بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

گروه مهندسی عمران

گرایش مکانیک خاک و مهندسی پی

مطالعه عددی بر روی کنترل نشست سطح زمین در اثر حفر تونل‌های سطحی با استفاده از تزریق جبران کننده

نگارنده

حمید فوجی

استاد راهنما

دکتر سیّد احسان سیّدی حسینی نیا

استاد مشاور

دکتر جعفر بلوری بزاز

بهمن ۱۳۹۲

اظهارنامه

اینجانب **حمید فوجی** دانشجوی دوره دکتری/کارشناسی ارشد رشته **مهندسی عمران- گرایش مکانیک خاک و مهندسی پی** دانشکده **مهندسی** دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده رساله/پایان نامه **مطالعه عددی بر روی کنترل نشست سطح زمین در اثر حفر تونل‌های سطحی با استفاده از تزریق جبران کننده**

تحت راهنمایی **جناب دکتر سیّد احسان سیّدی حسینی نیا** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله/پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله/پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه فردوسی مشهد » و یا « Ferdowsi University of Mashhad » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله/پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله/ پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله/پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله/پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله/پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

بسمه تعالی

برگه ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی دانشجو: محمد توحیدی شماره دانشجویی ۹۰۱۲۴۷۲۰۸۸ گروه آموزشی عمران

رشته عمران گرایش طراحی سازه‌های بتنی تاریخ دفاع : ۹۲/۱۱/۱۲ نام و نام خانوادگی استاد راهنما: سید احسان سیدی اصفی نیا

عنوان پایان نامه : مطالعه عددی بررسی کنترل سازه‌های بتنی مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده با استفاده از تئوری فازی

	معیارهای ارزشیابی	حداکثر نمره	نمره کسب شده	ملاحظات
کیفیت نگارش	نسجام در تنظیم و تدوین مطالب،حسن نگارش و رعایت دستورالعمل	۳	۳	
	کیفیت تصاویر، اشکال و منحنی های استفاده شده			
کیفیت علمی	بررسی تاریخچه موضوع و بیان سابقه پژوهش در موضوع	۱۲	۱۲	
	ابتکار ونوآوری			
	ارزش علمی و یا کاربردی			
	استفاده از منابع ومؤاخذ به لحاظ کمی و کیفی (به روز بودن)			
	کیفیت نظرات و پیشنهادات برای ادامه تحقیق			
کیفیت ارائه	تسلط به موضوع و توانایی در پاسخگویی به سئوالات درجلسه دفاع	۳	۳	
	نحوه ارائه (رعایت زمان، تنظیم موضوع، کیفیت ترانس پرنسی و			
مقاله	مقاله مستخرج از پایان نامه که براساس دستورالعمل تهیه و به تأیید استاد راهنما رسیده و بهمراه پایان نامه تحویل گردیده است	۱	۱	
گزارش ها	تحویل به موقع گزارش ها	۱	۰/۵	
نمره پایان نامه		۲۰	۱۹/۵	

اعضای هیئت علمی	نام ونام خانوادگی	مرتبه علمی	نام دانشگاه	امضاء
استاد راهنما	دکتر سید احسان سیدی اصفی نیا	استادیار	فردوسی مشهد	
استاد مشاور	دکتر حمیدرضا مرادی نژاد	دانشیار	فردوسی مشهد	
عضو دفاع	دکتر محمد غفوری	استاد	فردوسی مشهد	
عضو دفاع و نماینده تحصیلات تکمیلی	~ ~ ~	~ ~	~ ~	

جلسه دفاع با حضور هیئت داوران تشکیل و پایان نامه با اخذ نمره به عدد ۱۹/۵ حروف نوزده و پنج با درجه عالی

☑ بدون اصلاحات پذیرفته شد.

☐ با اصلاحات پذیرفته شد (دانشجو موظف است تا تاریخ ..... پایان نامه اصلاح شده خود را که به تأیید ..... رسیده است به گروه آموزشی تحویل دهد).

☐ مردود شناخته شد.

گزارش نماینده تحصیلات تکمیلی: دفاع با نمره و مورد قبول هیئت داوران برگزار شد

..... نام و امضای نماینده تحصیلات تکمیلی: محمد غفوری

نام مدیر گروه محمد رفیعی تاریخ و امضا ۹۲/۱۱/۱۲ ۹۲/۱۱/۲۶

** (لطفاً به توضیحات مندرج در پشت برگه توجه فرمائید)**

تقدیم به دو بهترین؛

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آنان که از خواسته هایشان گذشتند،

سختی ها را به جان خریدند

و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند

تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم.

تشکر و قدردانی

اینک که به یاری خداوند این پایان نامه به فرجام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم از زحمات دلسوزانه استاد گرانقدر، جناب آقای دکتر سیّدی حسینی نیا که در تمامی مراحل انتخاب موضوع، شیوه انجام مدل‌سازی‌ها و نحوه نگارش پایان نامه حاضر، با راهنمایی‌های ارزنده خود و در اختیار گذاشتن منابع مورد نیاز، مرا مورد لطف قرار داده‌اند سپاسگزاری می‌نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر بلوری بزاز که در طی انجام این امر، با کمک‌ها و راهنمایی‌های گرانقدرشان همواره حامی اینجانب بوده‌اند صمیمانه کمال تشکر را دارم.

بدین وسیله از آقایان دکتر غفوری، دکتر پویا نژاد و دکتر رسولی که حق استادی بر اینجانب را دارند، قدردانی می‌شود.

همچنین شایسته است از آقایان مهندس تاکی و تالی که اطلاعات پروژه متروی تهران را در اختیار بنده قرار دادند صمیمانه تشکر نمایم. در پایان، از آقایان دکتر Kummerer، Ni و Schweiger که در طی انجام شبیه سازی تزریق دوغاب، با کمک‌های بی‌شائبه‌شان همواره حامی اینجانب بوده‌اند کمال تشکر دارم. همچنین از دوستان عزیزم آقایان محمدعلی معروف، علی احمدی، فردین نجف زاده، حامد مراد نژاد و دیگر عزیزانی که با راهنمایی‌های خود در رفع موانع و به سرانجام رسانیدن این پایان نامه نسبت به اینجانب لطف داشته‌اند، سپاسگزارم.

چکیده

مناسب‌ترین روش توسعه پایدار در محیط‌های شهری استفاده از فضاهای زیرزمینی برای کاربردهای مختلف حمل و نقلی و ارتباطی است. عبور تونل از مجاورت و یا عبور مستقیم از زیر سازه‌های سطحی امری اجتناب ناپذیر است. لذا نشست حاصل از حفاری و اثرات آن بر سازه‌های سطحی همواره نگرانی اصلی طراحان و مسئولان را در فضاهای شهری را شامل می‌شود. در صورت تجاوز تغییر مکان‌ها از حد مجاز، گاه خسارت سنگین مالی به سازه‌های مجاور وارد می‌شود. اقدامات کاهشی زیادی برای کنترل و کاهش نشست در طی ساخت‌وسازهای زیرزمینی استفاده می‌شود. یکی از این اقدامات کاهشی مهم، تزریق جبران کننده می‌باشد. این پایان نامه به مطالعه عددی کنترل و کاهش نشست سطح زمین در اثر حفر تونل سطحی با استفاده از تزریق جبران کننده می‌پردازد. جهت شبیه سازی تزریق جبران کننده از روش عددی اجزاء محدود استفاده شده است و نرم افزار Plaxis 2D به عنوان ابزار مدل‌سازی برگزیده شده است. شبیه سازی تزریق جبران کننده در دو فاز پیش و پس از حفر تونل در حالت‌های مختلف انجام شده است. در این پژوهش، جهت شبیه سازی تزریق جبران کننده در دو فاز، از خاک ماسه‌ای رس دار که اطلاعات ژئوتکنیکی آن قبل و بعد از تزریق دوغاب موجود بود، استفاده شده است. هدف از شبیه سازی تزریق جبران کننده در این دو فاز، انتخاب بهترین موقعیت تزریق است که بیشترین بازده تزریق در کاهش نشست سطحی زمین را داشته باشد.

شبیه سازی‌ها در فاز اول نشان می‌دهد که تزریق دوغاب پیش از حفر تونل تأثیر زیادی در کاهش نشست سطح زمین در اثر حفر تونل‌های سطحی دارد. به طوری که نشست سطح زمین در اثر تزریق در اطراف تونل به کمترین مقدار خود نزدیک به صفر می‌رسد.

در فاز دوم در این پژوهش، تزریق جبران کننده پس از حفر تونل در سه حالت با شعاع گسترش دوغاب و عمق‌های متفاوت منطقه‌ی تزریق شده در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی در هر سه حالت این فاز نشان می‌دهد که با کاهش عمق منطقه‌ی تزریق و افزایش شدت تزریق، نشست سطح زمین کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: تونل سطحی، تزریق جبران کننده، نشست سطحی، شبیه سازی عددی، منطقه‌ی تزریق شده

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ زمینه تحقیق ۲

۱-۳ فرضیه‌ها و مسائل تحقیق ۳

۱-۴ شیوه تحقیق ۴

۱-۵ ساختار پایان نامه ۴

۱-۶ تعاریف ۵

۱-۷ خلاصه و جمع بندی ۶

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ روش‌های بهسازی زمین ۸

۲-۳ تزریق دوغاب سیمان ۹

۲-۳-۱ تاریخچه تزریق دوغاب سیمان ۹

۲-۳-۲ مبانی تزریق دوغاب ۱۱

۲-۳-۳ دوغاب ۱۲

۲-۳-۳-۱ عمق نفوذ دوغاب در شکاف‌ها ۱۳

۲-۳-۳-۲ شکل توده دوغاب تزریق شده ۱۴

۲-۳-۴ فشار تزریق ۱۴

۲-۳-۵ حجم دوغاب تزریق ۱۵
۲-۳-۶ فاصله سوراخ‌های تزریق دوغاب ۱۵
۲-۳-۷ لوله تزریق دوغاب ۱۶
۲-۴ روش‌های تزریق دوغاب ۱۸
۲-۴-۱ تزریق نفوذی ۲۲
۲-۴-۲ تزریق جت ۲۳
۲-۴-۲-۱ روش سیستم واحد ۲۶
۲-۴-۲-۲ روش سیستم دوگانه ۲۶
۲-۴-۲-۳ روش سیستم سه‌گانه ۲۶
۲-۴-۲-۴ روش تزریق جت پیشرفته ۲۶
۲-۴-۳ تزریق شکست هیدرولیکی ۲۷
۲-۴-۴ تزریق تراکمی ۲۹
۲-۵ تزریق جبران کننده ۳۱
۲-۵-۱ مکانیزم تزریق جبران کننده ۳۴
۲-۵-۲ کارآیی تزریق جبران کننده ۳۷
۲-۵-۳ مدل‌سازی تزریق جبران کننده در خاک ۳۹
۲-۵-۴ تاریخچه جبران و جابه‌جایی تزریق ۴۰
۲-۵-۵ روش‌های مدل‌سازی عددی تزریق جبران کننده ۴۱
۲-۵-۵-۱ بازگرداندن ساختمان کج شده به حالت اولیه با استفاد از تزریق جبران کننده ۴۳
۲-۵-۵-۲ کاهش نشست ساختمان با استفاده از تزریق جبران کننده ۴۶
۲-۵-۵-۳ کاهش نشست و انحراف یک سازه در اثر حفر تونل ۵۰
۲-۶ خلاصه و جمع بندی ۵۳

فصل سوم: آشنایی با نرم افزار PLAXIS و شرح انجام مدل‌سازی تزریق جبران کننده

۳-۱ مقدمه ۵۵

۳-۲ تحلیل کرنش مسطح و تقارن محوری ۵۶

۳-۳ عناصر محیط خاکی یا سنگی ۵۶

۳-۴ عناصر صفحه ۵۷

۳-۵ مدل‌های رفتاری خاک ۵۸

۳-۵-۱ مدل مور-کولمب ۵۹

۳-۶ ویژگی‌های نرم افزار Plaxis ۶۲

۳-۷ مدل مطرح شده برای شبیه سازی تزریق جبران کننده ۶۳

۳-۷-۱ مشخصات محیط و مدل در نظر گرفته شده ۶۵

۳-۷-۲ مدل‌سازی حالت‌های مختلف تزریق جبران کننده پیش از حفر تونل ۶۸

۳-۷-۲-۱ مدل‌سازی تزریق جبران کننده در حالت اول، پیش از حفر تونل ۶۹

۳-۷-۲-۲ مدل‌سازی تزریق جبران کننده در حالت دوم، پیش از حفر تونل ۷۰

۳-۷-۲-۳ مدل‌سازی تزریق جبران کننده در حالت سوم، پیش از حفر تونل ۷۱

۳-۷-۳ مدل‌سازی حالت‌های مختلف تزریق جبران کننده پس از حفر تونل ۷۲

۳-۷-۳-۱ مدل‌سازی تزریق جبران کننده در حالت اول پس از حفر تونل ۷۵

۳-۷-۳-۲ مدل‌سازی تزریق جبران کننده در حالت دوم پس از حفر تونل ۷۵

۳-۷-۳-۳ مدل‌سازی تزریق جبران کننده در حالت سوم پس از حفر تونل ۷۶

۳-۸ خلاصه و جمع بندی ۷۶

فصل چهارم: شرح و نتایج پژوهش

۴-۱ مقدمه ۷۸

۴-۲ محاسبات شبیه سازی تزریق جبران کننده در فاز پیش از حفر تونل ۷۸

۴-۲-۱ محاسبات شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت اول ۷۹

۴-۲-۱-۱ نتایج شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت اول ۸۰

۴-۲-۲ محاسبات شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت دوم ۸۵

۴-۲-۲-۱ نتایج شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت دوم ۸۶

۴-۲-۳ محاسبات شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت سوم ۹۱

۴-۳ محاسبات شبیه سازی تزریق جبران کننده در فاز پس از حفر تونل ۹۵

۴-۳-۱ محاسبات شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت اول ۹۶

۴-۳-۱-۱ نتایج شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت اول ۹۶

۴-۳-۲ محاسبات شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت دوم ۹۹

۴-۳-۲-۱ نتایج شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت دوم ۱۰۰

۴-۳-۳ محاسبات شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت سوم ۱۰۳

۴-۳-۳-۱ نتایج شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت سوم ۱۰۴

۴-۴ خلاصه و جمع بندی ۱۰۷

فصل پنجم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

۵-۱ مقدمه ۱۰۹

۵-۲ نتیجه گیری ۱۱۱

۵-۳ ارائه پیشنهاد برای پژوهش‌های بعدی ۱۱۵

۵-۴ خلاصه و جمع بندی ۱۱۶

منابع ۱۱۷

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱ اثر طرح‌های بهسازی زمین بر خواص آن ۸
جدول ۲-۲ انواع دوغاب قابل کاربرد برای تزریق انواع مختلف زمین ۱۹
جدول ۲-۳ انواع روش‌های تزریق ۱۹
جدول ۲-۴ مقایسه سه سیستم روش‌های تزریق جت.....۲۷
جدول ۲-۵ مطالعه موردی از تزریق جبران کننده.....۴۱
جدول ۲-۶ مخلوط دوغاب برای برنامه تزریق ۴۴
جدول ۲-۷ خواص خاک استفاده شده در تحلیل ۴۷
جدول ۳-۱ پارامترهای ژئوتکنیکی خاک ماسه رس دار قبل و بعد از تزریق دوغاب.....۶۷
جدول ۳-۲ خصوصیات سازه (پوشش) تونل ۶۷
جدول ۳-۳ کرنش‌های حجمی بکار برده شده در منطقه تزریق شده در حالت اول (المان تزریق) ۷۵
جدول ۳-۴ کرنش‌های حجمی بکار برده شده در منطقه تزریق شده در حالت دوم (المان تزریق).....۷۶
جدول ۳-۵ کرنش‌های حجمی بکار برده شده در منطقه تزریق شده در حالت سوم (المان تزریق).....۷۶
جدول ۴-۱ محاسبات مدل‌سازی تزریق جبران کننده در حالت اول پیش از حفر تونل سطحی ۸۰
جدول ۴-۲ محاسبات مدل‌سازی تزریق جبران کننده در حالت دوم پیش از حفر تونل سطحی.....۸۵
جدول ۴-۳ محاسبات مدل‌سازی تزریق جبران کننده در حالت سوم پیش از حفر تونل سطحی ۹۲
جدول ۴-۴ محاسبات مدل‌سازی تزریق جبران کننده در حالت اول پس از حفر تونل سطحی.....۹۶
جدول ۴-۵ محاسبات مدل‌سازی تزریق جبران کننده در حالت دوم پس از حفر تونل سطحی ۱۰۰
جدول ۴-۶ محاسبات مدل‌سازی تزریق جبران کننده در حالت سوم پس از حفر تونل سطحی..... ۱۰۴

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱ نمودار طرح کلی مکانیزم تزریق دوغاب در خاک ۱۱

شکل ۲-۲ طرح کلی تزریق دوغاب از طریق لوله تزریق TAM ۱۷

شکل ۲-۳ اصول و روش‌های تزریق ۱۸

شکل ۲-۴ انواع روش‌های تزریق در خاک.....۲۱

شکل ۲-۵ محدوده‌ای از کاربرد روش‌های تزریق در خاک ۲۱

شکل ۲-۶ طرح کلی مکانیزم تزریق نفوذی.....۲۲

شکل ۲-۷ نمودار طرح کلی مکانیزم برش و مخلوط شدن در روش تزریق جت ۲۴

شکل ۲-۸ محدوده‌ای از خاک بهبود پذیر در تزریق جت ۲۴

شکل ۲-۹ سیستم‌های مختلف تزریق جت ۲۵

شکل ۲-۱۰ طرح کلی مکانیزم تزریق شکست هیدرولیکی ۲۸

شکل ۲-۱۱ محدوده‌ای خاک بهبود پذیر در تزریق شکست هیدرولیکی.....۲۹

شکل ۲-۱۲ نمودار طرح کلی مکانیزم تزریق تراکمی.....۳۰

شکل ۲-۱۳ محدوده‌ای خاک بهبود پذیر در تزریق تراکمی.....۳۱

شکل ۲-۱۴ نمودار طرح کلی مکانیزم شکست هیدرولیکی برای تزریق در خاک.....۳۴

شکل۱۵-۲ اصول کلی تزریق جبران کننده: تزریق دوغاب با استفاده از TAMs برای جلوگیری از نشست‌های که ممکن است به سبب ساخت‌وساز های زیرزمینی رخ بدهد ۳۵

شکل ۲-۱۶ نمودار مفهومی از تزریق جبران کننده و استفاده از TAM (الف) پلان تزریق و (ب) مقطع تزریق ۳۶

شکل ۲-۱۷ جابجایی خاک توسط تزریق جبران کننده.....۳۸

شکل ۲-۱۸ مفهومی از مدل‌سازی روند تزریق جبران کننده در خاک: (الف) اولین مرحله از تزریق (ب) اولین شکستگی (ج) نفوذ دوغاب به داخل شکستگی، دوغاب با وسکوزیته کم (د) نفوذ دوغاب به داخل شکستگی، دوغاب با وسکوزیته زیاد ۳۹
شکل ۲-۱۹ پروفیل زیر سطحی، زیر زمین و لوله تزریق ۴۴
شکل ۲-۲۰ تغییرات بازده‌های تزریق، نشست و بالا بردن مانیتورینگ شده ۴۵
شکل ۲-۲۱ شبکه اجزاء محدود برای مدل‌سازی تزریق جبران کننده ۴۵
شکل ۲-۲۲ تغییرات بازدهی‌های تزریق، نشست و بالا بردن شبیه سازی شده ۴۶
شکل ۲-۲۳ عملکرد تزریق (الف) قبل از تزریق شکستگی (ب) بعد از تزریق شکستگی ۴۶
شکل ۲-۲۴ طرح کلی سوراخ‌های تزریق دوغاب ۴۷
شکل ۲-۲۵ منحنی‌های تغییر شکل بالاآمدگی ساختمان در طی عملیات تزریق جبران کننده ۴۸
شکل ۲-۲۶ شبکه بندی تفاضل محدود و طرح ریزی حباب‌های دوغاب (الف) شبکه بندی تفاضل محدود (ب) در طول محور ۱۲ (ج) در طول محور ۱۳ ..... ۴۹
شکل ۲-۲۷ بالاآمدگی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده ۴۹
شکل ۲-۲۸ شرایط مجاور ساختمان قدیمی کج شده الف) پلان حفر تونل سپر دار و ساختمان‌های قدیمی کج شده ب) پروفیل زمین شناسی ۵۰
شکل ۲-۲۹ نشست سطحی به واسطه نسبت کاهش حجم مختلف زمین ۵۱
شکل ۲-۳۰ موقعیت لوله‌های تزریق و اثر تزریق هر لوله در میزان نشست ساختمان ۵۲
شکل ۲-۳۱ اندازه‌گیری میدانی تغییر مکان ساختمان و لوله به سبب تزریق دوغاب از سوراخ‌های مختلف تزریق ۵۲
شکل ۳-۱ الگوهای تحلیلی نرم افزار الف) الگوی تقارن محوری ب) الگوی کرنش صفحه‌ای ۵۶
شکل ۳-۲ موقعیت گره‌ها در عناصر شش گرهی و ۱۵ گرهی ۵۷
شکل ۳-۳ مثال شماتیک برای استفاده از عناصر صفحه ۵۷

شکل ۳-۴ موقعیت گره‌ها و نقاط تنش در المان تیر سه گرهی و پنج گرهی.....۵۷
شکل ۳-۵ نمودار تنش-کرنش مدل مور-کولمب با رفتار الاستیک-کاملاً پلاستیک ۵۹
شکل ۳-۶ پوسته جاری شدن معیار مور-کولمب در فضاهای تنش‌های اصلی.....۶۰
شکل ۳-۷ نمودار تنش انحرافی در برابر کرنش.....۶۰
شکل ۳-۸ دایره تنش مور به همراه منحنی پوش کولمب.....۶۱
شکل ۳-۹ مدل‌سازی ساده روند تزریق و تعریف منطقه تزریق شده.....۶۵
شکل ۳-۱۰ هندسه مسئله تزریق جبران کننده.....۶۶
شکل ۳-۱۱ جزئیات مربوط به نحوه تزریق دوغاب به ماسه در آزمایشگاه ۶۷
شکل ۳-۱۲ نمایش حالت‌های مختلف تزریق دوغاب پیش از حفر تونل الف) در اطراف تونل ب) ناحیه بالای تونل ۶۸
شکل ۳-۱۳ منطقه تزریق شده در اطراف تونل در الف) واقعیت ب) شبیه سازی ۶۹
شکل ۳-۱۴ نمایش حالت‌های مختلف منطقه تزریق شده در اطراف تونل در شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت اول ۷۰
شکل ۳-۱۵ نمایش حالت‌های مختلف منطقه تزریق شده در اطراف تونل در شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت دوم.....۷۱
شکل ۳-۱۶ نمایش حالت‌های مختلف منطقه تزریق شده در اطراف تونل در شبیه سازی تزریق جبران کننده در حالت سوم ۷۱
شکل ۳-۱۷ تزریق جبران کننده از طریق شفت در بالای تونل پس از حفر تونل ۷۲
شکل ۳-۱۸ طرح ساده‌ای از شبیه سازی تزریق جبران کننده پس از حفر تونل ۷۳
شکل ۳-۱۹ اعمال کرنش‌های از پیش مشخص شده به مرز المان‌های تزریق دوغاب.....۷۴
شکل ۳-۲۰ افزایش سختی منطقه تزریق شده ۷۴

شکل ۴-۱ منحنی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل سطحی و اثر تزریق جبران کننده پیش از حفر تونل سطحی ۷۹
شکل ۴-۲ منحنی نشست سطح زمین قبل و بعد از تزریق در موقعیت و ضخامت‌های متفاوت در حالت اول تزریق ۸۱
شکل ۴-۳ منحنی تغییرات حداکثر نشست سطح زمین قبل و بعد از تزریق دوغاب در حالت اول تزریق ۸۲
شکل ۴-۴ منحنی تغییرات بازده تزریق در موقعیت و ضخامت‌های متفاوت در حالت اول تزریق ۸۳
شکل ۴-۵ تغییرات بازده تزریق در برابر حداکثر نشست سطح زمین در موقعیت و ضخامت‌های متفاوت حالت اول تزریق ۸۳
شکل ۴-۶ حجم بالاآمدگی ایجاد شده در هر کدام از موقعیت‌های تزریق در ضخامت‌های متفاوت ۸۴
شکل ۴-۷ منحنی نشست سطح زمین قبل و بعد از حفر تونل در زاویه‌ها و ضخامت‌های متفاوت در حالت دوم ۸۷
شکل ۴-۸ منحنی تغییرات حداکثر نشست سطح زمین قبل و بعد از تزریق دوغاب در حالت دوم تزریق ۸۸
شکل ۴-۹ منحنی تغییرات بازده تزریق در موقعیت و ضخامت‌های متفاوت در حالت دوم تزریق ۸۹
شکل ۴-۱۰ تغییرات بازده تزریق در برابر حداکثر نشست سطح زمین در موقعیت و ضخامت‌های متفاوت حالت دوم تزریق ۹۰
شکل ۴-۱۱ حجم بالاآمدگی ایجاد شده در هر کدام از زاویه‌های مختلف تزریق در ضخامت‌های متفاوت ۹۱
شکل ۴-۱۲ منحنی نشست سطح زمین قبل و بعد از حفر تونل در موقعیت و ضخامت‌های متفاوت در حالت سوم ۹۳
شکل ۴-۱۳ منحنی تغییرات حداکثر نشست سطح زمین قبل و بعد از تزریق دوغاب در حالت سوم تزریق ۹۴
شکل ۴-۱۴ منحنی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل سطحی در اثر تزریق جبران کننده ۹۵

شکل ۴-۱۵ منحنی نشست سطح زمین در اثر تزریق جبران کننده بعد از حفر تونل در شرایط و عمق‌های متفاوت در حالت اول (الف) $D_g = 5$ m (ب) $D_g = 7.5$ m ۹۷
شکل ۴-۱۶ تغییرات بازده تزریق نسبت به حجم دوغاب تزریق شده در حالت اول تزریق ۹۸
شکل ۴-۱۷ تغییرات بازده تزریق نسبت به حداکثر نشست سطح زمین در حالت اول تزریق ۹۸
شکل ۴-۱۸ تغییرات نیروی محوری و لنگر خمشی در پوشش تونل قبل و بعد از تزریق برای حالت اول تزریق ۹۹
شکل ۴-۱۹ منحنی نشست سطح زمین در اثر تزریق جبران کننده بعد از حفر تونل در شرایط و عمق‌های متفاوت در حالت دوم (الف) $D_g = 5$ m (ب) $D_g = 7.5$ m ۱۰۱
شکل ۴-۲۰ تغییرات بازده تزریق نسبت به حجم دوغاب تزریق شده در حالت دوم تزریق..... ۱۰۲
شکل ۴-۲۱ تغییرات بازده تزریق نسبت به حداکثر نشست سطح زمین در حالت دوم تزریق..... ۱۰۳
شکل ۴-۲۲ تغییرات نیروی محوری و لنگر خمشی در پوشش تونل قبل و بعد از تزریق برای حالت دوم تزریق ۱۰۳
شکل ۴-۲۳ منحنی نشست سطح زمین در اثر تزریق جبران کننده بعد از حفر تونل در شرایط و عمق‌های متفاوت در حالت سوم (الف) $D_g = 5$ m (ب) $D_g = 7.5$ m..... ۱۰۵
شکل ۴-۲۴ تغییرات بازده تزریق نسبت به حجم دوغاب تزریق شده در حالت سوم تزریق..... ۱۰۶
شکل ۴-۲۵ تغییرات بازده تزریق نسبت به حداکثر نشست سطح زمین در حالت سوم تزریق..... ۱۰۶
شکل ۴-۲۶ تغییرات نیروی محوری و لنگر خمشی در پوشش تونل قبل و بعد از تزریق برای حالت سوم تزریق ۱۰۷
شکل ۵-۱ بهترین موقعیت برای اجرای تزریق جبران کننده پیش از حفر تونل سطحی..... ۱۱۴

۱

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

از مهمترین مسائل در حفاری تونل‌های سطحی در زمین‌های نرم در نواحی شهری مساله‌ی نشست زمین و تاثیر آن بر سازه و تاسیسات شهری مجاور می‌باشد. اثرات مخرب وارده، به گستره‌ی پروفیل نشست سطحی و میزان آن وابسته است. اثرات این تغییر مکان باید بر سازه‌های سطحی و سازه‌های مدفون و سرویس دهی آنها بررسی شده و در صورت نیاز و بیشتر شدن نشست سطحی از حد مجاز از آن جلوگیری شود. به منظورکاهش نشست زمین در اثر حفر تونل در مناطق شهری و تحمل بار، می‌توان از بهسازی خاک اطراف تونل بهره جست. روش‌های مختلفی برای بهسازی زمین وجود دارد که درمیان آنها، تزریق از تنوع گوناگونی از نظر تکنیک برخوردار است. اما امروزه با گسترش و توسعه روش‌های تزریق، می‌توان از آن برای کم کردن نشست زمین در اثر عملکرد حفاری‌های زیرزمینی و تونل و تقویت کردن زمین استفاده کرد. در اثر تزریق، نفوذپذیری و تغییرشکل پذیری لایه‌ها کم و در عوض مقاومت آن بالا می‌رود.

یکی از انواع تزریق، تزریق جبران کننده می‌باشد. در عمل، در حال حاضر، تزریق جبران کننده به عنوان تزریق سوسپانسیون‌های دارای ذرات ریز با گرانروی متوسط تا زیاد به داخل زمین، بین حفاری‌های زیر سطحی و یک ساختمان تعریف می‌شود. در اثر آن نشست‌های ساختمان به علت حفاری در حال انجام، خنثی و کاهش می‌یابد. برای دستیابی به این هدف، دوغاب‌های مناسب با فشار زیادی به منظور جابجایی زمین با شکستگی هیدرولیکی موضعی یا متراکم کردن تزریق می‌شوند.

۱-۲ زمینه تحقیق

مناسب‌ترین روش توسعه پایدار در محیط‌های شهری استفاده از فضاهای زیرزمینی برای کاربردهای مختلف حمل و نقلی و ارتباطی است. عبور تونل از مجاورت و یا عبور مستقیم از زیر سازه‌های سطحی امری اجتناب ناپذیر است. لذا نشست حاصل از حفاری و اثرات آن بر سازه‌های سطحی همواره نگرانی اصلی طراحان و مسئولان را در فضاهای شهری را شامل می‌شود. در صورت تجاوز تغییر مکان‌ها از حد مجاز، گاه خسارت سنگین مالی به سازه‌های مجاور وارد می‌شود. اقدامات کاهشی زیادی برای کنترل و کاهش نشست در طی ساخت‌وسازهای زیرزمینی استفاده می‌شود. یکی از این اقدامات کاهشی مهم، تزریق جبران کننده می‌باشد. هدف اولیه از این روش‌های تزریق، کاهش تغییر مکان‌های به وجود آمده در اثر حفاری‌های زیرزمینی و بهبود بخشیدن مقاومت و تغییر شکل‌های خاک‌های نرم قبل از شروع حفاری می‌باشد. تزریق جبران کننده یا اصلاح کننده از سال ۱۹۳۰ میلادی برای جبران نشست خاک در مکان‌های مختلف استفاده شده است. این روش در سال ۱۹۹۰ میلادی برای جبران نشست ساختمان به سبب حفر تونل بهبود یافت و کاربردی موفقیت آمیزی در پروژه های مختلف داشته است. به عنوان مثال، می‌توان به پروژه‌های متروی شهر ونیز ایتالیا، مترو رودخانه سن کلر (Saint Clair) در نزدیکی مرز آمریکا و کانادا، گسترش خط متروی Jubilee در لندن و خط زیرزمینی شهر لیزبون پرتغال اشاره کرد. به دلیل تاثیر تزریق جبران کننده در کاهش نشست سطح زمین، تاکنون پژوهشگران و مهندسان تلاش کرده‌اند تا سازوکار این روش را در کاهش نشست سطح زمین مخصوصاً در اثر حفر تونل‌های سطحی درک کنند. بدین منظور تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام و روش‌های گوناگونی برای اجرای تزریق جبران کننده ارائه شده است.

تزریق جبران کننده معمولاً در سه مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول که پیش شرط تزریق نامیده می‌شود، زمین آماده سازی می‌شود با استفاده از تزریق دوغاب تا زمانی که تغییر مکانی کوچک در سطح زمین مشاهده شود، اجرا شده و زمین را برای مرحله دوم تزریق آماده می‌کند و تضمین می‌کند که هر تزریق پس از آن بی درنگ موثر باشد. در مرحله دوم، دوغاب همزمان با پیشروی تونل تزریق می‌شود

(روندی که به تزریق همزمان نسبت داده می‌شود). این مرحله با رفتارنگری دقیق تغییر مکان‌های سطح زمین یا ساختمان‌های موجود در سطح زمین کنترل می‌شود. سومین مرحله از تزریق ممکن است به زمان بیشتری بعد از تکمیل تونل به منظور جبران نشست‌های تحکیم احتیاج داشته باشد. بیشتر مدل‌سازی عددی منتشر شده تزریق جبران کننده، محدود به مرحله دوم شده است و تحقیقات پیشین در این زمینه عموماً بر اساس استفاده از روش «کرنش از پیش مشخص شده»[۱] و روش «فشار از پیش مشخص شده»[۲] برای مدل‌سازی تزریق بوده است.

۱-۳ فرضیه‌ها و مسائل تحقیق

موضوع این پایان نامه، مطالعه عددی کنترل و کاهش نشست سطح زمین در اثر حفر تونل‌های سطحی با استفاده از تزریق جبران کننده است. شبیه سازی تزریق جبران کننده در این پژوهش در دو فاز متفاوت انجام شده است. در فاز اول، تزریق جبران کننده پیش از حفر تونل سطحی انجام شده است. هدف از شبیه سازی تزریق جبران کننده در این فاز، جلوگیری از نشست‌های که ممکن است در اثر حفر تونل سطحی بوجود آید، می‌باشد. شبیه سازی در این فاز، در سه حالت متفاوت در نظر گرفته شده است که در هر حالت، منطقه‌ی تزریق شده در موقعیت و ضخامت متفاوتی در نظر گرفته شده است. در فاز دوم، شبیه سازی تزریق جبران کننده پس از حفر تونل سطحی انجام شده است. هدف از شبیه سازی دراین فاز، کاهش نشست‌های که در اثر حفر تونل سطحی بوجود آمده است، می‌باشد. شبیه سازی در این فاز، در سه حالت متفاوت در نظر گرفته شده است. تفاوت در این سه حالت، در عمق منطقه‌ی تزریق، شعاع گسترش دوغاب و کرنش حجمی بکار برده شده در منطقه‌ی تزریق شده می‌باشد.

در این پژوهش، جهت شبیه سازی تزریق جبران کننده در دو فاز، از خاک ماسه‌ای رس‌دار که اطلاعات ژئوتکنیکی آن قبل و بعد از تزریق دوغاب موجود بود، استفاده شده است.

---

۱ - Prescribed strain

۲ - Prescribed pressure