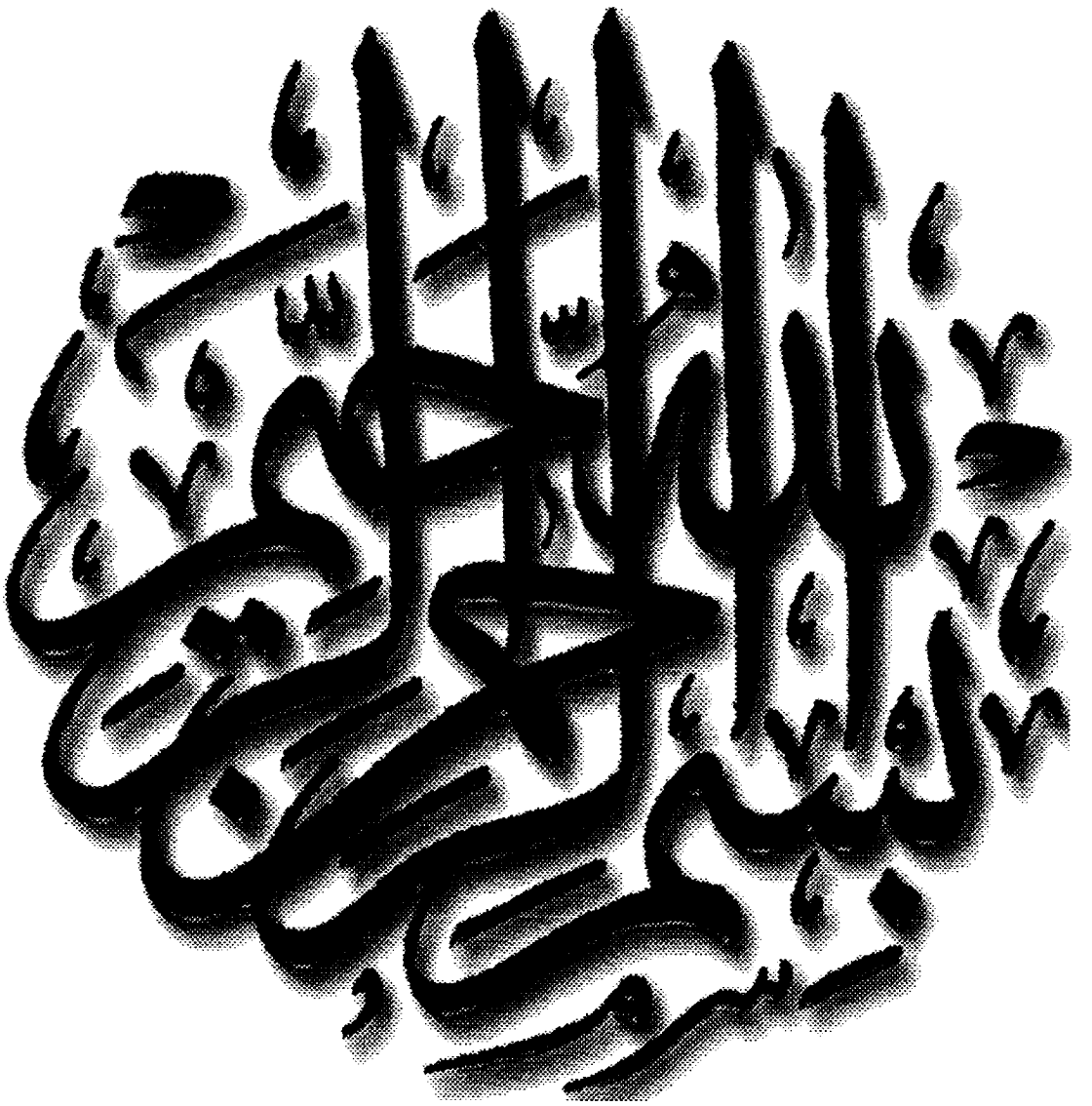


٤١٢٥٤

۱۳۸۱ /۴/ ۳۰

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده عمران

تحلیل نشست زمین در اثر احداث تونلهای مترو

پایان نامه کارشناسی ارشد خاک و پی

شهریار میرمیرانی

استاد راهنما

دکتر محمود وفائیان

۱۳۸۰

۴۱۲۵۴

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش **خاک و پی** - **آقای شهریار میرمیرانی**

تحت عنوان :

تحلیل نشست زمین در اثر احداث تونلهای مترو

در تاریخ ۱۲/۱۰/۸۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت.

۱ ـ استاد راهنما — دکتر محمود وفائیان .....

۲ ـ استاد مشاور (از دانشکدهٔ معدن) — دکتر حمید هاشم‌الحسینی .....

۳ ـ ممتحن مدعو (از دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران) — دکتر اورنگ فرزانه .....

۴ ـ عضو کمیتهٔ دفاع — دکتر بهروز کوشا .....

۵ ـ سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر محمود قضاوی .....

از آقای دکتر وفاییان، استاد فروتن و فرزانه که نه تنها در علم سرمشق بنده می‌باشند، بلکه با اخلاق نیکو بسیار مرا تحت تأثیر قرار داده‌اند، کمال تشکر را دارم.

از آقای دکتر هاشم الحسینی که مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نمودند و از مشاورهٔ ارزشمند خود مرا بهره‌مند ساختند، قدردانی می‌نمایم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج
مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از
تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به
دانشگاه صنعتی اصفهان است

تقدیم به آنان که دوستشان دارم:

اولین معلمان زندگیم، مادر و پدر عزیزم

همسر صبور، متین و عزیزم

پدر و مادر همسرم

شهاب، آزاده، مریم

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهران - مرکز

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هفت
چکیده ۱

فصل اول: تاریخچهٔ تحلیلها و روشهای تحقیق در مورد مسئلهٔ حاضر

۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- بررسی مطالعات تجربی در مقیاس اجرایی ۳
۱-۳- بررسی مطالعات آزمایشگاهی بر روی مدلهایی با مقیاس کوچک ۷
۱-٤- بررسی مطالعات نیمه تحلیلی-نیمه تجربی ۸
۱-٥- بررسی مطالعات تئوری و تحلیلی ۱۲
۱-٦- روشهای عددی ۱۹
۱-۷- شبکهٔ عصبی مصنوعی ۲۰
۱-۸- جمع‌بندی و مقایسهٔ روشها ۲۱

فصل دوم: بررسی تأثیر فراسنجهای مختلف بر ویژگیهای نشست خاک در حوزهٔ الاستیک

۲-۱- مقدمه ۲۵
۲-۲- استفاده از نرم‌افزار **ANSYS 5.4** ۲٦
۲-۳- نحوهٔ شبکه‌بندی در نرم‌افزار **ANSYS 5.4** ۲٦
۲-٤- مشخصات هندسی و فیزیکی مدل مورد محاسبه ۲۸
۲-٥- بررسی محاسباتی رفتار مدل فرضی ۲۹
۲-٦- نحوهٔ مدلسازی ٤٦
۲-٦-۱- ایجاد تغییرمکان اجباری در دهانهٔ تونل ٤٦
۲-٦-۲- ایجاد حفره در محیط وزن‌دار ٤۹
۲-۷- بررسی اثر فراسنجهای فیزیکی ٥۰
۲-۷-۱- تأثیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون ٥۰
۲-۷-۲- اثر دانسیته ٥۲
۲-۸- بررسی اثر فراسنجهای هندسی ٥٤
۲-۸-۱- اثر قطر تونل ٥٤
۲-۸-۲- اثر ضخامت لایهٔ زیر تونل (عمق بستر سنگی) ٦۱
۲-۸-۳- اثر لایه‌ای بودن محیط با مدول الاستیسیته متفاوت ٦۳
۲-۸-٤- تأثیر لایه‌های با دانسیتهٔ متفاوت ٦٤
۲-۸-٥- بررسی اثر ضخامت لایه‌ها (بامدول الاستیسیته مختلف) ٦٦

عنوان **صفحه**

۲-۹- بررسی فراسنجهای مربوط به مدل ٦٨
۲-۹-۱- انتخاب عرض مناسب برای مدل ٦٨
۲-۹-۲- بررسی تأثیر نوع اجزا و تعداد آنها ۷۰
۲-۱۰- نتیجه‌گیری کلی از کاربرد مدل الاستیک ۷۳

فصل سوم: مقایسهٔ نتایج حل الاستیک اجزای محدود با داده‌های تجربی و نتایج روشهای دیگر
۳-۱- مقدمه ۷۵
۳-۲- روش کار ۷٦
۳-۳- کنترل و مقایسهٔ نتایج حل الاستیک ۷٦
۳-۳-۱- تونل هیث رو ۷۷
۳-۳-۲- تونل تاندر بی ۸۰
۳-۳-۳- تونل گرین پارک ۸۳
۳-۳-٤- تونل بارسلون ۸۵
۳-۳-۳- تونل تایپه ۸٦
۳-٤- مقایسهٔ منحنیهای تغییرات λ تابع عمق نسبی ۸۸
۳-۵- نتیجه‌گیری ۸۹

فصل چهارم: بررسی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل متروی تهران
٤-۱- تاریخچهٔ احداث مترو در تهران ۹۱
٤-۲- منطقهٔ برداشت ۹۲
٤-۳- روش اجرای تونلها ۹۳
٤-٤- روش اندازه‌گیری نشست ۱۰۰
٤-۵- بررسی و تحلیل نتایج حاصل از برداشتها ۱۰۰
٤-٦- مدلسازی تونل متروی تهران ۱۰۳
٤-۷- بحث و نتیجه‌گیری ۱۰٤

فصل پنجم: نتیجه‌گیری
۵-۱- خلاصه ۱۰۵
۵-۲- نتیجه‌گیری ۱۰٦

مراجع ۱۰۹
چکیدهٔ انگلیسی ۱۱۲

چکیده

به‌طورکلی محیط زمین در ابتدا تحت فشار ناشی از تنشهای طبیعی بوده و هرگونه دست‌خوردگی، این وضعیت تنش را مختل کرده و موجب همگرایی دهانهٔ تونل و پدید آمدن تغییرمکانهایی در مقطع زمین می‌شود. این تغییرمکانها در سطح زمین به صورت نشست ظاهر می‌شود که در مواردی قابل توجه است.

از چهار دهه قبل به این سو، بررسیهای متعدد تحلیلی و اندازه‌گیریهای تجربی فراوانی در مورد مطالعهٔ ویژگیهای نشست زمین (و به‌طورکلی جابه‌جایی خاک) در اثر حفر تونلهای مترو در مناطق شهری انجام گرفته است و کوشش شده که ارتباطهایی بین تغییرشکل و جابه‌جایی زمین با مشخصه‌هایی نظیر وزن واحد خاک، مدول الاستیسیته، قطر تونل، عمق محور تونل و بعضی کمیتهای دیگر به‌دست آید. حاصل این تلاشها، در مواردی رابطه‌های بسیار پیچیده و مفصل و اکثراً رابطه‌های ساده و آسان و نیز رابطه‌های نیمه تجربی - نیمه تحلیلی بوده است. بدیهی است گسترش این بحث و تنوع رابطه‌ها و تغییرات آنها، به‌دلیل دستیابی به اطلاعات جدیدتر و دقیقتر بوده است که در تعقیب آن، بعضی از رابطه‌های قبلی تصحیح شده ویا با پارامترهای جدیدی تغییر یافته است. از طرفی آغاز همهٔ بحثهای مهندسی در حوزهٔ تنش-کرنش (دگرشکلیهای محیطهای سنگی و خاکی) مبتنی بر حل الاستیک است؛ لکن به علت اینکه محیط خاکی به سهولت وارد حوزهٔ خمیری می‌شود، ذهن پژوهشگران در این مبحث همواره نگران تداخل مسأله با شرایط خمیری است. زیرا در این شرایط به علت نیاز به فرض صحیح در مورد انتخاب معیار پلاستیسیته، تنوع راه‌حلها بیشتر شده و ارزیابی نتایج آنها بسیار دشوار می‌گردد. از این رو در شرایطی که حل الاستیک بتواند با یک درصد قابل قبولی از تقریب و خطا با دستاوردهای تجربی تطابق یابد، پژوهشگران را سریعتر و مطمئنتر به هدف (حل مسأله) نزدیک می‌نماید.

در این پایان‌نامه، مسألهٔ دگرشکلیهای ایجاد شده در محیطهای خاکی در اثر ایجاد تونلهای مترو به کمک نرم‌افزار قوی "انسیس" مورد بررسی همه جانبه قرار گرفته است و با توجه به تحلیلهای انجام شده، نشان داده می‌شود که چه کمیتهایی تا چه اندازه می‌توانند در ارتباطهای ذکر شده مؤثر باشد و کدام کمیت اهمیت کمتر دارد یا حتی فاقد ارتباط یا نقش تعیین کننده است. اهمیت این بررسی در دو بخش است. اول اینکه تأثیر پارامترهای الاستیک مؤثر مورد بحث قرار گرفته و نشان داده می‌شود که بعضی از کمیتها ارتباط مشخصی را نشان نمی‌دهند و دوم اینکه مدلهای ارائه شده در روش پیشنهادی تحلیل الاستیک، تا چه اندازه با اندازه‌گیریهای واقعی تطابق دارد. به عبارت دیگر نشان داده می‌شود که تقریباً تمامی نتایج اندازه‌گیریهای تجربی اطراف تونلهای خاکی را می‌توان بر اساس فرض محیط الاستیک توجیه نمود و در مواردی که بخشی از ارقام حاصل از محاسبه، نسبت به ارقام اندازه‌گیری شده فاصله می‌یابند، علتهای مشخصی دارد که قابل بررسی و توجیه است. همچنین حل الاستیک حاصل -در مقایسه با موارد یاد شده- با برخی از راه‌حلهای تئوری یا فرمولهای تحلیلی پذیرفته شده نیز مورد مقایسه قرار گرفته است.

فصل اول
تاریخچهٔ تحلیلها و روشهای تحقیق در مورد مسأله حاضر

۱-۱- مقدمه

بررسیهای انجام شده در رابطه با موضوع نشست زمین در اثر حفر تونل را می‌توان به دسته‌های زیر تقسیم کرد که در هر روش تحقیقات فراوانی انجام شده است:

الف) تحقیق بر روی تونلها در مقیاس واقعی

ب) تحقیق در جهت گسترش روشهای تئوری

ج) تحقیق بر روی مدلهای آزمایشگاهی در مقیاس کوچک

د) استفاده از روشهای عددی در مدلسازی

هرکدام از روشهای فوق دارای نقاط قوتی است و می‌تواند از جهاتی به تبیین مسئله کمک کند. بررسیها و اندازه‌گیریهای ناحیه‌ای حاوی نتایج مطمئن می‌باشد، ولیکن کارایی لازم جهت تعیین میزان تأثیر خواص مختلف خاک بر مقدار نشست محیط اطراف تونل را ندارد. در روشهای تئوری شرایط بسیار ساده‌ای در نظر گرفته می‌شود؛ درصورتی‌که محیط واقعی چنین نیست و از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر متفاوت است. بررسیهای مدلی نسبت به دو روش قبلی این مزیت را دارد که خواص خاک مورد آزمایش کاملاً تعیین شده و قابل انتخاب می‌باشد. به‌این لحاظ تأثیر فراسنجهای مختلف قابل بررسی می‌باشد و همچنین جابه‌جایی، نشست و فشارها در هر مرحله از شرایط حفر تونل قابل اندازه‌گیری است. از جمله اشکالات مهم این روش این است که محیط و همهٔ شرایط آن قابل بازسازی نمی‌باشد. اخیراً با پیشرفت فن‌آوری سخت‌افزار و نرم‌افزار، محققین

علاقهٔ بیشتری برای استفاده از روشهای عددی نشان می‌دهند. تکنیکهای قوی در مدلسازی و شبیه‌سازی، تضمین کنندهٔ دقت پیش‌بینیها می‌باشد.

۱-۲- بررسی مطالعات تجربی در مقیاس اجرایی

بطورکلی محیط زمین در ابتدا تحت فشار ناشی از تنشهای طبیعی بوده که هرگونه حفاری این وضعیت تنش را مختل کرده و موجب همگرایی دهانهٔ تونل و پدید آمدن تغییرمکانهایی در مقطع زمین می‌شود. این همگرایی قبل از رسیدن جبههٔ کار به مقطع مورد نظر آغاز می‌شود که شروع آن را از فاصله‌ای حدود شعاع یا نصف عرض فضای زیرزمینی از جبههٔ کار تخمین می‌زنند و در فاصله‌ای حدود دو برابر قطر تونل این تأثیر عملاً محو می‌شود. پس از عبور جبههٔ کار از مقطع مورد نظر، تغییرمکانها به صورت فزاینده‌ای زیاد می‌شود که این افزایش تابع دو عامل، یکی فاصلهٔ مقطع مورد نظر از جبههٔ کار و دیگری عامل زمان می‌باشد [۱].

گزارشهای بسیاری در مورد اندازه‌گیریهای اطراف تونل و سطح زمین در سراسر جهان انجام شده است؛ ازجملهٔ این موارد، متروهای بانکوک، سنگاپور، قاهره، سئول، رم، برلین، مادرید، لندن، کاراکاس، تهران و بسیاری از شهرهای دیگر می‌باشند که جمع‌بندی این اطلاعات کمک شایانی به پیش‌بینی نشست در سطح زمین در اثر حفر تونل خواهد داشت.

احتمالاً گزارش "ترزاقی" (۱۹٤۲) از اولین گزارشهایی است که تأثیر نوع خاک را در انتقال نشست به سطح زمین نشان می‌دهد. او در مورد خاکهای دانه‌ای عقیده دارد که کل جابه‌جاییهای زمین در محل تونل به‌علت اتساع، به‌تدریج تا سطح زمین مستهلک می‌شود و در واقع از میزان نشست از تراز تونل تا سطح زمین کاسته می‌گردد. درصورتی‌که در خاکهای رسی چون تغییرحجم خیلی کم است و لایه‌های خاک به علت چسبندگی تحت تأثیر پیوستگی هستند، از این رو با اندازه‌گیری نشست در سطح زمین می‌توان به وجود تغییرشکل دهانهٔ تونل پی برد [۲].

"پک" (۱۹٦۹) یک گزارش مدون حاوی جمع‌آوری کلی عملیات اجرایی تونل در زمینهای نرم تا آن زمان ارائه نمود. آنگاه در بررسیهای مفصل خود، زمینهای نشست‌پذیر را به چهار گروه تقسیم می‌کند:

۱ - رسوبات دانه‌ای بدون چسبندگی

۲ - رسوبات دانه‌ای چسبنده

۳ - رسوبات رسی سخت و سفت بدون تورم‌پذیری

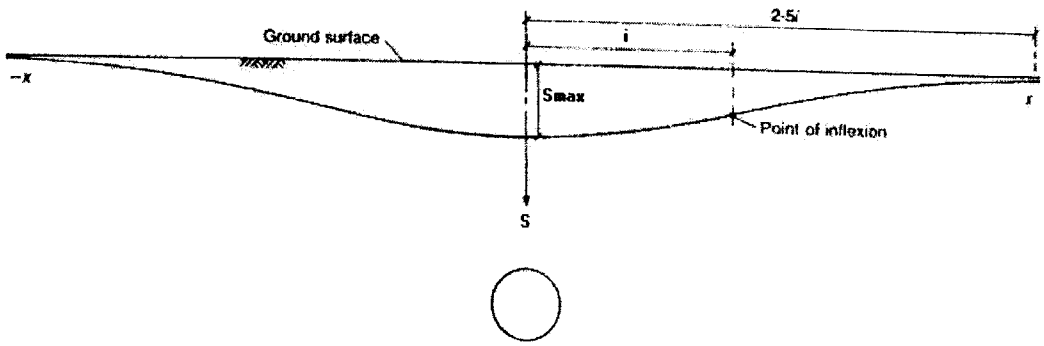
٤ - رسهای نرم تا سفت اشباع‌شده

سپس برای هرکدام از انواع خاکها، اندازه‌گیریهای انجام شده برای تونلهای واقع در این خاکها را ذکر می‌نماید [۳].

در مورد شکل منحنی توزیع نشست در سطح زمین، "پک" (۱۹۶۹) براساس اطلاعات تجربی، منحنی توزیع نرمال آماری (منحنی گوس) مطابق شکل ۱-۱ را پیشنهاد می‌کند که معادلهٔ آن به شکل زیر می‌باشد:

$$S_{(x)} = S_{max}.e^{(\frac{-x^2}{2i})} \qquad (۱-۱)$$

در این رابطه، S_{max} حداکثر نشست سطح زمین روی محور تونل، S_x نشست سطح زمین در نقطه‌ای به فاصلهٔ x از محور تقارن و i فاصلهٔ نقطهٔ عطف منحنی از محور تقارن است.



شکل ۱-۱- فرم نشست زمین، پیشنهادی پک (۱۹۷۶)

توجیه این منحنی از لحاظ آماری اجمالاً به این شرح است:

اگر محیط خاکی یک سطح با دانه‌های کروی فرض شود، اولین دانه‌ای که از خاک حرکت کند، فضایی را در محل خود باقی می‌گذارد که این فضا توسط یکی از دو دانهٔ بالایی اشغال می‌شود که شانس هرکدام از آن دانه‌ها ۵۰ درصد است. در ردیف بالاتر سه دانهٔ خاک احتمال دارد که فضای زیرین خود را اشغال کند که شانس این سه دانه به‌ترتیب ۲۵، ۵۰، ۲۵ درصد است. در ردیف بالاتر این احتمالات به‌صورت ۱۲/۵، ۳۷/۵، ۳۷/۵ و ۱۲/۵ خواهد بود و به همین ترتیب هرکدام از ردیفها دارای احتمالی خواهد بود تا به سطح زمین برسد. نتیجهٔ نهایی آن به‌صورت یک منحنی توزیع نرمال آماری (منحنی گوس) خواهد بود که نشست سطح زمین را نشان می‌دهد [۱۸،٦].

گرچه این رابطه پایهٔ تئوری ندارد و به علت شباهت آن به فرم تجربی نشست انتخاب شده است [٦]، ولی در عین حال کاربری آسانی دارد و می‌توان فراسنجهای آنرا به آسانی تعریف نمود.

نقطهٔ عطف منحنی آن با مختصات $x=i$ و $S=0.61S_{max}$ می‌باشد و فاصلهٔ نقطهٔ بیشینه انحنا تا خط قائم عبور کننده از محور تقارن تونل برابر $\sqrt{3}i$ بوده و خط مماس بر نقطهٔ عطف، سطح زمین را به فاصلهٔ $2i$ از محور تقارن قطع می‌کند. هرچقدر عمق تونل بیشتر باشد، دامنهٔ گسترش نشست در سطح زمین وسیعتر و قدرمطلق نشستها کوچکتر است [۲].

همان‌طور که مشخص است، i فراسنج مهمی در نشان دادن عرض منحنی می‌باشد. لازم به ذکر است که حد محاسباتی منحنی توزیع نرمال تا بینهایت است ولی درعمل می‌توان محدودهٔ عرض گود نشست را تا حدود $2/5i$ در نظر گرفت. "پک" ارتباط مقدار i با نوع خاک و عمق نسبی تونل را برای خاکهای مطالعه شده، براساس اندازه‌گیریهای انجام شده روی تونلهای واقعی در نمودارهایی خلاصه نموده و مبتنی بر آنها روابطی پیشنهاد نمود. از ساده‌ترین روابط مربوط به نقطهٔ عطف در حالت بدون رویبار عبارت است از [۲]:

$$i = 0.25(R + Z_0) \qquad (۱-۲)$$

که در این رابطه، R شعاع تونل و Z_0 فاصلهٔ مرکز تونل از سطح زمین است.

در حقیقت با فرض پذیرش منحنی نرمال، چگونگی نشست نقاط مختلف در سطح زمین با مشخص شدن دو کمیت i و S_{max} معلوم می‌گردد. این مسئله (مشخص کردن i و S_{max})، موضوع بحثها و تحلیلهای بسیاری از گزارشها می‌باشد.

"نیو" و "اوریلی" (۱۹۹۱) و "آیزنشتاین" (۱۹۸۱) که در این زمینه مطالعه داشته‌اند، بیان کرده‌اند که این روش در رسهای عادی تحکیم یافته جواب مناسبی می‌دهد اما در مورد خاکهای دانه‌ای یا رسهای فوق تحکیمی جواب مناسبی نمی‌دهد [۶].

در مورد فراسنج i بحثهای زیادی شده است. از جمله "اوریلی" و "نیو" (۱۹۸۲) تغییرات i را در عمق برای خاکهای رسی انگلستان به صورت رابطهٔ خطی زیر تعریف کردند [۷]:

$$i = 0.43(Z_0 - Z) + 1.1 \quad , 3 \le Z_0 \le 34 \quad \text{(متر)} \quad \text{خاکهای چسبنده} \qquad (۱-۳)$$

$$i = 0.28(Z_0 - Z) - 0.1 \quad , 6 \le Z_0 \le 10 \quad \text{(متر)} \quad \text{خاکهای دانه‌ای} \qquad (۱-۴)$$

در موارد کاربردی می‌توان این تغییرات را به صورت خطی نسبت به عمق در نظر گرفت:

$$i = kZ_0 \qquad (۱-۵)$$

در این رابطه، مقدار k از ۰/٤ تا ۰/۷ برای خاکهای رس سفت تا رسهای نرم سیلتی در نظر گرفته می‌شود. در این مورد "رانکین" (۱۹۸۸) نشان داد که i=0.5Z با بسیاری از موارد مشاهده شده تطابق دارد [۸].

"لیچ" (۱۹۸۵) با تحلیل اطلاعات مربوط به ۲۳ تونل که به روشهای مختلف اجرا شده بودند (بدون سپری، با سپری و بدون هوای فشرده، با سپری و با هوای فشرده و تونلهای کوچک) روابط زیر را به‌دست آورد [۹]:

$$i = 0.57 + 0.45(Z_0 - Z) \pm 1.01 \quad \text{(متر)} \quad \text{بدون تحکیم} \qquad (۱-٦)$$

$$i = 0.64 + 0.48(Z_0 - Z) \pm 0.91 \quad \text{(متر)} \quad \text{با تحکیم} \qquad (۱-۷)$$

این روابط با روابطی که "اتکینسون" و "پاتس" (۱۹۷٦) برای مدلهای آزمایشگاهی بیان نموده بودند مطابقت دارد.

"مایر" و همکارانش (۱۹۹۳) در تحقیق دیگری منحنی نشست را در اعماق مختلف به صورت زیر پیشنهاد نمودند [۸]:

$$i = k(Z_0 - Z) \qquad (۱-۸)$$

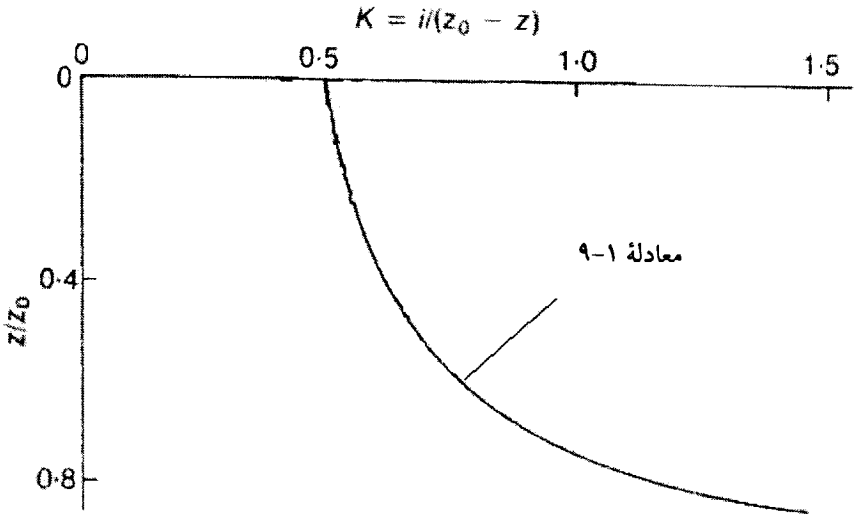
که در آن:

$$k = \frac{0.175 + 0.325(1 - \frac{Z}{Z_0})}{1 - \frac{Z}{Z_0}} \qquad (۱-۹)$$

معادلهٔ ۱-۹ به‌صورت شکل ۱-۲ قابل ترسیم است.

"ونگ" و همکاران (۲۰۰۰) تلفیقی از یک مدل تجربی و یک مدل تصحیح شدهٔ توزیعی گوس، برای پیش‌بینی شکل منحنی نشست و بیشینهٔ نشست سطح زمین در اثر حفر تونل در زمینهای نرم ارائه نموده‌اند. سپس معادلات به‌دست آمده برای یک تونل، به دو تونل (دوقلو) تعمیم داده شده است. تصحیح مدل نشست توزیعی گوس، بر پایهٔ تحلیلهای نرم‌افزار FLAC و به‌روش تفاضل محدود صورت گرفته است [۱۰].

این نوع روشها در تعیین نشست زمین در اثر حفر تونل، دارای محدودیتهایی می‌باشند. از جمله می‌توان به محدودیت در نحوهٔ کاربرد آنها در شرایط مختلف زمین و یکسان در نظر گرفتن تکنیکهای متفاوت اجرا در این روشها اشاره کرد.



شکل ۱-۲- تغییرات K در عمق برای نقاط مختلف بالای تونل در رس [۸]

۱-۳- بررسی مطالعات آزمایشگاهی بر روی مدلهایی با مقیاس کوچک

در این مورد پژوهشگرانی مانند "اتکنیسون"، "پاتس" و "شوفیلد" روی دو نوع خاک ، یکی رس فوق تحکیمی (با نسبت پیش تحکیمی حدود ٤) و دیگری ماسهٔ خشک (با دانه‌بندی مشخص و درصد پوکیهای متفاوت) برای تونلهای مدلی با قطر ٦ سانتیمتر آزمایشهایی انجام دادند [۲].

برای مقایسه نتایج تستها ،کمیتی به نام "فاکتور بار" (تقریباً معکوس ضریب اطمینان) به شرح زیر تعریف نمودند:

$$LF = \frac{1 - \sigma_T / \gamma Z}{1 - \sigma_{TF} / \gamma Z} \quad , \quad \sigma_S = 0 \qquad (۱۰-۱)$$

$$LF = \frac{1 - \sigma_T / \sigma_S}{1 - \sigma_{TF} / \sigma_S} \quad , \quad \sigma_S >> 0 \qquad (۱۱-۱)$$

در این روابط σ_T فشار داخل تونل بطور عمومی و σ_{TF} فشار داخلی تونل متناظر با فرو ریختن کامل تونل، Z فاصله مرکز تونل از سطح خاک و σ_S فشار یکنواخت روبار روی سطح خاک می‌باشد. به‌طورکلی تونل مدل دارای یک مقدار فشار داخلی (σ_T) می‌باشد که با کاهش آن، تونل به مرحلهٔ ریزش می‌رسد و در حین فشار (σ_T) جابه‌جایی خاک اطراف تونل در طول آزمایش