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

Scanned with CamScanner

Scanned with CamScanner

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

Scanned with CamScanner

تقدیم به :

پدرم، که آسمان نیلی قلب پر مهرش بی‌افق

و

مادرم، که دریای عمیق محبت و ایثارش بی ساحل است

Scanned with CamScanner

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.

Scanned with CamScanner

چکیده

حفر فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری علاوه برچالش‌های مهندسی و اجرایی فراوان، همواره مخاطراتی را از لحاظ اثرات مخرب ناشی از حفر این فضاها به‌خصوص در سطح زمین به دنبال دارد. مهمترین این اثرات شامل پدیده نشست سطح زمین و آسیب و ناپایداری سازه‌های سطحی مانند ساختمان‌ها، برج ها می‌شود. از این‌رو شناسایی این پدیده‌ها و قوانین حاکم بر آنها و به دنبال آن پیش‌بینی و کنترل آنها بخش مهمی از طراحی پروژه‌های زیرزمینی در محیط شهری را به خود 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 شده و سپس به تفصیل به معرفی روش‌های مختلف پیش‌بینی میزان نشست پرداخته شده است. 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 بخش حاصل شده است، ارائه رویکردی استاندارد و مشخص برای برآورد و رده‌بندی خسارات ساختمان‌های سطحی است. سپس از طریق مطالعه مقدماتی ریسک خسارات، ایستگاه‌هایی که وضعیت بحرانی‌تری داشته انتخاب و مطالعات بعدی 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 است. در انتها مشخص گردید که رده خسارتی تمامی این ساختمان‌ها در محدوده ناچیز و اندک طبقه‌بندی می‌شود.

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

Scanned with CamScanner

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

Scanned with CamScanner

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

Scanned with CamScanner

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

Scanned with CamScanner

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 $\Delta/B\varepsilon_{cri}$ و B/H برای یک تیر مستطیلی تغییرشکل یافته تحت خمش و برش. تار خنثی در وسط قرار گرفته است ۵۹

Scanned with CamScanner

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

Scanned with CamScanner

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 ایستگاه Q7 ..... 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

Scanned with CamScanner

فصل اول

مقدمه

Scanned with CamScanner

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.

Scanned with CamScanner

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.

Scanned with CamScanner

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

Scanned with CamScanner

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.

Scanned with CamScanner

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.

Scanned with CamScanner

فصل دوم

نشست و روش‌های پیش‌بینی آن

Scanned with CamScanner

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

Scanned with CamScanner

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

Scanned with CamScanner

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.

Scanned with CamScanner

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]:

Scanned with CamScanner

- 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 :

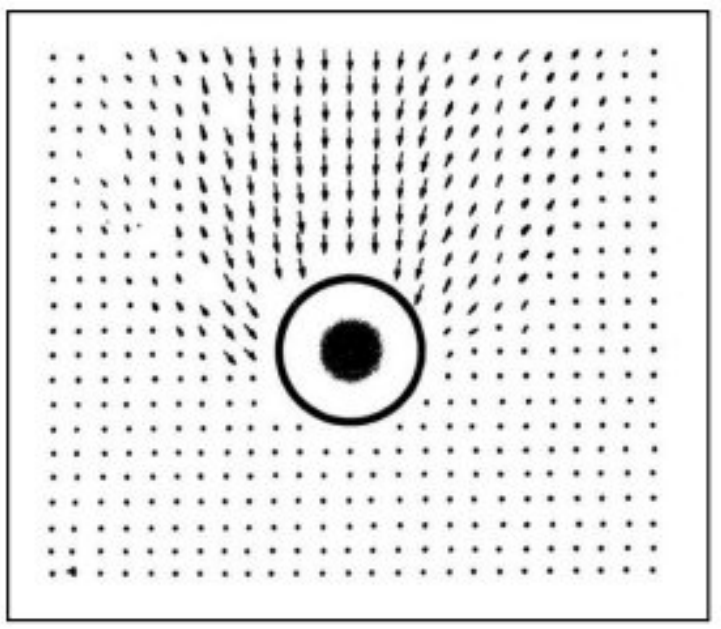
- اثرات تراکم دینامیکی ناشی از سربار ترافیک روی لایه‌های سست شده زمین
- بالا و پایین رفتن متناوب سطح آب زیرزمینی
- آزاد شدن و خروج هوای فشرده از محوطه کارگاه، در مواردی که از این روش برای پایداری دیواره‌ها و سینه‌کار و جلوگیری از ورود آب استفاده شود.

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

Scanned with CamScanner

۲-۱ حالت تیپیک جابه‌جایی ذرات در بالا و دیواره‌های تونل، پس از آن که تونل از نقطه مورد 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 کم به مقدار نهایی ثابت آن، افزایش می‌یابد. عوامل مؤثر بر پایداری جبهه‌کار تونل مشتمل بر خصوصیات مکانیکی، فیزیکی، 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 به سیستم نگهداری موقت ویژه می‌باشد. خصوصیت عمومی این زمین‌ها این است که اگر از سیستم نگهداری موقت مناسبی استفاده نشود، سقف تونل ریزش خواهد کرد. حتی در بعضی موارد با وجود

Scanned with CamScanner

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.

Scanned with CamScanner

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.

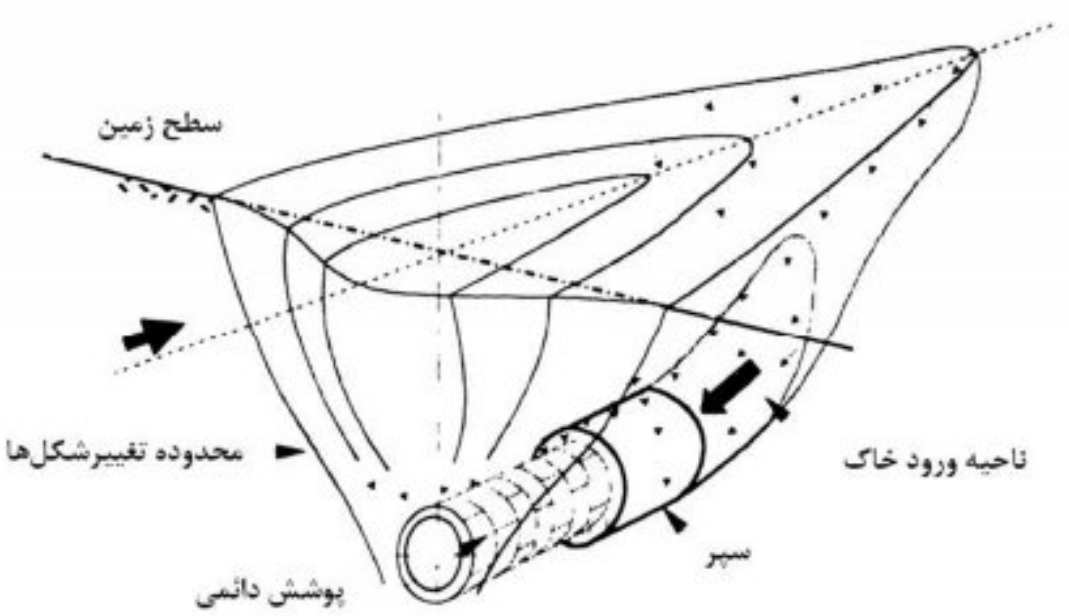
۲-۶. روش‌های پیش‌بینی نشست

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

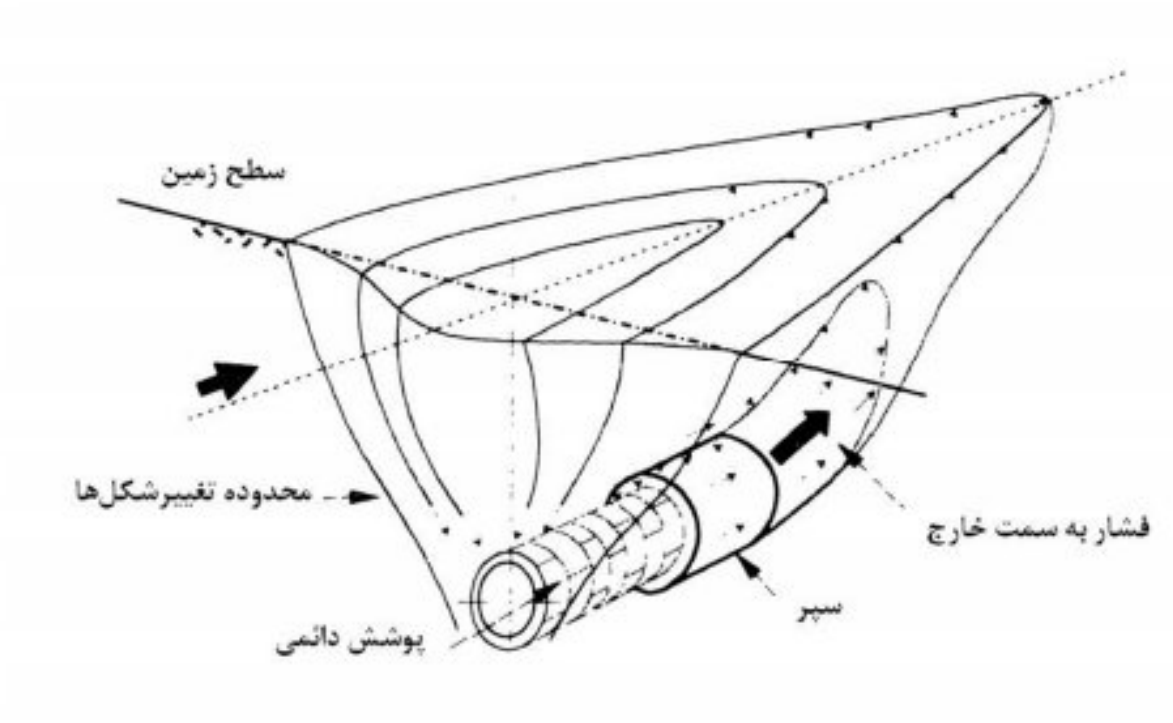
Scanned with CamScanner

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]

Scanned with CamScanner

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، *آتوِل*[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. وِرویجت[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

Scanned with CamScanner

لگانازان[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

Scanned with CamScanner

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.

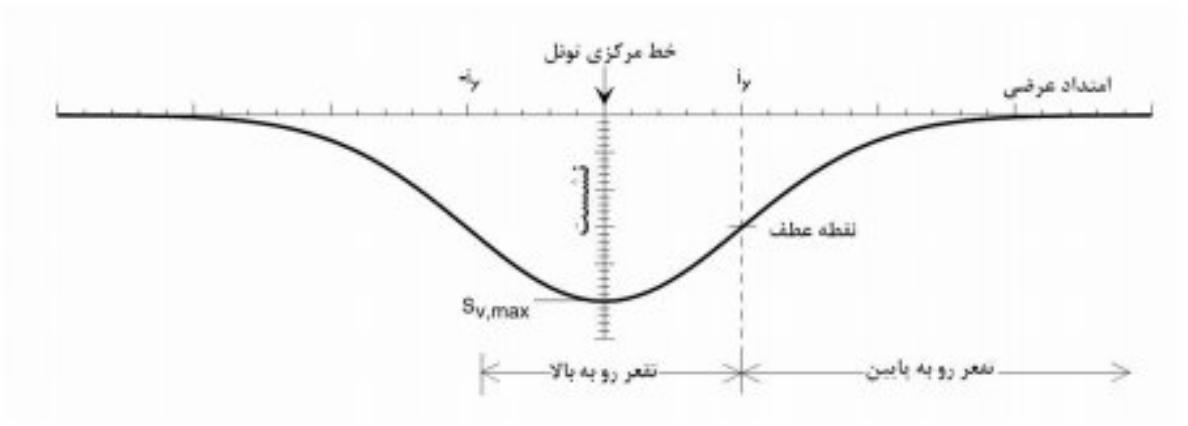
ناحیه زیر تابع خطای گوس بنا به تعریف این تابع برابر یک می‌باشد که در واقع میزان احتمال آن است که متغیر x مقداری بین ∞- و ∞+ را داشته باشد. با این حال پارامترهای $S_{v\ max}$ و i_y در تابع بالا از نظر ریاضی مستقل هستند. درنتیجه ناحیه محصور به گودی نشست می‌تواند مقداری به صورت زیر داشته باشد:

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

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

[1] Sagging zone
[2] Hogging zone

Scanned with CamScanner



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:

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

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:

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

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:

Scanned with CamScanner

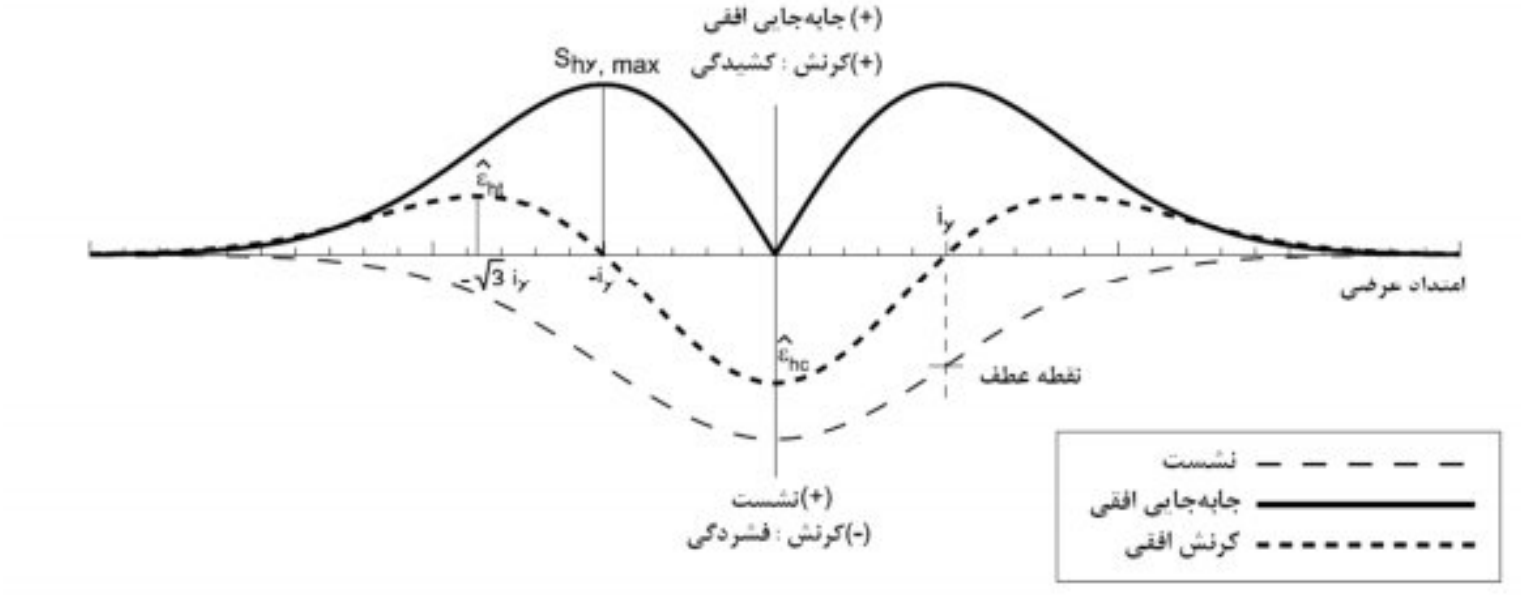
$$S_{hy}(x) = -\frac{yS_V(y)}{z_0} \qquad (۵-۲)$$

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]

Scanned with CamScanner

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:

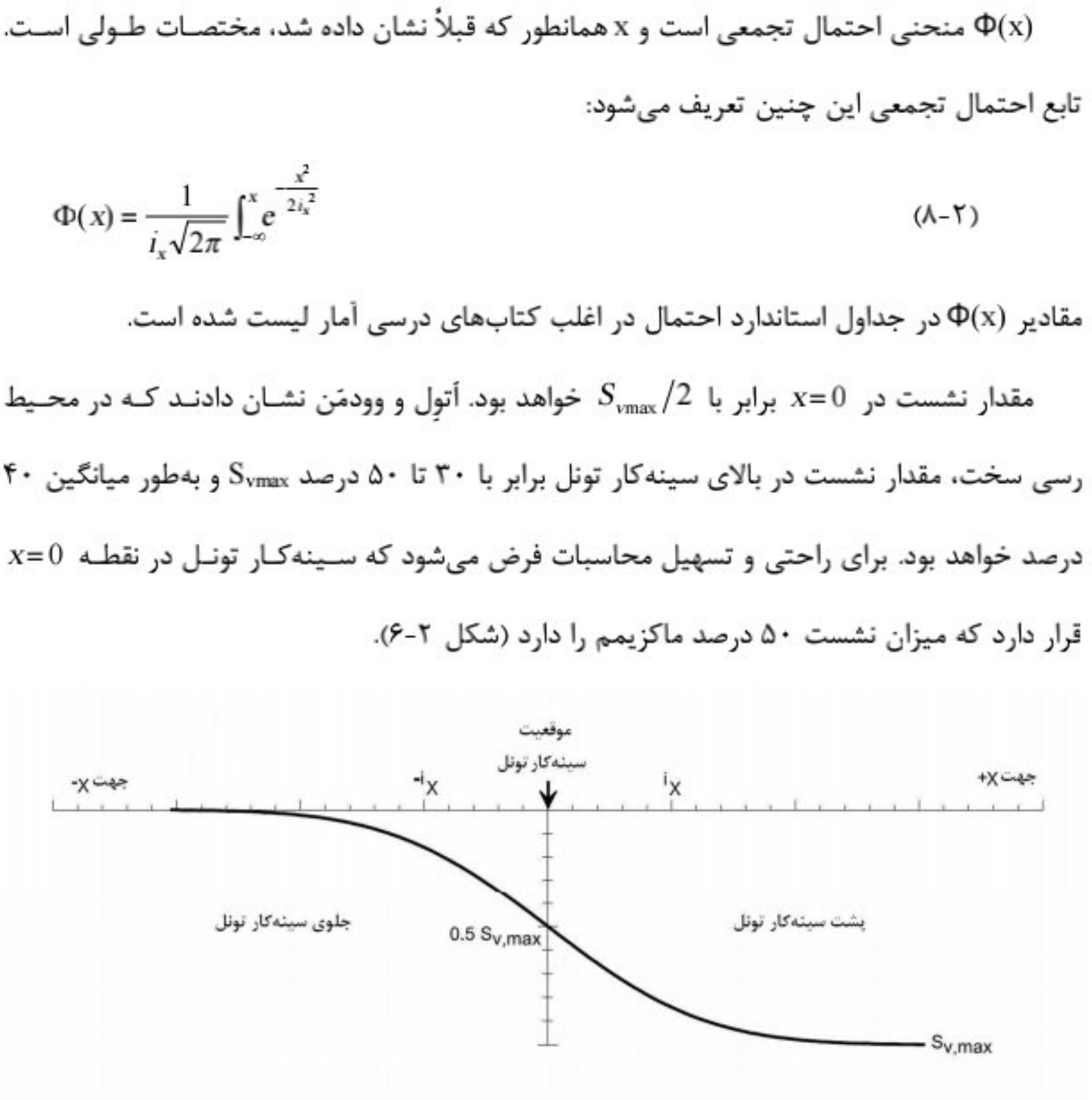
$$S_V(x)_{y=0} = S_{v,\max}\Phi\left(\frac{x}{i}\right) \qquad (۷-۲)$$

$\Phi(x)$ 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 $S_{vmax}/2$ 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_{vmax} 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]

Scanned with CamScanner

عرض مقطع نشست طولی به صورت i_x تعریف می‌شود. اغلب فرض می‌شود که $i_x = i_y$. آتول 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، آتول 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:

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

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

Scanned with CamScanner

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، آتِوِل 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. آتِوِل 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

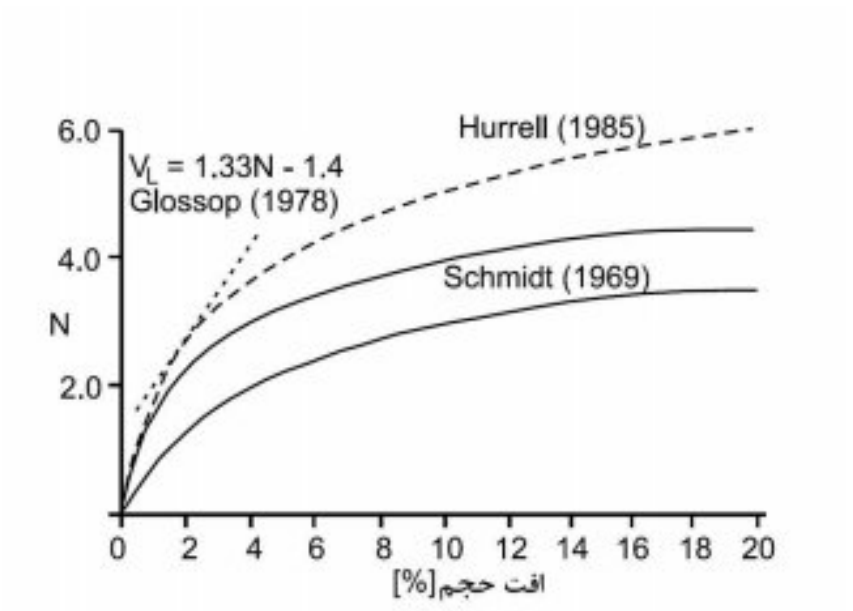
Scanned with CamScanner

- 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 *برامز*[1] و *بنیرمارک*[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 ($\sigma_t=0$) *میر* و *تیلور* 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. *لیک*[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

Scanned with CamScanner