بسم الله الرحمن الرحيم

٩٣٩٥٥

دانشگاه شیراز

دانشکده مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران (مکانیک خاک و پی)

تأثیر توأم احداث تونل کم عمق و پایین آمدن تراز آب زیر زمینی بر نشست سطح زمین

توسط

محمّد حسین شفیعی

۱۳۸۷/۳/۲۳

استاد راهنما:

دکتر نادر هاتف

مهرماه ۱۳۸۶

۹۳۹۸۵

به نام خدا

تأثیر توأم احداث تونل کم عمق و پایین آمدن تراز آب زیر زمینی بر نشست سطح زمین

بوسیله ی:

محمّدحسین شفیعی

پایان نامه ارائه شده به معاونت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته ی:

مهندسی عمران

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه : **عالی**

دکتر نادر هاتف، استاد بخش عمران(رئیس کمیته):.....

دکتر ارسلان قهرمانی، استاد بخش عمران.....

دکتر قاسم حبیب آگهی، استاد بخش عمران.....

دکتر مجتبی جهان اندیش، استادیار بخش مهندسی عمران.....

دکتر غلامرضا رخشنده رو، دانشیار بخش مهندسی عمران.....

مهرماه ۱۳۸۶

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که در تمامی مراحل زندگی همچون دماوند، استوار و سربلند پشتیبان و حامی من بودند و تمام کسانی که دوستشان دارم.

سپاسگذاری

اکنون که این پایان نامه به پایان رسیده است بر خود لازم می دانم که در ابتدا خداوند منّان را شاکر باشم که بدون توجّه او انجام هیچ کاری میسّر نیست، سپس از زحمات استاد عزیزم دکتر نادر هاتف که در انجام این پایان نامه به حق فراتر از وظیفه استادی و همانند یک دوست، همراه من بودند کمال تشکر را داشته باشم و همچنین از زحمات اساتید گرانقدر مشاورم آقایان دکتر ارسلان قهرمانی، دکتر قاسم حبیب آگهی، دکتر مجتبی جهان اندیش و دکتر غلامرضا رخشنده رو قدردانی کنم.

چکیده

تأثیر توأم احداث تونل کم عمق و پایین آمدن تراز آب زیر زمینی بر نشست سطح زمین

بوسیله ی:

محمّد حسین شفیعی

احداث تونل کم عمق در نواحی شهری، همواره توأم با مخاطراتی است که نادیده گرفتن آنها می تواند عواقب نا خوشایندی را در بر داشته باشد. از مهمترین این مخاطرات مسأله نشست سطح زمین و تأثیر آن بر سازه های مجاور می باشد. برای برآورد میزان نشست سطح زمین، استفاده از شیوه های تحلیلی و عددی قبل از عملیات ساخت، ضروری به نظر می رسد. حال عوامل دیگری مانند پایین آمدن تراز آب زیر زمینی نیز ممکن است همزمان یا پس از احداث مترو، باعث شدیدتر شدن این مسأله شود و باید مدّ نظر قرار گیرد.

در این تحقیق تأثیر توأم پایین آمدن تراز آب زیر زمینی، ناشی از احداث زهکش، و احداث تونل کم عمق بر نشست سطح زمین در محل برخورد مترو شیراز و زهکش این شهر با روش عناصر محدود و توسّط نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بدست آمده با روشهای تجربی و عددی دیگر کنترل شد. نشست ناشی از احداث مترو شیراز در حدّ مجاز بود و نشست ناشی از پایین آمدن تراز آب زیر زمینی بیشتر از نشست مجاز بدست آمد و بنابراین باید روشهایی برای کنترل نشست بوجود آمده ناشی از پایین آمدن تراز آب زیر زمینی بکار گرفته شود.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱
فصل دوم : پیشینه تحقیق: ۴
۲-۱- نشست سطح زمین در اثر حفر تونلهای کم عمق: ۵
۲-۱-۱- روش Peck: ۷
۲-۱-۲- روش Oteo: ۱۰
۲-۱-۳- روش Sagaseta: ۱۰
۲-۱-۴- روش Verruijt-Booker: ۱۱
۲-۱-۵- روش Polous و Loganthan: ۱۲
۲-۲- تصدیق صحیح بودن روش Loganthan و Polous در تخمین نشست: ۱۴
۲-۲-۱- مترو Taipei: ۱۴
۲-۲-۲- مترو تبریز: ۱۶
۲-۳- نشست سطح زمین در راستای طولی محور تونل: ۱۹
۲-۳-۱- مساله نشست در مترو سانتیاگو اسپانیا: ۲۰
۲-۴- نشست سطح زمین در اثر پایین آمدن تراز آب زیر زمینی: ۲۶
۲-۴-۱- محاسبه نشست سطح زمین با استفاده از معادله حاکم بر جریان: ۲۶
۲-۴-۲- محاسبه نشست سطح زمین بوسیله فرمول بندی اجزاء محدود: ۲۸
فصل سوم: روش انجام تحقیق ۳۰
۳-۱- کلیات: ۳۱
۳-۲- تاثیر تغییر پارامترها: ۳۱
۳-۲-۱- پارامتر وزن واحد حجم: ۳۳
۳-۲-۲- تغییرات مدول الاستیسیته خاک: ۳۵
۳-۲-۳- تغییرات چسبندگی خاک: ۳۶
۳-۲-۴- تغییرات ضریب پواسن خاک: ۳۷
۳-۲-۵- تغییرات زاویه اصطکاک خاک: ۳۹
۳-۲-۶- تغییرات قطر تونل: ۴۰
۳-۲-۷- مدول الاستیسیته پوشش: ۴۱

عنوان صفحـــه

۳-۲-۸- تغییرات ضخامت پوشش تونل: ۴۳
۳-۲-۹- تغییر عمق تونل: ۴۴
۳-۳- جمع بندی: ۴۵
فصل چهارم:مدل مترو و زهکش شیراز ۴۷
۴- ۱- کلیات : ۴۸
۴-۱-۱- مختصری در باره زمین شناسی شهر شیراز: ۴۸
۴-۱-۲- متروی شیراز: ۴۸
۴-۱-۳- وضع کلی محل مورد مطالعه: ۵۵
۴-۱-۳-۱- لایه بندی: ۵۵
۴-۱-۳-۲- پارامترهای ژئو تکنیکی: ۵۶
۴-۲- مشخصات هندسی و مقاومتی مترو: ۵۶
۴-۳- مشخصات زهکش شیراز ۵۷
۴-۳-۱- شکل و ابعاد زهکشها: ۵۸
۴-۴- مدلسازی ناحیه مورد مطالعه: ۶۰
۴-۴-۱- تعیین سطح ایستایی آب پس از عملکرد زهکش: ۶۱
۴-۴-۲- مدل مترو شیراز در برنامه PLAXIS 3D TUNNEL: ۶۷
۴-۴-۳- مدل زهکش شیراز در برنامه PLAXIS 3D TUNNEL: ۷۲
فصل پنجم: آنالیز نتایج بدست آمده: ۷۷
۵ -۱- بررسی نتایج مربوط به مدل مترو: ۷۸
۵-۲- بررسی نتایج مربوط به مدل زهکش: ۸۲
۵-۳- محاسبه تغییر شکل قائم سطح زمین در اثر احداث متروی شیراز به روش تحلیلی: ۸۶
۵-۴- نشست زمین در اثر پایین آمدن تراز آب با استفاده از تئوری تحکیم بایوت: ۸۹
فصل ششم: جمع بندی نتایج و پیشنهادات ۹۲
مراجع: ۹۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل(۲-۱)- نمودار تغییراتN نسبت به $\frac{C}{D}$ ۶
شکل(۲-۲)- شکل شماتیک توزیع عرضی نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل کم عمق ۸
شکل(۲-۳)- مقایسه پروفیل عرضی نشست سطح در اثر تونلسازی زمین با i های مختلف ۱۰
شکل(۲-۴)- عوامل مسبب نشست سطح زمین ناشی از تونلسازی ۱۲
شکل(۲-۵)- توزیع عرضی نشست در Taipei ۱۵
شکل(۲-۶)- توزیع نشست در عمق در Taipei ۱۵
شکل(۲-۷)- پروفیل نشست سطحی در اثر احداث متروی تبریز با تزریق و بدون تزریق ۱۷
شکل(۲-۸)- تاثیر تحلیل پارامتری ضریب تصحیح تزریق برای تونل در عمق ۲۱ متری ۱۸
شکل(۲-۹)- تغییرات ماکزیمم نشست سطحی با عمق ۱۸
شکل(۲-۱۰)- نشست سطح زمین در راستای طولی تونل ۱۹
شکل(۲-۱۱)- منحنی دانه بندی خاک سانتیاگو ۲۱
شکل(۲-۱۲)- مشخصات تونل مورد مطالعه در سانتیاگو ۲۳
شکل(۲-۱۳)- مشخصات تونل مورد مطالعه در سانتیاگو ۲۴
شکل(۲-۱۴)- نشست زمین در اثر حرکت جبهه کار تونل قبل و بعداز نقاط کنترل ۲۵
شکل(۲-۱۵)- پروفیل عرضی نشست سطح زمین در اثر حفر مترو در Santiago ۲۵
شکل(۳-۱)- نشست سطح زمین پس از تونلسازی در مدل آزمایشی ۳۲
شکل(۳-۲)- نشست زمین پس ازپایین انداختن تراز آب زیر زمینی در مدل آزمایشی ۳۳
شکل(۳-۳)- تاثیر تغییر وزن مخصوص بر نشست سطح زمین ۳۴
شکل(۳-۴)- تاثیر تغییر مدول الاستیسیته خاک بر نشست سطح زمین ۳۶
شکل(۳-۵)- تاثیر تغییر چسبندگی خاک بر نشست سطح زمین ۳۷
شکل(۳-۶)- تاثیر تغییر ضریب پواسن خاک بر نشست سطح زمین ۳۸
شکل(۳-۷)- تاثیر تغییر زاویه اصطکاک خاک بر نشست سطح زمین ۳۹
شکل(۳-۸)- تاثیر تغییر قطر تونل بر نشست سطح زمین ۴۱
شکل(۳-۹)- تاثیر تغییر مدول الاستیسیته پوشش تونل بر نشست سطح زمین ۴۲

عنوان صفحه

شکل(۳-۱۰)- تاثیر تغییر ضخامت پوشش تونل بر نشست سطح زمین ۴۳
شکل(۳-۱۱)- تاثیر تغییر عمق تونل بر نشست سطح زمین ۴۵
شکل (۴-۱)- پلان مسیر شماره ۱ متروی شیراز..... ۵۰
شکل (۴-۲)- پلان مسیر شماره ۲ متروی شیراز..... ۵۱
شکل (۴-۳)- پلان مسیر شماره ۳ مترو شیراز ۵۱
شکل (۴-۴)- مشخصات نحوه اجرای متروی شیراز(روش کند و پوش)..... ۵۲
شکل (۴-۵)- نحوه قرار گیری تونلهای دوقلوی متروی شیراز(روشTBM) ۵۳
شکل (۴-۶)- دستگاه TBM استفاده شده در ساخت متروی شیراز..... ۵۳
شکل (۴-۷)- مقطع زهکشهای اصلی در محل پودنک ۵۸
شکل (۴-۸)- نحوه قرارگیری فیلتر و دانه بندی فیلتر زهکش..... ۵۹
شکل (۴-۹)- پایین آمدن تراز آب پس از احداث زهکش در نرم افزار SEEP/W ۶۳
شکل (۴-۱۰)- افت هد بدست آمده از MODFLOW ناشی از احداث زهکش.....۶۴
شکل (۴-۱۱)- افت هد بدست آمده از نرم افزار MODFLOW ناشی از احداث زهکش ۶۶
شکل (۴-۱۲)- افت هد بدست آمده از دو نرم افزار MODFLOW و SEEP/W ۶۶
شکل (۴-۱۳)-شکل سه بعدی مدل ساخته شده متروی شیراز در محدوده مورد مطالعه ۶۷
شکل (۴-۱۴)-نحوه مدل کردن قنات زهکش در مدل متروی شیراز.....۶۸
شکل (۴-۱۵)- تغییر شکل قائم سطح زمین ناشی از تونلسازی ۷۰
شکل (۴-۱۶)- پروفیل عرضی نشست زمین در اثر تونلسازی در محل برخورد ۷۰
شکل (۴-۱۷)-نحوه نشست زمین محدوده مورد مطالعه پس از پایین آمدن تراز آب..... ۷۱
شکل (۴-۱۸)- پروفیل عرضی تغییر شکل قائم سطح زمین در محل برخورد مترو با زهکش شیراز ۷۲
شکل (۴-۱۹)- مقطع استفاده شده زهکش در مدل..... ۷۳
شکل (۴-۲۰)- شمای سه بعدی از مدل ساخته شده برای زهکش شیراز ۷۴
شکل (۴-۲۱)- نحوه پایین انداختن تراز آب زیر زمینی در مدل زهکش ۷۴
شکل (۴-۲۲)- تغییر شکل قائم سطح زمین پس از تونلسازی در مدل زهکش ۷۵
شکل (۴-۲۳)- شکل نشست زمین درمحل تقاطع زهکش و مترو درمدل زهکش ۷۵
شکل (۴-۲۴)- نشست زمین عمود بر محور طولی مترو پس از پایین آمدن تراز آب ۷۶
شکل (۴-۲۵)- نشست زمین در راستای محور طولی مترو پس از پایین آمدن تراز آب ۷۶
شکل(۵-۱) - پروفیل عرضی تغییر شکل قائم سطح زمین پس از تونلسازی ۸۰

عنوان

صفحه

شکل (۵-۲)- پروفیل عرضی نشست زمین پس از پایین آمدن تراز آب ۸۱
شکل (۵-۳)- پروفیل عرضی نشست زمین فقط ناشی از پایین آمدن تراز آب ۸۲
شکل (۵-۴)- پروفیل طولی نشست زمین پس از تونلسازی ۸۴
شکل(۵-۵)- پروفیل طولی نشست زمین پس از پایین آمدن تراز آب..... ۸۵
شکل(۵- ۶)- پروفیل طولی نشست زمین فقط ناشی از پایین آمدن تراز آب ۸۵
شکل(۵-۷)- پروفیل عرضی نشست زمین ناشی از احداث مترو از روش تحلیلی و عددی..... ۸۸
شکل(۵-۸)- پروفیل عرضی تغییر شکل قائم سطح زمین ناشی از پایین آمدن تراز آب زیرزمینی .. ۹۱
شکل (۶-۱):میزان تاثیر تغییر پارامترهای مختلف بر نشست زمین ناشی از احداث مترو..... ۹۴
شکل (۶-۲): میزان تاثیر تغییر پارامترهای مختلف بر نشست ناشی از پایین آمدن تراز آب زیر زمینی..... ۹۴

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱)- روابط ارائه شده جهت محاسبه i ۹
جدول (۲-۲)- مشخصات زمین شناسی تبریز ۱۷
جدول(۲-۳)- پارامترهای مورد استفاده در FESOILS جهت محاسبه نشست ۲۴
جدول (۳-۱)- تغییرات نشست سطح زمین در اثر تغییرات وزن مخصوص ۳۴
جدول (۳-۲)- تغییرات نشست سطح زمین در اثر تغییرات مدول الاستیسیته خاک ۳۵
جدول (۳-۳)- تغییرات نشست سطح زمین در اثر تغییرات چسبندگی خاک ۳۷
جدول (۳-۴)- تغییرات نشست سطح زمین در اثر تغییرات ضریب پواسن خاک ۳۸
جدول (۳-۵)- تغییرات نشست سطح زمین در اثر تغییرات زاویه اصطکاک خاک ۳۹
جدول (۳-۶)- تغییرات نشست سطح زمین در اثر تغییرات قطر تونل ۴۰
جدول (۳-۷)- تغییرات نشست سطح زمین در اثر تغییرات مدول الاستیسیته پوشش تونل ۴۲
جدول (۳-۸)- تغییرات نشست سطح زمین در اثر تغییرات ضخامت پوشش تونل ۴۳
جدول (۳-۹)- تغییرات نشست سطح زمین در اثر تغییرات عمق تونل ۴۵
جدول (۴-۱)- موقعیت ایستگاههای مسیر ۱ متروی شیراز ۵۴
جدول (۴-۲)- مشخصات سه زهکش خاتون، زندان و چوگان در دشت شیراز ۵۷
جدول (۴-۳)- لایه بندی استخراج شده ازگمانه BHA10 ..... ۶۱
جدول (۴-۴)- لایه بندی استخراج شده ازگمانه BHA11 ..... ۶۱
جدول (۴-۵)- تراز کف تونل، سطح زمین و عمق تونل در ناحیه مورد مطالعه ۶۲
جدول (۴-۶)- میزان افت هد بدست آمده از SEEP/W ۶۳
جدول (۴-۷)- میزان افت هد بدست آمده از MODFLOW ۶۵
جدول (۵-۱)- تغییر شکل قائم سطح زمین در راستای عمود بر محور طولی متروی شیراز ۷۹
جدول (۵-۲)- تغییر شکل قائم سطح زمین در راستای محور طولی متروی شیراز ۸۳
جدول (۵-۳)- تغییر شکل قائم سطح زمین ناشی از احداث مترو با استفاده از روش تحلیلی ۸۷
جدول (۵-۴)- مقایسه نتایج روش تحلیلی و عددی ۸۸
جدول (۵-۵)- مقایسه نتایج PLAXIS و SAC-2 ..... ۹۰

فصل اول

مقدّمه

کنترل نشست سطح زمین همواره و در بیشترپروژه های عمرانی مدّ نظر مهندسان طراح و مشاور بوده و از اهمیت بالایی برخوردار است. در مورد حفر تونلهای کم عمق نیز این مسأله به دلیل سست شدن توده خاک، صادق است. اما نگرانی زمانی دو چندان می شود که در حفر تونل به لایه آبدار برخورد شود. در این صورت باید تراز آب در آن منطقه یا بصورت موقتی و یا بصورت دائمی و با احداث شبکه زهکش پایین انداخته شود. اگر تراز آب بصورت دائمی پایین انداخته شود نشست زمین بدلیل کاهش یافتن فشار آب حفره ای و تبدیل شدن تمام تنش به تنش موثر اتفاق می افتد. اگر بصورت موضعی این عمل صورت پذیرد مشکلاتی همچون عمل نمودن خود تونل به عنوان زهکش و یا شکل گیری و آرایش مجدد دانه های رس (در لایه های رسی) بر اثر بالا آمدن دوباره تراز آب زیر زمینی بوجود می آید. این عوامل باعث نشست زمین می شود و در نهایت قسمتی و یا تمام این نشستها به سطح زمین منتقل می شود و مشکلاتی را برای سازه های واقع در سطح زمین بوجود می آورد.[۱]

بطور کلی حفر تونل و دیگر سازه های زیر زمینی منجر به حذف توده ای از خاک و سنگ محل، و بروز تغییرات قابل توجه در وضعیت تنش اطراف آنها می گردد. حرکات سطحی بر اثر حفر تونلهای کم عمق و بخصوص در مناطق شهری ومسکونی تفاوت زیادی با بروز این پدیده در تونلها و سازه های زیر زمینی عمیق از قبیل معادن دارد. این تفاوت نه تنها بخاطر اختلافات در عمق و وجود لایه های مختلف زمین شناسی، بلکه بخاطر حساسیت نسبت به میزان تغییر شکل قائم سطح زمین و اثرات احتمالی بر سازه های دیگر قابل توجه و بررسی است.

با توجه به آخرین بررسی های به عمل آمده عوامل موثر نشست سطح زمین در بالای یک تونل حفر شده را می توان به شرح زیر ذکر کرد:

۱- نشست طبیعی رسوبات جوان.

۲- شکل گیری و آرایش مجدد رس در اثر حفر تونل که باعث بروز سیکل جدید تحکیم در رس می گردد.

۳- پایین بردن سطح آب زیر زمینی از طریق حفر و احداث شبکه زهکش.

۴- شکل گیری و آرایش مجدد دانه های خاک در اثر بالا آمدن دوباره تراز آب زیر زمینی.

۵- عمل کرد تونل بصورت زهکش آبهای موجود در زمین.
۶- حرکت زمین به سمت جبهه کار و دیوارهای حفاری شده تونل.
۷- سست شدن توده خاک و تزریق ناقص حین عملیات ساخت.
۸- تغییر شکل و انحنای قطعات بتن پوشش.

با توجه به عوامل یاد شده و اهمیت مساله نشست سطح زمین، این مورد برای تونلهای کم عمق قبل از ساخت می بایستی با دقت قابل قبولی تخمین زده شود از این رو در این تحقیق، ضمن بیان برخی از تئوریهای رایج در مورد نشست سطح زمین در اثر حفر تونلهای کم عمق و نشست زمین در اثر پایین آمدن تراز آب زیر زمینی، مطالعه و بررسی تاثیر توام دو مورد یاد شده بر نشست سطح زمین مورد بررسی قرار خواهد گرفت و مقدار این نشست در محل برخورد متروی شیراز با فاز اوّل شبکه زهکش شیراز نیز دوباره محاسبه و تحلیل خواهد شد.[۲ و ۳]

فصل دوم

پیشینه تحقیق

تحقیقاتی که در مورد نشست سطح زمین انجام شده است بصورت جداگانه و به ترتیب برای نشست سطح زمین در اثر حفر تونلهای کم عمق و نشست سطح زمین در اثر پایین آمدن سطح آب زیر زمینی می باشد در زیر قسمتی از کارهای انجام شده به همراه تئوریهای استفاده شده برای انجام آنها آورده شده است.

۲-۱- نشست سطح زمین در اثر حفر تونلهای کم عمق

برای طرح تونلها در خاکهای نرم (Soft Grounds) بایستی موارد زیر مد نظر قرار گیرند:

- پایداری تونل با توجه خاص به پایداری جبهه کار
- ارزیابی نشستهای زمین ناشی از حفر تونل و بررسی اثراتی که نشستهای مذکور روی سازه های سطحی و زیر سطحی می گذارد.
- طراحی سیستم پوشش تونل (Lining) به گونه ای که از پایداری کوتاه مدت و بلند مدت آن اطمینان حاصل شود.

در ابتدا مطالب مختصری در مورد پایداری پیشانی تونل بیان می شود و سپس در مورد نشست سطح زمین بحث خواهد شد.

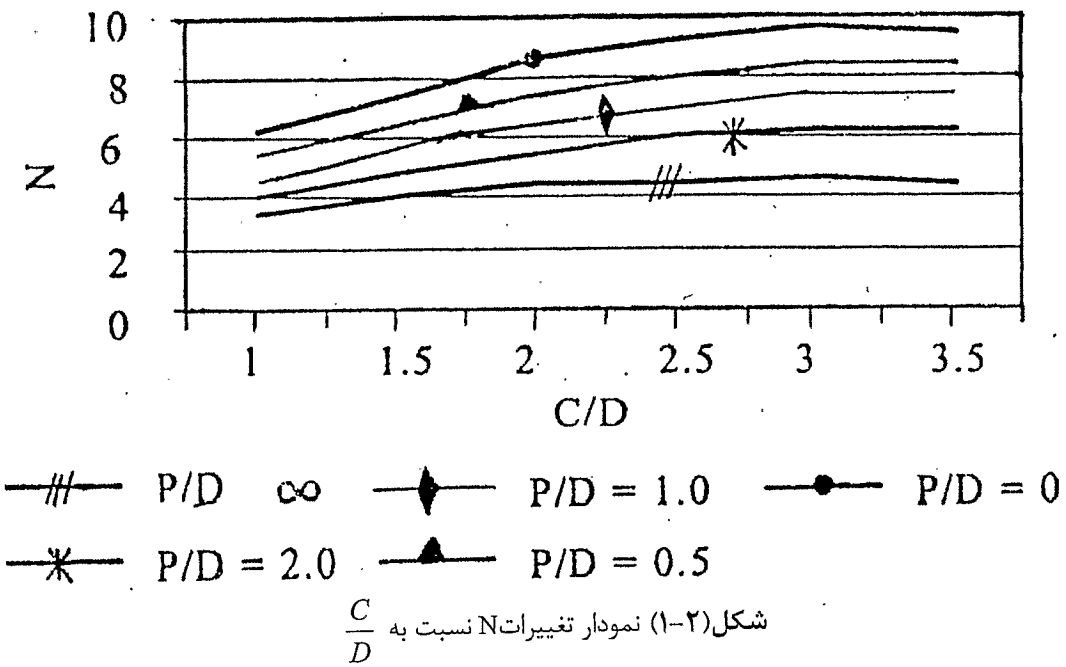
در طی سی و پنج سال گذشته روشهای مختلفی برای آنالیز پایداری جبهه تونلهای حفر شده در خاکهای نرم پیشنهاد شده است. مبنای بیشتر روشها تونل با مقطع دایره ای می باشد که در خاک همگن حفر گردیده است.پارامترهای اصلی حاکم در بررسی پایداری جبهه تونل به شرح زیر می باشد:

- قطر تونل و فاصله سطح زمین تا بالای تونل به ترتیب D و C
- وزن مخصوص خاک و سربار ناشی از سازه های موجود در سطح زمین به ترتیب γ و σ_s
- فشار اعمال شده در سطح جبهه تونل (اگر مورد نیاز باشد) σ_T
- مقاومت برشی خاک، C_u و یا c' و ϕ'

معیار پایداری جبهه تونل در خاکهای ریز دانه. رسی با ضریب اضافه بـار N نـشان داده مـی شود(Overload Factor):

$$N = \frac{\sigma_s + \gamma H - \sigma_T}{C_u} \qquad (۱-۲)$$

که در آن H فاصله سطح زمین تا محور تونل می باشد. سایر پارامترها در بالا تعریـف شـده اند. بر این اساس امکان ناپایداری پیشانی تونل در ضرائب اضافه-بار بیش از ۵ تا ۷ وجـود دارد. بررسیهای اخیر نشان می دهد مقدار حدی اضافه بار بین ۵ تا ۷ برای نسبتهای $\frac{C}{D}$ در محدوده ۱،۵ اتفاق می افتد. نمودار تغییرات N نسبت به $\frac{C}{D}$ در شکل (۲-۱) بـرای نـسبتهای مختلـف $\frac{P}{D}$ (P طول بدون پوشش در پشت پیشانی تونل) آمده است[۴] و [۵].



شکل(۲-۱) نمودار تغییراتN نسبت به $\frac{C}{D}$

بررسی اثرات سه بعدی در پایداری جبهـه تونـل بـا انجـام مـدل سـازی هـای سـه بعـدی ضروریست. این امر به ویژه در برآورد نیروهای حاصل از تراوش آب که باعـث تمرکـز گرادیـان هیدرولیکی زیادی در اطراف جبهه تونل می شود مفید است. در آنـالیز پایـداری جبهـه تونـل علاوه بر مورد فوق منظور نمودن شرائط خاک غیر همگن (تناوب لایه ها) ضروریست.

از این قسمت به بعد در مورد موضوع نشست زمین بحث خواهد شد.

حفر تونل در اعماق سطحی می تواند منجر به نشـستهایی در سـطح زمـین بـشود. در ایـن شرایط شکل محدوده نشست کرده در سطح زمین، معمولا حالت کاسه ای دارد.

بر اساس بررسیهای انجام شده توسـط Cording and Hansmire چهـار عامـل اصـلی افـت زمین ناشی از حفر تونل با استفاده از TBM عبارتند از:

- درونکش پیشانی تونل (Face intake) در اثر آزازد شدن تنشها پس از گود برداری
- جابجایی در طول سپرها (Shields) شامل تغییر شکلهای برشی جدار سپر و جابجایی به طرف داخل به علت انحراف ماشین تونل زنی.
- تغییر شکلهای دیواره تونل ناشی از تفاوت قطر خارجی مته حفاری و قطر خرجی پوشش تونل
- تغییر شکلهای پوشش تونل.

بسته به مشخصات خاک بالا دست و همتراز تونل، تغییر شکل قائم زمین می تواند در تمام مسیر بین تراز تونل تا سطح زمین و یا در بخشی از آن منتشر شود.[۴ و۶ و۷ و ۸ و ۹ و۱۰]

۲-۱-۱- روش Peck

طی سالهای اخیر توصیه های peck در گزارش وی به کنفرانس مکانیک خاک و پی سازی در مکزیکوسیتی، اساس محاسبات تونل در زمین های نرم بوده است. نتایج Peck مبتنی بر تجزیه و تحلیل مشاهدات عملی بر تونلهای ساخته شده بوده است. با این وجود در این مدت توصیه های وی با مشاهدات رفتار تونلهای متعدد اجرا شده تصحیح و تکمیل گشته است.

علاوه بر آن مدلهای آزمایشگاهی و عددی بسیاری در زمینه بررسی حرکات زمین اطراف تونل ها توسعه و گسترش یافته اند که بر دانش مهندسی در باره مسائل مطروحه افزوده است. در روشهای تجربی معمولا حرکات زمین در پیرامون تونل را با نشست های سطحی ارتباط می دهند و منابع نشست را جداگانه بررسی نموده و سپس اثرات آنها را با یکدیگر جمع می کنند. توزیع عرضی نشست سطحی بنابر تجربیات بسیار روی تونل های ساخته شده تقریبا شبیه به منحنی چگالی احتمال نرمال می باشد. مقدار نشست عرضی در فواصل مختلف از محور تونل را از رابطه زیرمی توان بدست آورد:

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

$S_{\max}$:بیشترین نشست بالای محور تونل، i: نقطه تقعر تابع توزیع نرمال می باشد.

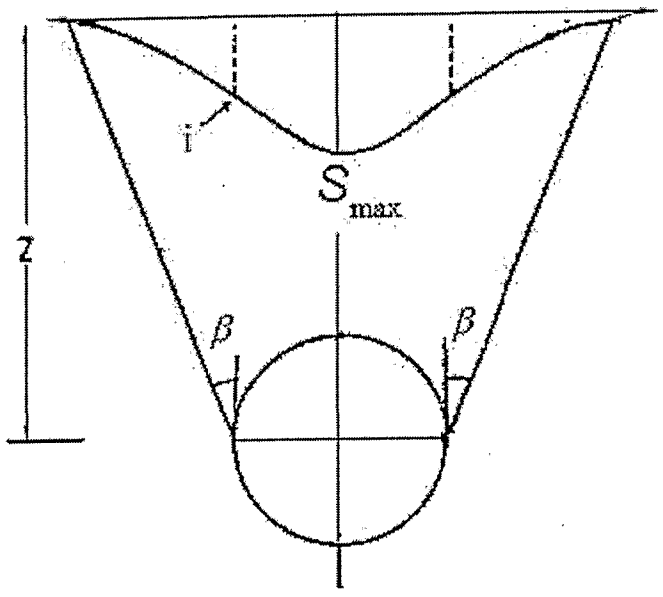
در شکل (۲-۲) توزیع عرضی نشست نسبت به محور تونل مشاهده می شود.

حرکات کوتاه مدت زمین در اثر حفر تونل می تواند به علل زیر اتفاق بیفتد:

۱-) ریزش (Collapse) زمین جلوی جبهه حفاری

۲-) هجوم (Extrusion) خاک در جبهه تونل

۳-) تغییر شکلهای زمین حفاری شده قبل از جدار



شکل(۲-۲) شکل شماتیک توزیع عرضی نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل کم عمق

از مشاهدات و بررسیهای عملی، روابطی تجربی برای تاثیر هر یک از عوامل فوق بدست آمده است که در بخشی از آنها رابطه پارامتر پهنای گودی نشست*(i)* را می توان بر اساس عمق محور تونل *(z)* و شعاع تونل *(R)* به شرح زیرَ بدست آورد

$$i/\alpha = \alpha\left(z/2\alpha\right)^{n} \qquad (Attewell\ et.al) \qquad (۳-۲)$$

که در آن پارامترهای n و α به رفتار تنش- کرنش خاک و روش ساخت تونل بستگی دارد. لازم به ذکر است که مقادیر مختلفی برای پارامترهای فوق توسط محققین ارائه گردیده است که از جمله می توان مقادیر زیر را برای خاکهای رسی نام برد:

$\alpha = 1 \qquad n = 0.8 \qquad Attewell$

در همین زمینه Leach ضمن بررسی اطلاعات مربوط به ۲۳ تونل با روشهای مختلف اجرا رابطه زیر را ارائه نمود:

$$i = 0.57 + 0.45Z \pm 1.01\ (Meter)$$

و در جایی که نشست تحکیمی مطرح باشد

$$i = 0.64 + 0.48Z \pm 0.91\ (Meter) \qquad (۴-۲)$$

روابط دیگری نیز برای تعیین مقدار i توسط محققان دیگر ارائه شده است که در جدول زیر آورده شده است:

از مجموعه مطالعات استنباط می شود پهنای گودی نشست در خاکهای دانه ای کمتر از خاکهای چسبنده بوده و در نتیجه احتمال جریان مصالح و ریزشهای سقف تونل در خاکهای دانه ای بیشتر می باشد.

S_{max} هم از رابطه زیر می توان بدست آورد :