاتیک نیز کمی بیشتر است. به عبارت دیگر با توجه به آنکه مدل در جهت xهای منفی تا ۸۰- گسترش یافته، مرز مصنوعی نیز در x=-80 قرار گرفته است و از سویی دیگر با توجه به افزایش ارتفاع مدل نسبت به مدل‌های قبلی، مقادیر تنش‌های برجا در عمق مدل بیش‌تر از مدل‌های قبلی است.

۵-۶-۲. تحلیل مدل

با توجه به مدل‌سازی تونل توحید و رمپ ورودی آن در این بخش، در تحلیل ایستگاه Q7 یک فاز علاوه بر فازهایی که در تحلیل‌های قبلی گفته شد به این تحلیل اضافه شده و تحلیل این ایستگاه در چهار فاز انجام خواهد شد.

فاز اول: تعادل

همانند تحلیل‌های قبلی، در فاز ۱ از تحلیل، مدل بدون هیچ‌گونه حفاری حل می‌شود. به این ترتیب نیروهای نامتعادل موجود در مدل حذف شده و مدل به تعادل می‌رسد. با توجه به این‌که برای حل مدل از دستور Solve استفاده می‌شود، تعادل مدل پس از اتمام حل مدل قطعی و محرز است. در غیر این‌صورت و در حالتی که از دستورهای دیگر برای حل مدل استفاده می‌شد، می‌بایست با استفاده از نمودارهای نیروی نامتعادل، سرعت و جابجایی، به تعادل رسیدن مدل به اثبات می‌رسید.

فاز دوم: حفر تونل توحید

در این مرحله از حل مدل، تونل توحید و رمپ ورودی آن حفر و احداث می‌شوند. اولین گام در این مرحله خنثی کردن و به صفر رسانیدن جابجایی‌ها و سرعت‌ها در مدل است. سپس با به‌کارگیری دستور Null داخل تونل توحید و رمپ ورودی که به ترتیب با گروه‌های Totunnel و Inwalls تعریف شده‌اند، حفر می‌شود. در گام بعد به منظور فعال‌سازی کلیه نگهداری‌های تونل توحید و رمپ ورودی آن (نگهداری تونل، کف تونل، شمع‌ها، دیواره و کف رمپ ورودی) خصوصیات بتن ۲ به آن‌ها

اختصاص می‌یابد. حال می‌توان بعد از حفر تونل توحید و رمپ ورودی و فعال شدن نگهداری‌های آن‌ها به حل مدل پرداخت که به این منظور از دستور Solve استفاده می‌شود.

فاز ۳: حفر تونل

پس از حل مدل و به تعادل رسیدن مدل در مرحله قبل، در این مرحله نوبت به حفر تونل می‌رسد. به این منظور ابتدا جابجایی‌ها و سرعت‌های ناشی از مرحله قبل خنثی و صفر شده و سپس با استفاده از دستور Null تونل که با نام گروه Tunnel تعریف شده است، حفر می‌شود. برای اعمال نگهداری تونل نیز خصوصیات بتن ۱ به دو گروه TunnelSupport و Rings اختصاص می‌یابد. به این ترتیب تا این مرحله تونل حفر شده و سیستم نگهداری آن نیز اعمال شده است. در انتها مدل توسط دستور Solve حل می‌شود.

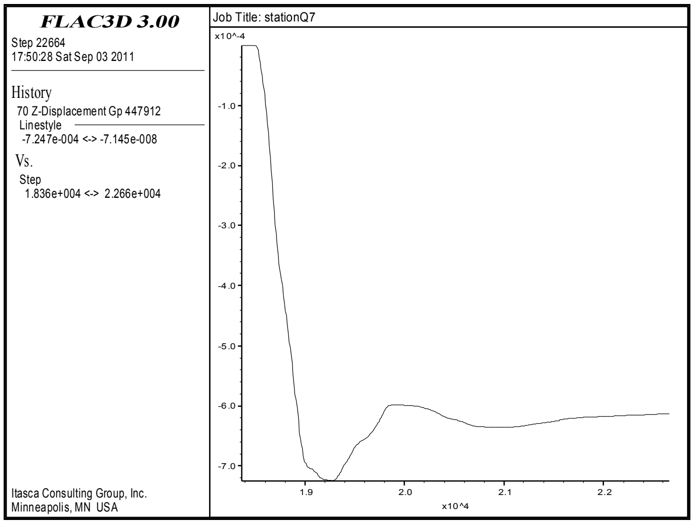
در این مرحله تحلیل نمی‌توان همانند ایستگاه‌های قبلی به اصلاح مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل پرداخت که دلیل آن عدم دسترسی به داده‌های واقعی نشست و جابجایی در سطح زمین ناشی از حفر تونل است. در نتیجه پس از حل مدل در این فاز، بدون هیچ‌گونه تغییر در پارامترهای اساسی مدل به تحلیل مدل در فاز چهارم پرداخته می‌شود.

فاز ۴: حفر ایستگاه

این مرحله به واقع مرحله نهایی تحلیل مدل ایستگاه Q7 به حساب می‌آید. در این مرحله با حل مدل پس از حفر ایستگاه و اعمال نگهداری‌های آن، میزان نشست و جابجایی در سطح زمین ناشی از حفر ایستگاه به دست خواهد آمد. به این منظور ابتدا برای آن‌که جابجایی‌ها و سرعت‌های ناشی از حفر تونل در مرحله قبل بر نتایج ما در این مرحله بی‌تأثیر باشند، سرعت‌ها و جابجایی‌ها صفر می‌شوند. سپس فضای داخلی ایستگاه که در مدل با نام گروه Station تعریف شده‌اند، حفر می‌شوند. علاوه بر آن بخشی از نگهداری تونل که در داخل ایستگاه واقع شده‌اند (TunnelSupport) نیز در این مرحله با استفاده از دستور Null از مدل حذف می‌شوند. پس از حفر فضای داخلی ایستگاه نوبت به اعمال سیستم‌های نگهداری ایستگاه می‌رسد. به همین منظور خصوصیات مصالح بتن ۲ به

نگهداری‌های اولیه و ثانویه ایستگاه اختصاص می‌یابند. سپس پس از تخصیص تاریخچه‌ها، مدل با استفاده از دستور Solve حل می‌شود.

پس از حل و به تعادل رسیدن مدل در این فاز می‌توان نتایج نهایی مدل‌سازی که همان میزان نشست در نقاط مرجع است را با استفاده از تاریخچه‌ها استخراج نمود. به عنوان مثال در شکل ۶-۱۵ میزان نشست در نقطه مرجع ۱ در محدوده این ایستگاه نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۵. میزان نشست در نقطه مرجع ۱ در ایستگاه Q7

به همین ترتیب سایر مقادیر نیز بدست آمده و در جدول ۵-۶ گزارش شده است.

جدول ۵-۶. میزان نشست در نقاط مرجع ایستگاه Q7

نقاط مرجع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
میزان نشست (mm)	-۰/۶	-۰/۳	-۰/۸	-۰/۴	-۰/۹	-۰/۳۵	-۰/۰۱۹	-۰/۰۲	-۰/۰۳	-۰/۰۴

۵-۶-۳. ارزیابی ریسک

در بخش قبل میزان نشست سطح زمین در ۱۰ نقطه مرجع بدست آمد. حال می‌توان با توجه به این مقادیر و رویکردی که در بخش ۳-۳ تشریح شد، به ارزیابی ریسک خسارات ساختمان‌ها در محدوده ایستگاه Q7 پرداخت. مشابه آن‌چه که در تحلیل‌های قبلی به آن اشاره شد، ارزیابی ریسک

خسارات ابتدا با ارزیابی مقدماتی ریسک خسارات آغاز می‌شود. در این مرحله مقادیر حداکثر نشست و حداکثر شیب نشست نقش اساسی را ایفا می‌کنند. این مقادیر طی محاسباتی که در تحلیل ایستگاه O7 به آن‌ها اشاره شد بدست آمده و در جدول ۵-۷ گزارش شده‌اند.

جدول ۵-۷. نتایج ارزیابی ریسک ساختمان‌ها در محدوده ایستگاه Q7

ساختمان‌ها	ساختمان ۱		ساختمان ۲		ساختمان ۳		ساختمان ۴		ساختمان ۵	
نقاط مرجع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
میزان نشست (mm)	-۰/۶	-۰/۳	-۰/۸	-۰/۴	-۰/۹	-۰/۳۵	-۰/۰۱۹	-۰/۰۲	-۰/۰۳	-۰/۰۴
شیب نشست (θ)	$\frac{0.01}{500}$		$\frac{0.013}{500}$		$\frac{0.017}{500}$		$\frac{0.0003}{500}$		$\frac{0.0003}{500}$	
رده خسارت	ناچیز		ناچیز		ناچیز		ناچیز		ناچیز	

بر اساس جدول ۵-۷، تمامی مقادیر بدست آمده برای حداکثر نشست کمتر از ۱۰ میلی‌متر و همه مقادیر حداکثر شیب نشست نیز کمتر از $\frac{1}{500}$ است، لذا ارزیابی ریسک در همین مرحله پایان یافته و میزان خسارت برای ساختمان‌های محدوده ایستگاه Q7 در رده ناچیز ارزیابی می‌شود.

۵-۷. جمع‌بندی

در این فصل با تکیه بر روش تفاضل محدود و با استفاده از نرم‌افزار Flac3D به تخمین و رده‌بندی خسارات ناشی از حفر و احداث ایستگاه‌های O7، P7 و Q7 خط ۷ مترو تهران پرداخته شد. به این منظور از رویکردی که در فصل ۴ به تفصیل بیان شد، بهره گرفته شده است. به سبب عدم دسترسی به داده‌های واقعی نشست ناشی از حفر ایستگاه‌ها، از داده‌های نشست ناشی از حفر تونل به منظور اصلاح و اعتبارسنجی مدل‌های ایجاد شده استفاده شد. در نهایت میزان ریسک خسارات وارد شده به ساختمان‌ها در محدوده هر سه ایستگاه در رده ناچیز و اندک ارزیابی شده و هرگز از این محدوده فراتر نمی‌رود. می‌توان از طراحی مناسب و مقاوم نگهداری ایستگاه‌ها به عنوان یکی از عوامل اندک بودن میزان این خسارات نام برد.

فصل ششم

نتایج و پیشنهادات

نتایج

- دو پدیده نشست و آسیب و ناپایداری سازه‌های سطحی از مهمترین اثرات جانبی ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری است که شناسایی، پیش‌بینی و کنترل آنها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

- علاوه بر جابجایی‌های قائم، جابجایی‌های افقی نیز نقش بسیاری در عوارض و پدیده‌های ناشی از نشست دارند و مطالعه آن‌ها نیز حائز اهمیت است.

- روش‌های پیش‌بینی پدیده نشست به عنوان پدیده عمده و مادر سایر پدیده‌های ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی در سه دسته تجربی، تحلیلی و عددی رده‌بندی می‌شوند. در به‌کارگیری دو روش اول باید توجه داشت که تمام شرایط مورد نیاز برای استفاده از روش و مدل، مورد توجه قرار گیرد.

- لازمه پیش‌بینی صحیح و دقیق آسیب‌ها و خسارات سازه‌های سطحی که ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی می‌باشد، درک درستی از وضعیت نشست در آن منطقه است. در تخمین خسارات سازه‌های سطحی دو پارامتر میزان کرنش کششی و اندرکنش خاک-سازه از اهمیت بالایی برخوردار است. از میان روش‌های ارائه شده برای ارزیابی ریسک خسارات سازه‌ها، روش بورلند ارجحیت بیشتری داشته و در صورت وجود تمام پارامترهای ورودی، نتایج خوبی ارائه خواهد کرد.

- با توجه به دو معیار روش احداث ایستگاه و تعداد طبقات ساختمان‌های سطحی، از میان ۸ ایستگاه فاز۱ خط ۷ مترو تهران، ۳ ایستگاه O7، P7 و Q7 به عنوان ایستگاه‌هایی که بیشترین ریسک خسارت ساختمان‌های سطحی برای آن‌ها وجود دارند انتخاب شدند تا در مراحل بعدی بطور دقیق مورد تحلیل قرار گیرند.

- با تکیه بر روش تفاضل محدود و با استفاده از نرم‌افزار Flac3D به تخمین و رده‌بندی خسارات ناشی از حفر و احداث ایستگاه‌های O7، P7 و Q7 خط ۷ مترو تهران پرداخته شد. به این منظور از رویکردی که در فصل ۳ به تفصیل بیان شد، بهره گرفته شده است. به سبب عدم دسترسی به داده‌های واقعی نشست ناشی از حف ایستگاه‌ها، از داده‌های نشست ناشی از حفر تونل به منظور اصلاح

و اعتبارسنجی مدل‌های ایجاد شده استفاده شد. در نهایت میزان ریسک خسارات وارد شده به ساختمان‌ها در محدوده هر سه ایستگاه در رده ناچیز و اندک ارزیابی شده و هرگز از این محدوده فراتر نمی‌رود. شاید بتوان از طراحی مناسب و مقاوم نگهداری ایستگاه‌ها به عنوان یکی از عوامل اندک بودن میزان این خسارات نام برد.

پیشنهادات

- همانطور که پیش‌تر گفته شد، میزان خسارات پیش‌بینی شده ساختمان‌ها برای همه ایستگاه‌های مورد مطالعه بسیار اندک است و در نتیجه ارائه تدابیر احتیاطی و راهکارهای کنترلی برای کاستن خسارات ضرورتی ندارد. اما در صورتی که اراده کارفرمایان و یا پیمانکاران پروژه بر به‌کارگیری ضرایب ایمنی بسیار بالا قرار گیرد، می‌توان با راهکارهایی همانند تزریق به بهسازی محدوده احداث ایستگاه‌ها و یا محدوده زیرین ساختمان‌ها پرداخت.

- با توجه به عدم دسترسی به داده‌های واقعی نشست ناشی از حفر ایستگاه‌ها، اعتبارسنجی مطالعات در این پایان‌نامه میسر نشد. اما می‌توان در آینده نزدیک و با در اختیار داشتن این داده‌ها و اعتبارسنجی مطالعات، کاستی‌های احتمالی را کاهش داده و بر غنا و دقت مطالعات افزود.

- با توجه به اینکه در صورت وجود پایگاه داده‌ای مناسب، روش‌های تجربی یکی از بهترین و ساده‌ترین روش‌های پیش‌بینی نشست است، می‌توان با تدوین و گردآوری یک پایگاه داده‌ای مناسب و توسعه روش تجربی متناسب با آن، راهکاری راهگشا برای تخمین نشست در محیط‌هایی با شرایط مشابه ایجاد نمود.

- بسته نرم‌افزاری GEO5 v12 ابزارهایی جهت پیش‌بینی نشست و برآورد خسارات ساختمان‌ها ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی ارائه می‌دهد. دو نرم‌افزار Settlement و Ground Loss از این مجموعه جهت دست‌یابی به اطلاعاتی اجمالی و کلی درباره وضعیت نشست ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی و تخمین میزان خسارت وارد شده به ساختمان‌ها به کار می‌روند. البته با توجه به بهره‌گیری از روش‌های تجربی به عنوان پایه نظری این نرم‌افزارها نمی‌توان از آن‌ها جهت مقاصد حساس و دقیق

استفاده نمود. لذا پیشنهاد می‌شود که در پروژه‌های تونل‌سازی در محیط‌های شهری از این نرم‌افزار جهت رسیدن به دیدی کلی و اجمالی از نشست و خسارت ساختمان‌ها در محدوده مورد نظر استفاده شود

فهرست منابع

فهرست منابع

[۱]. سعیدی کاخکی، سید حسن، (۱۳۷۸)، **"بررسی نشست ناشی از حفر تونل‌های کم عمق"، مطالعه موردی متروی تهران"**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی معدن، نفت و متالورژی .

[2]. Whittaker B.N. & Reddish D.J , (1989), **"subsidence occurrence prediction and control"** , Elsevier science publisher.

[۳]. عطایی، محمد، (۱۳۸۴) ، **"معدنکاری زیرزمینی"**، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

[4]. Brady B.h.g and Brown E.T, (1993), **"Rock Mechanics for undeground mining"**, Chapman and Hall Publisher.

[۵]. شریعتمداری نادر، (۱۳۸۰)، **"مطالعه‌ی نشست سطحی زمین بر اثر حفر تونل مترو"**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی عمران.

[۶]. شریعتمداری نادر و فرزانه اورنگ ، (۱۳۸۰) ، **"مطالعه‌ی نشست سطحی زمین بر اثر حفر تونل مترو"**، پنجمین کنفرانس تونل ایران، ص ۲۶۵-۲۷۶، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

[7]. Suwansawat S. , (2002), **"Earth Pressure Balance (EPB) Shield Tunneling in Bangkok: Ground Response and Prediction of Surface Settlements Using Artificial Neural Networks"**, Massachusetts Institute of Technology, PHD thesis.

[8]. O'Reily M.P and New, B.M, (1982), **"Settlements above tunnels in UK – Their magnitude and prediction"**, tunneling'82, London, pp.55-64.

[9]. Mair, R. J. and Taylor, R. N. (1997). **"Bore Tunneling in the Urban Environment"**, Theme Lecture, Plenary Session 4, Proc. 14' Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Vol. 4, pp. 2353-2385.

[10]. Franzius, J. N., (2003), PhD. thesis, **"Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence"**, Department of Civil and Environmental Engineering , Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.

[11]. Lake, L. M., Rankin, W. J., & Hawley, J. (1992), **"Prediction and effects of ground movements caused by tunnelling in soft ground beneath urban areas"**, CIRIA Funders Report , CP / 5.

[12]. Kimura, T. & Mair, R. J. (1981), **"Centrifugal testing of model tunnels in soft clay"**, 10th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1. Balkema, Rotterdam, pp. 319-322.

[13]. Mair, R. J., & Taylor, R. N., (1993), "**Prediction of clay behaviour around tunnels using plastic solutions**", Predictive Soil Mechanics, Proc. Wroth Memorial Symposium, Thomas Telford, London, pp. 449-463.

[14]. Grant, R.J., & Taylor, R.N, (2000), **"Tunnelling-induced ground movements in clay"**, Proc. Instn.Civ. Engrs. Geotech. Engineering, 143, pp. 43 – 55.

[15]. Lee, K. M., Rowe, R. K., and Lo, K. Y. (1992), **"Subsidence owing to tunnelling. I: Estimating the gap parameter"**, Canada, Geotech. J., 29, pp. 929–940.

[16]. Loganathan, N., and Poulos, H. G. (1998), **"Analytical prediction for tunneling induced ground movements in clays**", J. Geotech. And Geoenvir. Engrg. ASCE, 124(9), pp. 846–856.

[17]. Leca, E. , Nea, B. (2007), **"Settlement induced by tunneling in Soft Ground"** , Tunneling and Underground Space Technology, 22, pp 119-149

[18]. Moller, S.C. (2006), "**Tunnel induced Settlement and Structural forces in lining"** ph.D. thesis, University of Stuttgart, Institute of geotechnical engineering.

[19]. Mair, R. J., Taylor, R. N., & Burland, J. B., (1996) "**Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling"**, International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkema, Rotterdam, pp. 713-718.

[20]. Burland, J. B. (1995), **"Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation**", Invited Special Lecture. In: 1st Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engineering, Tokyo.

[21]. Frischmann, W.W., Hellings, J.E., Gittoes, S., & Snowden, C. (1994), **"Protection of the Mansion House against damage caused by ground movements due to the Docklands Light Railway Extension"**, *Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engineering*, 107, 65-76.

[22]. Geddes, J. D., (1991), "**Discussion on: Building response to excavation-induced settlement",** Journal of Geotech. Engineering, ASCE, 117(8), pp. 1276-1278.

[23]. Burland, J. B., & Wroth, C. P., (1974), "**Settlement of buildings and associated damage**", Conference `Settlement of structures'. Pentech Press, London, pp. 611-654.

[24]. Boscardin, M. D., & Cording, E. J. (1989), "**Building response to excavation-induced settlement**", Journal of Geotech. Engineering, ASCE, 115(1), pp. 1-21.

[۲۵]. **"گزارش عمومی اردیبهشت ۱۳۹۰ خط ۷ مترو تهران "، شرکت مهندسی سپاسد**

[26]. Huton, David , (2004) , "**Fundamental of Finite Element analysis**", McGrewhill pub.

[۲۷]. هوک، کیسر، بارون، (۱۳۸۰)،**"نگهداری حفریات زیرزمینی در سنگ‌های سخت"**، قارونی نیک، مرتضی، ابیازانی، مرتضی ، تهران؛ مؤسسه علمی فرهنگی نص، چاپ اول.

[۲۸]. مدنی، حسن، (۱۳۷۹)، **"تونل‌سازی"**، جلد سوم، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[29]. Sinha, R. S. (1989), **"Underground Structure design and instrument"**, University of Michigan, Published by Elsevier geosciences, London.

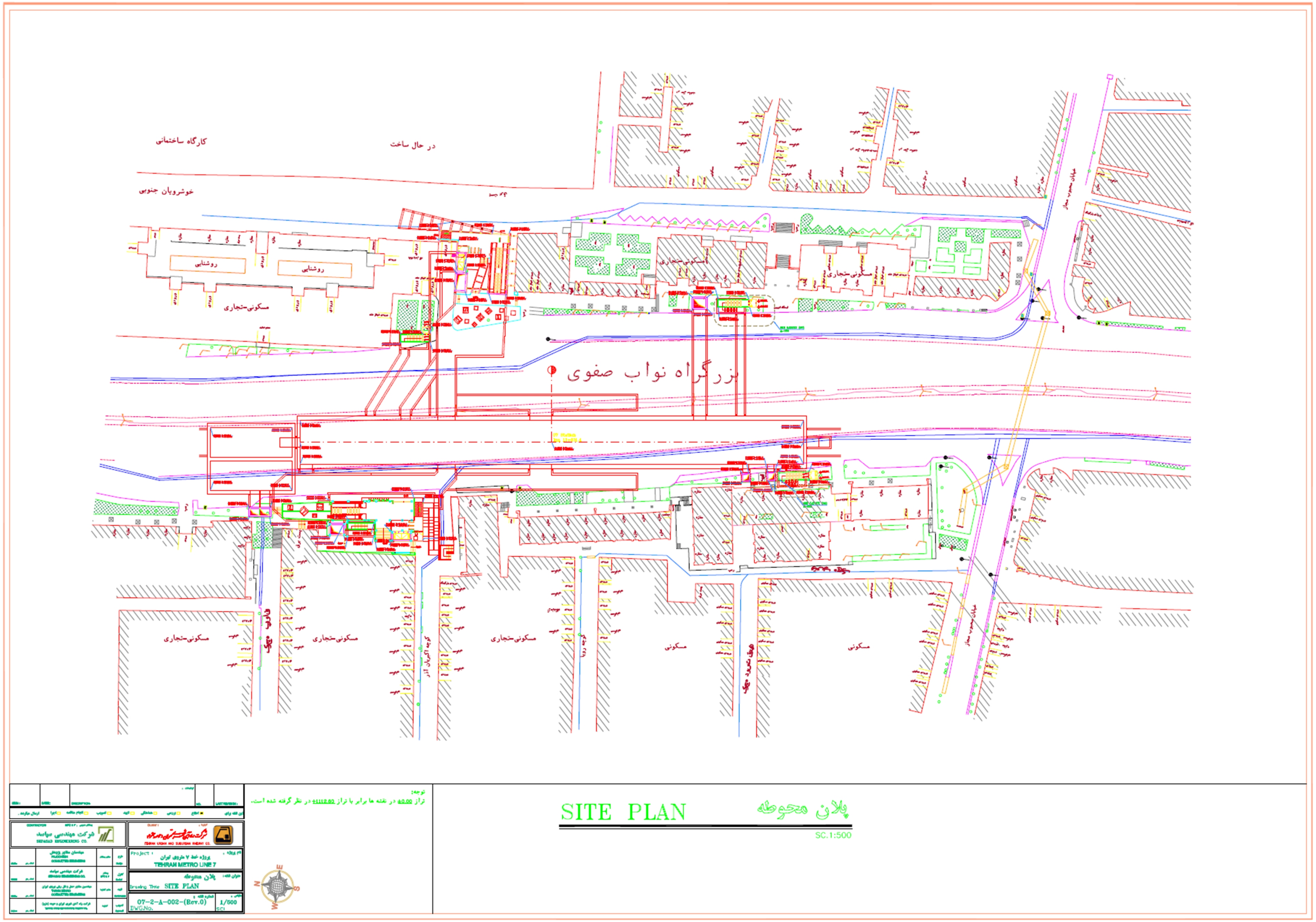
[30]. Itasca consulting group Inc, (2002), "**Flac3D User Manual**".

[۳۱]. **"گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک ایستگاه O7 "، شرکت مهندسی سپاسد**

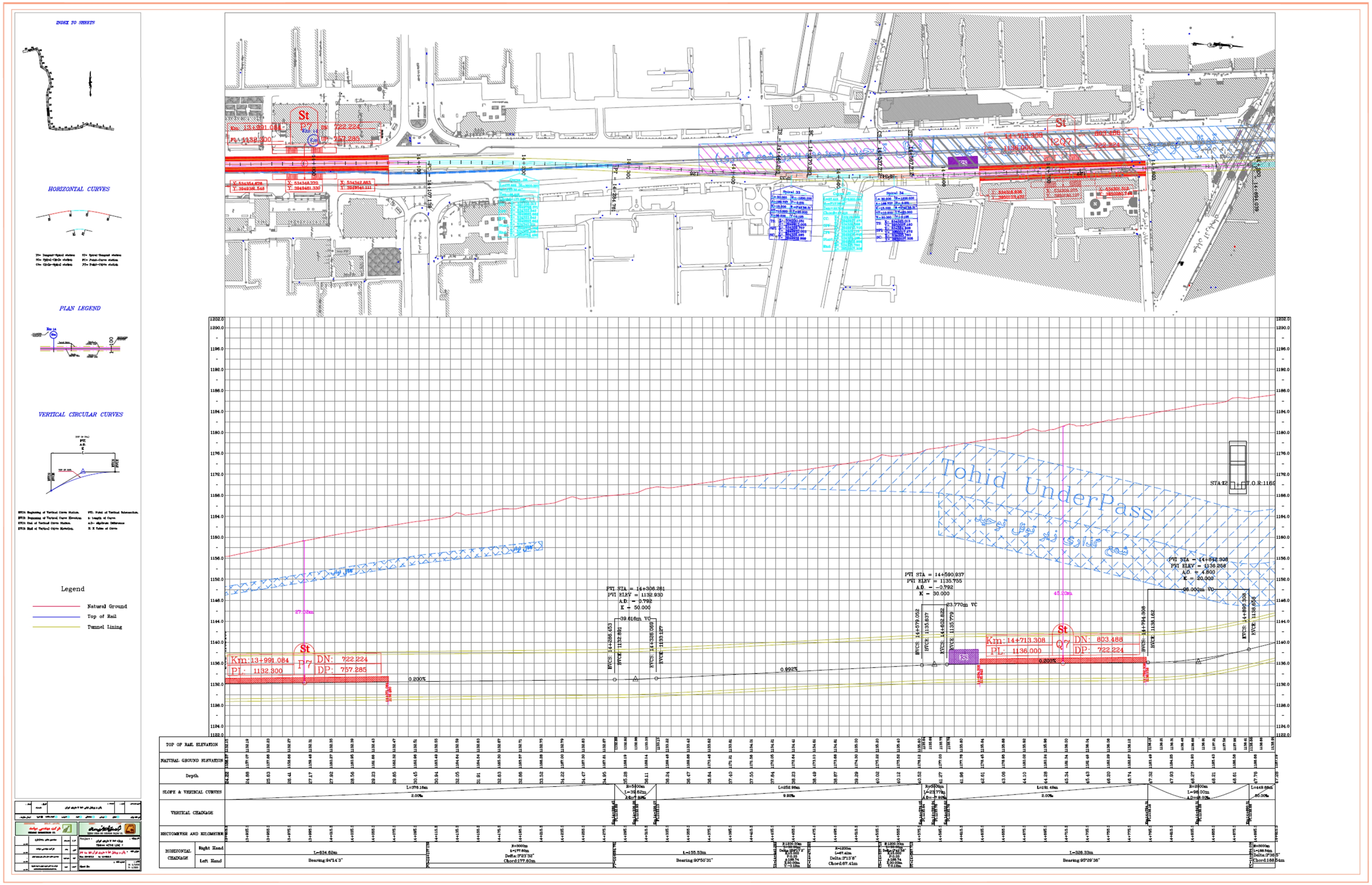
[۳۲]. **"گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک و مهندسی پی ایستگاه I2Q7 "، شرکت مهندسی سپاسد**

پیوست۱. نقشه شبکه ریلی شهر تهران

پیوست ۲. نقشه پلان ایستگاه O7



پیوست ۳.نقشه پلان و پروفایل دو ایستگاه P7 و Q7



Abstract

Besides numerous planning and executive challenges, underground excavation in urban areas always follows with some destructive effects especially on ground surface. Settlement and surface building damage are the most important of these effects. Thus, recognition of these effects and their ruling principles and then, estimation and controlling them are significant part of underground projects in urban areas.

Prediction of settlement values and surface building's damage induced by underground stations excavation in Tehran Metro, Line 7 are the purposes of this thesis. As the first step, settlement, its properties and different settlement prediction methods has been discussed. Then studding on damage estimation methods has been followed by presentation an standard approach for surface building damage estimation and classification. Between eight stations, located on phase 1, three of them which had more critical situations have been chosen for detailed studding. At the most important part, settlement values has been estimated through numerical modeling with $FLAC^{3D}$ software and then damage risk classification for surface buildings has been carried out. Finally the class of damage risk remained negligible and very slight for all buildings.

Keywords : settlement, building damage, Tehran Metro, $FLAC^{3D}$

Shahrood University of Technology

Faculty of Minning Engineering

Prediction of destructive effects of underground subway station; A case study: Tehran subway, line 7

Amir Khademian

Supervisors:

Dr M.Ataei
Dr F.Sereshki

Advisors:
Dr S.M.E.Jalali
M.R.Bitarafan

September 2011