



دانشکده پردیس بین‌الملل

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

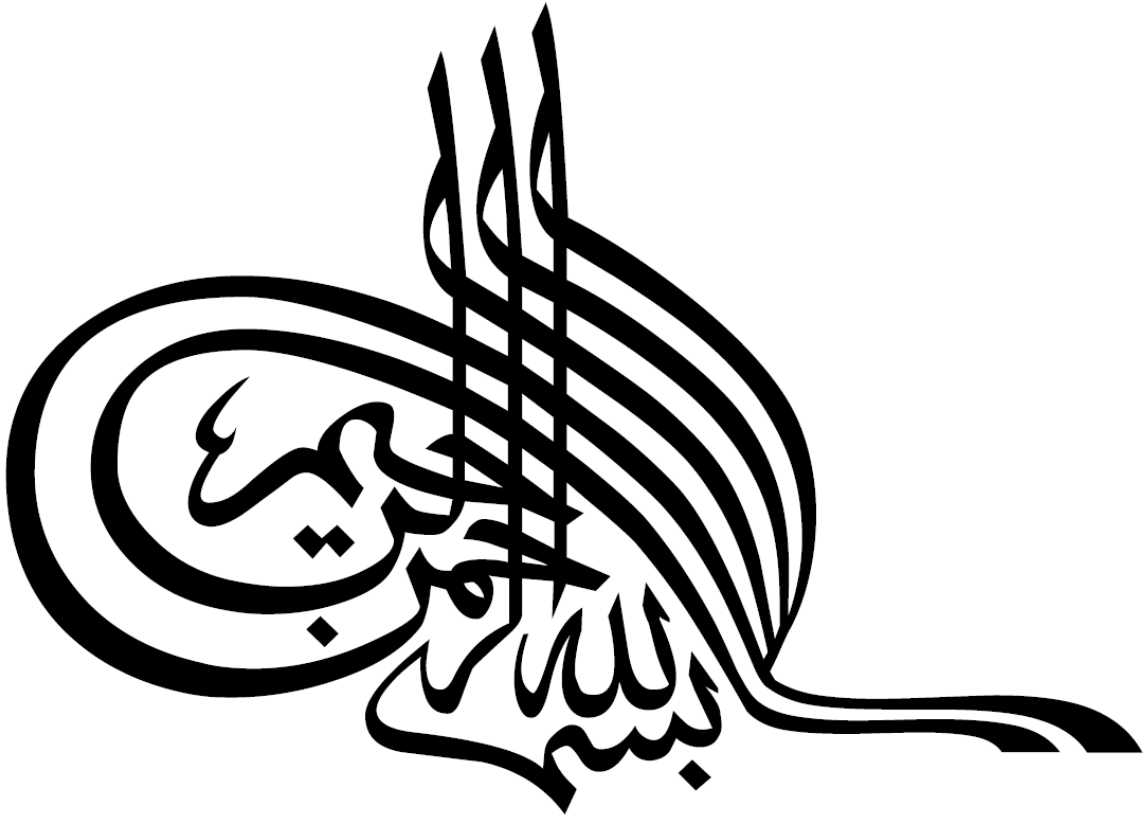
# ارزیابی نشست ناشی از حفر تونل خط دو متروی کرج با استفاده از داده‌های رفتارسنجی و شبیه‌سازی عددی

علی برنجی طهرانی

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم‌زاده

مهر ماه ۱۳۹۱



دانشکده پردیس بین‌الملل

مهندسی عمران - خاک و پی

ارزیابی نشست ناشی از حفر تونل خط دو متروی  
کرج با استفاده از داده‌های رفتارسنجی و  
شبیه‌سازی عددی

علی برنجی طهرانی

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم‌زاده

استاد مشاور:

مهندس محمد خسرو تاش



باسپاس بسیار از استاد کراتقدر، جناب آقای دکتر قاسم زاده که اینجانب را به طور مستمر در تمامی مراحل این تحقیق، هدایت و راهنمایی نمودند.

تقدیم به پدر و مادر مهربانم که بیچ‌گناه در زندگی تنه‌ایم نگذاشتند و همواره بزرگترین پشتوانه‌ام بوده‌اند.

تقدیم به جناب آقای مهندس خسرو تاش که کمک‌های ایشان در این راه، مایه دلگرمی‌ام بود.

و تقدیم به جامعه مهندسی تونل؛ امید است که این تحقیق، گلی ناچیز در راستای پیشرفت هر چه بیشتر این علم در کشور باشد.

فصل اول: پیشگفتار

۱	۱-۱ پیشگفتار
۲	۲-۱ هدف از این تحقیق
۲	۳-۱ مراحل انجام تحقیق

فصل دوم: حفر تونل و تعیین نشست سطحی زمین

۴	۱-۲ مقدمه
۴	۲-۲ جابجایی زمین ناشی از تونلسازی
۴	۲-۲-۱ تخریب سازه‌های موجود در اثر حفر تونل
۶	۲-۲-۲ اثرات ساخت تونل
۶	۲-۳ واکنش زمین به ساخت تونل
۷	۲-۳-۱ روش جدید تونل‌زنی اتریشی
۸	۲-۳-۲ اصول کلی روش جدید تونل‌زنی اتریشی
۱۰	۲-۳-۳ نحوه اجرای روش جدید تونل‌زنی اتریشی
۱۱	۲-۳-۴ جایگاه ابزاربندی در روش جدید تونل‌زنی اتریشی
۱۱	۲-۳-۵ کامل کردن حلقه سیستم نگهداری
۱۲	۲-۳-۶ تونل متروی کرج
۱۳	۲-۳-۶-۱ مکانیزم نشست سطح زمین
۱۴	۲-۴ پیشگفتاری بر روش‌های تحلیل نشست ناشی از حفر تونل
۱۵	۲-۵ تلاش‌های انجام گرفته برای پیش‌بینی نشست سطح زمین
۱۶	۲-۵-۱ مطالعات تجربی
۱۶	۲-۵-۱-۱ پروفیل عرضی نشست
۱۹	۲-۵-۱-۲ رفتار طولی
۱۹	۲-۵-۱-۳ تخمین حجم از دست رفته
۲۱	۲-۵-۲ پروفیل نشست حاصل از حفر دو تونل
۲۳	۲-۵-۳ کاربرد روش‌های عددی برای پیش‌بینی سطح زمین
۲۴	۲-۵-۳-۱ روش المان محدود
۲۵	۲-۵-۳-۲ روش المان مرزی
۲۵	۲-۵-۳-۳ روش تفاضل محدود
۲۶	۲-۵-۳-۴ روش المان مجزا
۲۷	۲-۶ جلوگیری از نشست به کمک تزریق دوغاب
۲۸	۲-۷ ریسک تخریب سازه‌های روزمینی ناشی از تونل‌سازی
۳۰	۲-۸ پیشگفتاری بر آنالیز احتمالاتی و قابلیت اطمینان در نشست ناشی از حفر تونل
۳۱	۲-۸-۱ روش‌های آنالیز احتمالاتی نشست ناشی از حفر تونل
۳۱	۲-۸-۱-۱ روش اطمینان‌سنجی مرتبه اول
۳۲	۲-۸-۱-۲ روش گشتاور دوم مرتبه اول
۳۲	۲-۸-۱-۳ روش تخمین نقطه‌ای

۳۲	۲ - ۸ - ۱ - ۴ روش شبیه‌سازی مونته کارلو
۳۳	۲ - ۸ - ۱ - ۵۴ روش اجزاء محدود تصادفی

### فصل سوم: اهمیت رفتارسنجی و بهینه‌سازی در سازه‌های زیرزمینی شهری

۳۴	۳ - ۱ پیشگفتار
۳۴	۳ - ۲ اهداف ابزاربندی و رفتارسنجی
۳۵	۳ - ۲ - ۱ رفتارسنجی قبل از اجرای تونل
۳۵	۳ - ۲ - ۲ رفتارسنجی در زمان اجرای تونل
۳۶	۳ - ۲ - ۳ رفتارسنجی در دوره بهره‌برداری
۳۶	۳ - ۳ ابزارهای رفتارسنجی در تونل
۳۶	۳ - ۳ - ۱ فشارسنج‌های خاک و بتون
۳۷	۳ - ۳ - ۲ تنش سنج شاکریت
۳۷	۳ - ۳ - ۳ کرنش‌سنج‌های نوع تار مرتعش
۳۷	۳ - ۳ - ۴ کشیدگی سنج درون‌گمانه‌ای
۳۸	۳ - ۳ - ۵ همگرایی سنج
۳۸	۳ - ۳ - ۶ ایستگاه‌های نشست‌سنجی
۴۱	۳ - ۴ نوع قرارگیری ابزارها در مقطع تونل‌های سنتی و مکانیزه در یک ایستگاه رفتارسنجی
۴۱	۳ - ۵ آرایش نصب ابزارها

### فصل چهارم: معرفی ویژگی‌های ژئومکانیکی و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در متروی کرج

۴۴	۴ - ۱ پیشگفتار
۴۴	۴ - ۲ مطالعات زمین‌شناسی عمومی و مهندسی
۴۴	۴ - ۲ - ۱ کلیات
۴۸	۴ - ۳ مشخصات سنگ‌شناسی ارتفاعات شمال شهر کرج
۴۹	۴ - ۴ رسوبات آبرفتی گستره شهر کرج
۴۹	۴ - ۵ زمین ساخت منطقه
۴۹	۴ - ۵ - ۱ گسله فشاری مشا
۵۰	۴ - ۵ - ۲ راندگی شمال تهران
۵۰	۴ - ۵ - ۳ راندگی پورکان - وردیج
۵۰	۴ - ۵ - ۴ راندگی باغستان
۵۰	۴ - ۵ - ۵ راندگی اشتهاارد
۵۱	۴ - ۶ شرایط زمین‌شناسی مهندسی محدوده پروژه
۵۲	۴ - ۷ وضعیت ژئوتکنیکی ساختگاه
۵۲	۴ - ۷ - ۱ لایه خاک دستی
۵۲	۴ - ۷ - ۲ لایه خاک ریزدانه ( $L1$ )
۵۲	۴ - ۷ - ۳ لایه خاک درشت‌دانه ( $L2$ )
۵۳	۴ - ۷ - ۳ - ۱ زیرلایه ( $L2-1$ )
۵۳	۴ - ۷ - ۳ - ۲ زیرلایه ( $L2-2$ )
۵۳	۴ - ۷ - ۳ - ۳ زیرلایه ( $L2-3$ )
۵۴	۴ - ۷ - ۴ خصوصیات فیزیکی لایه‌های خاک
۵۴	۴ - ۷ - ۴ - ۱ خصوصیات فیزیکی لایه خاک ریزدانه ( $L1$ )
۵۴	۴ - ۷ - ۴ - ۲ خصوصیات فیزیکی لایه خاک درشت‌دانه - زیرلایه اول ( $L2-1$ )



۵۵	۴ - ۷ - ۴ - ۳ خصوصیات فیزیکی لایه خاک درشت‌دانه - زیرلایه دوم (L2-2)
۵۵	۴ - ۷ - ۴ - ۴ خصوصیات فیزیکی لایه خاک درشت‌دانه - زیرلایه سوم (L2-3)
۵۶	۴ - ۷ - ۵ خصوصیات مکانیکی لایه‌های خاک
۵۶	۴ - ۷ - ۵ - ۱ خصوصیات مکانیکی لایه خاک ریزدانه (L1)
۵۷	۴ - ۷ - ۵ - ۲ خصوصیات مکانیکی لایه خاک درشت‌دانه - زیرلایه اول (L2-1)
۵۷	۴ - ۷ - ۵ - ۳ خصوصیات مکانیکی لایه خاک درشت‌دانه - زیرلایه دوم (L2-2)
۵۷	۴ - ۷ - ۵ - ۴ خصوصیات مکانیکی لایه خاک درشت‌دانه - زیرلایه دوم (L2-2)

#### فصل پنجم: شبیه‌سازی عددی نشست سطحی ناشی از حفر تونل متروی کرج

۵۹	۵ - ۱ پیشگفتار
۵۹	۵ - ۲ مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار <i>PLAXIS 3D Tunnel</i>
۵۹	۵ - ۲ - ۱ فرضیات و ساده‌سازی‌های مسئله
۶۰	۵ - ۲ - ۲ بررسی نشست ناشی از حفر تونل متروی کرج
۶۱	۵ - ۲ - ۳ خصوصیات و شرایط مدل
۶۱	۵ - ۲ - ۳ - ۱ خصوصیات ژئوتکنیکی مدل
۶۲	۵ - ۲ - ۳ - ۲ شرایط و مشخصات کلی اعمال شده در مدل نشست سطحی
۶۳	۵ - ۲ - ۴ نتایج نشست حاصل از مدل‌سازی حفاری تونل متروی کرج
۶۹	۵ - ۲ - ۵ حساسیت‌سنجی مدل نشست
۷۰	۵ - ۲ - ۵ - ۱ حساسیت مدل نشست نسبت به چسبندگی لایه‌های خاک
۷۱	۵ - ۲ - ۵ - ۲ حساسیت مدل نشست نسبت به زاویه اصطکاک داخلی لایه‌های خاک
۷۲	۵ - ۲ - ۵ - ۳ حساسیت مدل نشست نسبت به مرز پایینی مدل
۷۴	۵ - ۳ - ۲ مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار <i>MATLAB</i> (منطق فازی)
۷۶	۵ - ۳ - ۱ مدل‌سازی منطق فازی (سوجنو) برای تعیین نشست ناشی از حفر تونل مترو

#### فصل ششم: ارزیابی ریسک نشست ناشی از حفر تونل

۸۱	۶ - ۱ پیشگفتار
۸۳	۶ - ۲ روش بررسی شرایط ساختمان
۸۶	۶ - ۳ روش ارزیابی ریسک ساختمان
۹۳	۶ - ۴ تعریف قابلیت اطمینان
۹۳	۶ - ۵ تحلیل قابلیت اطمینان
۹۴	۶ - ۶ شبیه‌سازی مونته کارلو
۹۵	۶ - ۷ ضریب اطمینان در ارزیابی ریسک نشست
۹۶	۶ - ۸ اندیس قابلیت اطمینان در ارزیابی ریسک نشست
۹۷	۶ - ۹ تحلیل ریسک نشست ناشی از حفر تونل متروی خط دو کرج
۹۷	۶ - ۹ - ۱ تعریف مسئله
۱۰۲	۶ - ۹ - ۲ تحلیل ریسک نشست

#### فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۱۸	۷ - ۱ نتیجه‌گیری
۱۱۹	۷ - ۲ پیشنهادات

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۵	جدول ۱-۲: انواع روابط تجربی برای محاسبه نشست ناشی از حفر تونل
۲۲	جدول ۲-۲: روش‌های عددی در مهندسی مکانیک سنگ
۳۰	جدول ۳-۲: ارتباط میان آسیب‌دیدگی و کرنش کششی
۵۴	جدول ۱-۴: خصوصیات فیزیکی لایه خاک ریزدانه ( $L1$ )
۵۵	جدول ۲-۴: خصوصیات فیزیکی لایه خاک درشت‌دانه - زیرلایه اول ( $L2-1$ )
۵۵	جدول ۳-۴: خصوصیات فیزیکی لایه خاک درشت‌دانه - زیرلایه دوم ( $L2-2$ )
۵۶	جدول ۴-۴: خصوصیات فیزیکی لایه خاک درشت‌دانه - زیرلایه سوم ( $L2-3$ )
۵۶	جدول ۵-۴: خصوصیات مکانیکی لایه خاک ریزدانه ( $L1$ )
۵۷	جدول ۶-۴: خصوصیات مکانیکی لایه خاک درشت‌دانه - زیرلایه اول ( $L2-1$ )
۵۷	جدول ۷-۴: خصوصیات مکانیکی لایه خاک درشت‌دانه - زیرلایه دوم ( $L2-2$ )
۵۸	جدول ۸-۴: خصوصیات مکانیکی لایه خاک درشت‌دانه - زیرلایه سوم ( $L2-2$ )
۶۱	جدول ۱-۵: پارامترهای مربوط بتون شاتکریت بکار رفته در تونل متروی کرج
۷۰	جدول ۲-۵: تغییرات در چسبندگی لایه‌های خاک و نتایج نشست حاصل از آنها
۷۱	جدول ۳-۵: تغییرات در زاویه اصطکاک داخلی لایه‌های خاک و نتایج نشست حاصل از آنها
۷۳	جدول ۴-۵: تغییرات در فاصله تا مرز پایینی مدل و نتایج نشست حاصل از آنها
۷۶	جدول ۵-۵: توابع عضویت در مدل سوچنو
۸۷	جدول ۱-۶: جدول محاسبه اندیس آسیب‌پذیری
۹۱	جدول ۲-۶: طبقه‌بندی ریسک ارائه شده توسط برلند و همکاران
۹۲	جدول ۳-۶: طبقه‌بندی آسیب ارائه شده توسط رانکین
۹۲	جدول ۴-۶: جدول محاسبه پارامترهای کنترلی نشست مجاز و اعوجاج مجاز سازه‌های روزمینی
۹۸	جدول ۵-۶: پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی و نشست متناظر با آنها
۱۰۶	جدول ۶-۶: مقادیر اندیس قابلیت آسیب‌پذیری، نوع ریسک آسیب و پارامترهای کنترلی ساختمانهای کرج
۱۰۷	جدول ۷-۶: نتایج آنالیز احتمالی ریسک نشست ناشی از حفر تونل‌های متروی کرج در حالت کوتاه مدت
۱۱۶	جدول ۸-۶: آهنگ تغییر اندیس قابلیت اطمینان

## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

۵	شکل ۱-۲: سازه‌های متأثر از پروفیل نشست سطحی ناشی از تونلسازی
۵	شکل ۲-۲: تغییر سطح مقطع تونل از قبل حفاری شده به خاطر ساخت تونل جدید
۶	شکل ۳-۲: نمایش شماتیک تأثیر بالقوه سر و صدا و ارتعاش ناشی از حفاری
۱۳	شکل ۴-۲: مقطع تونل و آرایش سیستم نگهداری اولیه و ثانویه
۱۳	شکل ۵-۲: دستگاه حفار در حال حفر مقطع فوقانی تونل متروی کرج
۱۶	شکل ۶-۲: هندسه گود نشست حاصل از تونلسازی
۱۷	شکل ۷-۲: گود نشست عرضی
۲۲	شکل ۸-۲: شکل‌های مختلف گود نشست در بالای یک و دو تونل
۲۷	شکل ۹-۲: سیکل بارگذاری و باربرداری که موجب فشردگی و تراکم دائمی می‌گردد
۲۸	شکل ۱۰-۲: نشست‌های ناشی از فضای خالی به وجود آمده و پس از تزریق دوغاب به داخل آن
۲۹	شکل ۱۱-۲: تغییر مکان $\Delta$ در زون فشاری و زون کششی
۲۹	شکل ۱۲-۲: تغییر شکل و ترک‌های ناشی از برش $(a)$ و $(b)$ و ناشی از خمش $(c)$ و $(d)$
۳۸	شکل ۱-۳: همگرایی سنجی در یک تونل
۳۹	شکل ۲-۳: عملیات همگرایی سنجی در تونل متروی کرج
۳۹	شکل ۳-۳: بین‌های نشست سنجی
۴۰	شکل ۴-۳: نحوه نصب ایستگاه‌های نشست سنجی در محدوده خط دو متروی کرج
۴۰	شکل ۵-۳: نحوه قرائت ایستگاه‌های نشست سنجی در محدوده خط دو متروی کرج
۴۱	شکل ۶-۳: نمایش نصب تنش سنج شعاعی و مماسی در یک قطعه سگمنت بتونی یا شاتکریت
۴۲	شکل ۷-۳: طرح ایستگاه ابزاربندی برای تونل سنتی
۴۲	شکل ۸-۳: طرح ایستگاه ابزاربندی برای تونل‌های سنتی در خاک تحکیم نیافته کم عمق
۴۳	شکل ۹-۳: طرح ایستگاه ابزاربندی برای تونل‌های کند و پوش
۴۶	شکل ۱-۴: نمای کلی خط دو متروی کرج
۴۷	شکل ۲-۴: محل قرارگیری ایستگاه‌های A ، B و C
۴۷	شکل ۳-۴: محل قرارگیری ایستگاه‌های D ، E و F
۴۷	شکل ۴-۴: محل قرارگیری ایستگاه‌های G ، H و I
۴۷	شکل ۵-۴: محل قرارگیری ایستگاه‌های J ، K و M
۶۰	شکل ۱-۵: نمودار نشست سطحی تجمعی - تاریخ قرائت
۶۲	شکل ۲-۵: مقطع تونل و لایه‌های خاک منطقه
۶۴	شکل ۳-۵: نقاط مورد بررسی نشست بر روی سطح زمین و مرکز تاج تونل
۶۴	شکل ۴-۵: نمایی از مقطع تونل به همراه صفحات کناری در دو طرف تونل
۶۵	شکل ۵-۵: نمودارهای نشست در محل بین‌های نشست سنجی
۶۶	شکل ۶-۵: مقایسه نمودارهای نشست بدست آمده از ابزار دقیق و برنامه <i>PLAXIS 3D Tunnel</i>
۶۷	شکل ۷-۵: کنتورهای جابجایی حاصل از نشست در فاصله ۱۸ متری از نقطه شروع حفر تونل
۶۷	شکل ۸-۵: کنتورهای جابجایی حاصل از نشست در فاصله ۳D از محل توقف حفاری
۶۸	شکل ۹-۵: مقدار تنش‌های مؤثر در محدوده حفاری تونل متروی کرج
۶۹	شکل ۱۰-۵: نقاط پلاستیسیته در محدوده حفاری تونل متروی کرج
۷۱	شکل ۱۱-۵: نمودارهای نشست سطحی حاصل از تغییرات در مقدار چسبندگی (نقطه A)

- شکل ۵-۱۲: نمودارهای نشست سطحی حاصل از تغییرات در مقدار زاویه اصطکاک داخلی (نقطه A)
- شکل ۵-۱۳: نمودارهای نشست سطحی حاصل از تغییرات در فاصله تا مرز پایینی مدل (نقطه A)
- شکل ۵-۱۴: نمودار کلی یک مدل فازی
- شکل ۵-۱۵: متغیرهای ورودی و خروجی در مدل سوجنو مربوط به نشست زمین
- شکل ۵-۱۶: توابع عضویت مربوط به پارامتر چسبندگی خاک
- شکل ۵-۱۷: توابع عضویت مربوط به پارامتر زاویه اصطکاک داخلی
- شکل ۵-۱۸: توابع عضویت مربوط به پارامتر نشست
- شکل ۵-۱۹: ویراستار قانون فازی برای مدل سوجنو
- شکل ۵-۲۰: مرورگر قانون فازی برای مدل سوجنو
- شکل ۵-۲۱: مقایسه نتایج نشست در *PLAXIS* با *MATLAB*
- شکل ۶-۱: پارامترهای کنترلی که رفتار سازه روزمینی را در برابر نشست، کنترل می‌کنند
- شکل ۶-۲: رفتار احتمالی قسمت‌های مختلف ساختمان در حالت تغییر شکل‌های کششی
- شکل ۶-۳: روش کار شبیه‌سازی مونته کارلو در نرم‌افزار *Risk@*
- شکل ۶-۴: نسبت چسبندگی خاک به نشست متناظر در هر لایه
- شکل ۶-۵: نسبت زاویه اصطکاک داخلی خاک به نشست متناظر در هر لایه
- شکل ۶-۶: مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده نشست با نتایج مدل‌سازی عددی
- شکل ۶-۷: رویه سه‌بعدی پارامترهای مقاومتی لایه اول خاک و نشست زمین در گروه اول
- شکل ۶-۸: رویه سه‌بعدی پارامترهای مقاومتی لایه دوم خاک و نشست زمین در گروه اول
- شکل ۶-۹: رویه سه‌بعدی پارامترهای مقاومتی لایه سوم خاک و نشست زمین در گروه اول
- شکل ۶-۲۵: مقایسه اندیس‌های قابلیت اطمینان در دو حالت کوتاه‌مدت (*ST*) و بلندمدت (*LT*)
- شکل ۶-۲۶: رویه سه‌بعدی پارامترهای مقاومتی لایه اول خاک و اندیس‌های قابلیت اطمینان در ناحیه اول
- شکل ۶-۲۷: رویه سه‌بعدی پارامترهای مقاومتی لایه دوم خاک و اندیس‌های قابلیت اطمینان در ناحیه اول
- شکل ۶-۲۸: رویه سه‌بعدی پارامترهای مقاومتی لایه سوم خاک و اندیس‌های قابلیت اطمینان در ناحیه اول
- شکل ۶-۴۴: منحنی‌های پارامترهای مقاومتی خاک - اندیس قابلیت اطمینان در ناحیه اول
- شکل ۶-۴۵: منحنی‌های پارامترهای مقاومتی خاک - اندیس قابلیت اطمینان در ناحیه دوم
- شکل ۶-۴۶: منحنی‌های پارامترهای مقاومتی خاک - اندیس قابلیت اطمینان در ناحیه سوم
- شکل ۶-۴۷: منحنی‌های پارامترهای مقاومتی خاک - اندیس قابلیت اطمینان در ناحیه چهارم
- شکل ۶-۴۸: منحنی‌های پارامترهای مقاومتی خاک - اندیس قابلیت اطمینان در ناحیه پنجم
- شکل ۶-۴۹: منحنی‌های پارامترهای مقاومتی خاک - اندیس قابلیت اطمینان در ناحیه ششم
- شکل ۶-۵۰: منحنی‌های پارامترهای مقاومتی خاک - اندیس قابلیت اطمینان در تمامی نواحی با فرض ثابت بودن یکی از پارامترها

## چکیده

تونل متروی کرج در مسیری به طول ۲۵ کیلومتر در حال احداث می باشد. مطالعات ژئوتکنیکی در این بخش از مسیر تونل نشان می دهد که وضعیت ساختگاه زمین، شامل ذرات درشت دانه و ریزدانه می باشد. تونل مذکور به روش تونلسازی جدید اتریشی در سه مرحله حفاری شده است و جهت نگهداری و مراقبت از تونل در برابر بارهای وارده، از ۳۵ سانتی متر شاتکریت به همراه دو لایه مش وقاب از نوع شبکه های فولادی استفاده شده است. تونل متروی کرج جزء تونل های کم عمق محسوب می شود و حداکثر سربار موجود در این محدوده، ۱۰ الی ۱۱ متر می باشد.

به دلیل وجود ساختمانها و بافت قدیمی شهر و ترافیک سنگین در این محدوده، یکی از مسائل مهم در این پروژه، بررسی نشست های زمین می باشد که در حین حفاری تونل و پس از اتمام کار مورد نظر قرار گرفته است. جهت کنترل نشست زمین از سیستم تراز یابی دقیق در سطح زمین در باندی به عرض ۳۰ متر، استفاده شده است.

اطمینان از صحت انتخاب پارامترهای مقاومتی خاک به دست آمده از مطالعات ژئوتکنیکی، یکی از موضوعات مهم در سازه های زیرزمینی به خصوص در مقوله تونل سازی می باشد؛ همچنین بررسی صحت مدل سازی و آنالیز عددی و مقایسه آن با شرایط واقعی جهت بهینه سازی طرح، دارای اهمیت زیادی می باشد. بنابراین در این نوع مقایسه ها، آنالیزهای عددی و تغییر شکل های اندازه گیری شده، نتایج بسیار مهمی را به دست می دهند.

این پایان نامه، به تخمین نشست ناشی از حفر تونل متروی کرج با استفاده از نرم افزارهای *PLAXIS 3D Tunnel* و *Fuzzy Logic* در نرم افزار *MATLAB* و مقایسه نتایج آنها با یکدیگر و با نتایج حاصل از ابزار دقیق، می پردازد. همچنین حساسیت سنجی این نتایج نسبت به تغییرات پارامترهای مؤثر خاک، صورت می گیرد.

در ادامه، به ارزیابی ریسک نشست ناشی از حفر تونل بر روی سازه های روزمینی مجاور مسیر تونل، با استفاده از روشهای نوین مورد استفاده در صنعت تونل سازی همچون روش بررسی شرایط ساختمان (*BCS*) که مبتنی بر جمع آوری اطلاعات از تاریخچه سازه روزمینی و تهیه نقشه از نواقص سازه پیش از تونل سازی، در هنگام تونل سازی و همچنین پس از آن می باشد و منجر به ارزیابی قابلیت آسیب پذیری سازه روزمینی می شود. دیگر روش مورد استفاده در ارزیابی ریسک نشست، روش ارزیابی ریسک ساختمان (*BRA*) است که در آن به طبقه بندی آسیب های احتمالی در ساختمان ها پرداخته می شود و با استفاده از پارامترهای اندیس قابلیت اطمینان و پارامتر نوع ریسک آسیب، نشست مجاز و اعوجاج مجاز برای ساختمان ارائه می شود.

برای ارزیابی ریسک نشست، با استفاده از روش شبیه سازی مونته کارلو، حالات مختلف نشست در خاک های گوناگون منطقه، شبیه سازی می گردند و میزان ریسک موجود برای سازه های روزمینی در اطراف تونل، محاسبه و راهکارهای مناسب جهت کاهش یا جلوگیری از خطرات احتمالی، ارائه می شوند.

**کلید واژه:** تونل، نشست سطحی، تحلیل عددی، ابزار دقیق، شبیه سازی مونته کارلو، ارزیابی ریسک.

## **Abstract**

Karaj metro tunnel is being constructed in a route with a length of 25 km, using New Austrian Tunneling Method (NATM). Geotechnical studies of this site reveal that it contains both fine and coarse soil particles. The construction of this tunnel has three stages. For maintaining the tunnel against the loads of surrounding soils, a 35 cm shotcrete as well as two layered mesh and still frame are used. Karaj metro tunnel is considered as a shallow tunnel due to overburden with depth of 10 to 11 m in this area.

In view of the fact that there are too many buildings with old structures and also because of heavy traffic, one of the important issues in this project is analyzing ground settlement during the tunneling and after it. To control the ground settlement, a leveling benchmark system with a width of 30 m is used above the tunnel alignment, on the ground.

Confidence in accuracy of chosen soil strength parameters attained from geotechnical studies is an important factor in underground constructions as well as tunnels; furthermore, surveying the accuracy of model and numerical analysis and comparison of its results with occurred results in reality is very significant for optimizing the project. Thus, in these comparisons, numerical analyses and estimated deformations results are considerable outcomes.

This thesis is going to estimate the ground settlement due to Karaj metro tunnel excavation using nu PLAXIS 3D Tunnel and also Fuzzy Logic toolbox of MATLAB. Then the results of them is going to be compared with each other and with the results of geotechnical instrumentation. The sensitivity of the ground settlement will be examined toward the fluctuation of effective soil parameters.

Furthermore, risk assessment of ground settlement due to the tunneling is going to be applied by using up to date methods in tunneling industry such as BCS which is founded on the condition surveying of all buildings and certain inspectable utilities within the zone of influence of the underground construction works consist of distinct stages of surveying maps (prior to construction, during construction, and post-construction). The other method is named BRA where a specific damage classification for buildings is established to define the types of damage a building can undergo. Using vulnerability index and category of damage, this method specify the allowable settlement and allowable angular distortion of the buildings, as well.

To assess the risk of ground settlement, different types of soils will be simulated by Monte Carlo simulation and available risk for the buildings will be estimated and appropriate methods will be suggested to reduce or prevent the probable damages.

**Key Words:** Tunnel, Ground Settlement, Numerical Analysis, Geotechnical Instrumentation, Monte Carlo Simulation, Risk Assessment.



فصل اول

پیشگفتار

## ۱-۱ پیشگفتار

حفر تونل در اعماق کم و در زمین‌های خاکی منجر به ایجاد جابجایی‌های افقی و عمودی در اطراف تونل می‌گردد. این جابجایی‌ها می‌تواند به زمین رسیده و موجب آسیب رساندن به سازه‌های موجود در سطح زمین شود. بنابراین تخمین میزان نشست زمین در اثر حفر تونل در اعماق کم و به‌خصوص در محیط‌های شهری که مستقیماً با زندگی مردم در ارتباط می‌باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

امروزه موضوع تونل‌زنی هم در محیط سنگی و هم در محیط خاکی مطرح می‌باشد. هرچند ممکن است تونل‌های در محیط سنگی در مناطق کم عمق نیز حفر شوند، ولی غالباً این تونل‌ها در اعماق زمین حفر می‌گردند. در صورتی که محیط سنگی در مناطق کم عمق، فاقد ناپیوستگی‌های باشد و روش حفر تونل در این محیط‌ها، ناپیوستگی‌های حادی را به وجود نیاورد، به علت سرباره کمی که بالای این تونل‌ها وجود دارد، تونل از لحاظ پایداری مشکلی نخواهد داشت. در چنین تونل‌هایی مسئله نشست، چندان قابل توجه نیست، زیرا در سطح بالای این تونل‌ها، یا اصلاً نشست اتفاق نمی‌افتد و یا اگر هم بیافتد، مقدار آن بسیار ناچیز است. 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، تونل‌های حفر شده در مناطق کم عمق عمدتاً در محیط‌های آبرفتی و خاکی احداث می‌گردند و در این زمین‌ها، مسئله اصلی، حفاظت دیواره‌ها و سقف تونل است.

معروف‌ترین رابطه برای تعیین میزان و شکل نشست در سطح زمین، رابطه پک<sup>۱</sup> می‌باشد [۱]. پک، شکل گود نشست عرضی (در بالای مقطع تونل) را در سطح زمین در اثر حفر تونل‌های کم عمق، به صورت منحنی توزیع آماری نرمال (گاوسی) در نظر گرفت. گذشت زمان و اندازه‌گیری‌های مربوط به نشست، شکل پیشنهادی پک برای زمین‌هایی که بر روی آنها ساخت و ساز صورت نمی‌گیرد را تأیید کرد، اما شکل این منحنی برای شرایطی که زمین‌ها بکر نبوده و بر روی آنها ساخت و ساز صورت گرفته است، متفاوت می‌باشد. دو پارامتر مهم در تخمین گودی نشست، عمق و عرض آن می‌باشد. نقطه‌ای که بر روی منحنی نشست دارای انحنای صفر باشد از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا این نقطه گود، محدوده نشست را به دو قسمت فشاری و کششی تقسیم می‌کند. اکثر آسیب‌های که در اثر نشست به سازه‌های سطحی وارد می‌شود، در اثر تنش‌های کششی و ممان‌های خمشی می‌باشد که این نکته اهمیت نقطه بدون انحنا را آشکار می‌کند. از طرف دیگر برای جلوگیری از آسیب رسیدن به ساختمان‌ها در اثر نشست دو

Peck<sup>1</sup>



راه کلی وجود دارد. یکی جلوگیری از رسیدن جابجایی ایجاد شده در اطراف تونل به سطح زمین و دیگری تقویت ساختمان‌ها که معمولاً هر دو روش انجام می‌شود. تقویت ساختمان‌ها بر اساس آئین‌نامه‌های اجرایی صورت می‌گیرد. اما ایراد این آئین‌نامه‌ها، محافظه‌کارانه و تجربی بودن آنها است. در نتیجه آنالیز تونل و زمین اطراف آن، معمولاً صورت می‌پذیرد. آنالیز اندرکنش تونل - سازه‌های روزمینی هم از نظر اقتصادی و هم از نظر مسائل ایمنی مهم می‌باشد.

روش‌های عددی، گسترده‌ترین روش‌های محاسباتی برای مسائل مختلف مهندسی هستند. اگر قرار است مسئله پیچیده‌ای حل شود، استفاده از روش‌های عددی، مناسب‌ترین راه کار است. البته باید توجه داشت که نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی تا حد زیادی وابسته به میزان دانش طراحان، هم در رابطه با مسائل کلی ژئومکانیکی و هم ماهیت روش‌های عددی می‌باشد. مشخصه اصلی روش‌های عددی این است که یک سازه بزرگ به المان‌های نسبتاً کوچکی تقسیم می‌شود. سپس، معادلات مشخصه المان‌های منفرد و اندرکنش آنها برقرار می‌شود. سرانجام این معادلات به صورت همزمان با استفاده از رایانه، حل می‌شوند. نتایج حاصل از این نوع روش‌ها، شامل توزیع تنش و الگوی تغییر مکان در داخل سازه می‌باشد.

### ۱-۲ هدف از این پایان‌نامه

حرکات سطحی بر اثر حفر تونل‌های کم عمق و به خصوص در مناطق شهری و مسکونی، تفاوت زیادی با بروز این پدیده در تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی عمیق از قبیل معادن دارد. این تفاوت‌ها نه تنها به خاطر اختلاف در عمق و وجود لایه‌های مختلف زمین‌شناسی، بلکه به خاطر حساسیت نسبت به میزان نشست و اثرات احتمالی بر سازه‌های دیگر قابل توجه و بررسی است. هدف از این پایان‌نامه، بررسی نشست سطحی بر روی خاک در اثر حفاری تونل‌های شهری (متروها) به روش عددی است و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از ایستگاه‌های سنجش نشست به کمک ابزار دقیق، و همچنین معرفی راهکاری به روزتر در زمینه مدیریت ریسک نشست حاصل از حفر تونل مترو با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود، می‌باشد.

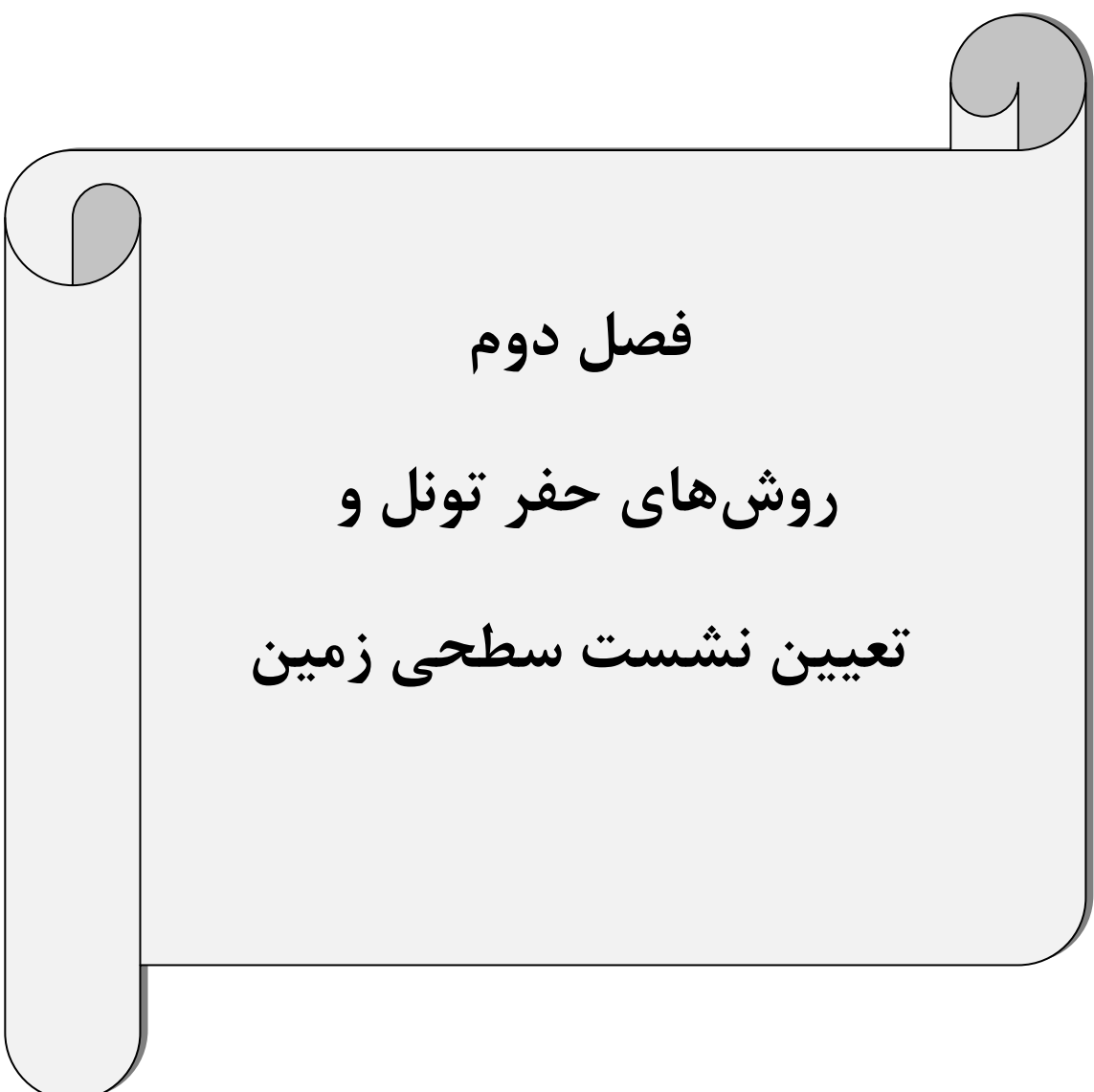
### ۱-۳ مراحل انجام تحقیق

در این تحقیق، قطعات ابتدایی خط دو متروی کرج، مورد تحلیل قرار گرفته است. برای این منظور، در فصل دوم، ضمن مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه نشست، روش‌های تحلیل میزان نشست، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در فصل سوم، در مورد اهمیت رفتارسنجی و کاربرد ابزار دقیق در سازه‌های زیرزمینی، توضیحاتی داده شده است.

در فصل چهارم، مطالعات امکان‌پذیری خط دو متروی کرج و مشخصات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه و به ویژه محدوده مورد بررسی در قطعات ابتدایی پروژه، آورده شده‌اند.

در فصل پنجم، ضمن بررسی عوامل مؤثر بر نشست، روند تحلیل عددی تونل در حالت استاتیکی، برای ارزیابی نشست، شرح داده شده و نتایج آن ارائه شده است. همچنین در این بخش، بررسی نشست ناشی از حفر تونل توسط یکی از روش‌های هوش مصنوعی، بر روی داده‌های محدوده خط دو متروی کرج، پرداخته شده است و نتایج حاصل از آن با روش عددی، مقایسه شده است.

در فصل ششم، با استفاده از داده‌های مدل شده توسط روش‌های عددی و هوش مصنوعی و همچنین روش آماری مونته کارلو، به ارزیابی ریسک نشست ناشی از حفر تونل مترو پرداخته شده است و ساختمان‌های محدوده اطراف تونل مترو، از لحاظ میزان مقاومت در برابر خطرات ناشی از نشست احتمالی، مورد بررسی قرار گرفته اند.



**فصل دوم**  
**روش‌های حفر تونل و**  
**تعیین نشست سطحی زمین**

## ۱-۲ پیشگفتار

به طور کلی حفر تونل در هر عمق از خاک منجر به تغییر سیستم توزیع تنش‌ها و همگرایی دهانه تونل و به وجود آمدن تغییرشکل‌هایی در سطح زمین می‌شود. این همگرایی قبل از رسیدن جبهه کار به مقطع مورد نظر آغاز می‌شود که شروع فاصله آن از فاصله‌ای در حدود شعاع تونل از جبهه کار می‌باشد و در فاصله‌ای در حدود سه برابر قطر تونل، این تأثیر محو می‌شود. پس از عبور جبهه کار از مقطع مورد نظر، تغییر مکان‌ها زیاد می‌شود. در تونل‌های کم‌عمق، تأثیر آن می‌تواند تا سطح زمین گسترش یابد و یک فرورفتگی (گود) نشست را در سطح زمین ایجاد نماید. این نشست برای سازه‌های موجود در مجاورت تونل، خطراتی را به همراه دارد. در محیط‌های شهری، این پدیده بر روی سازه‌های روزمینی و زیرزمینی تأثیر می‌گذارد.

## ۲-۲ جابجایی زمین ناشی از تونلسازی

حالات مختلفی وجود دارد که ساخت یک تونل جدید می‌تواند باعث تخریب سازه‌های مجاور گردد. این موارد شامل دو بخش است: نخست حالتی که سازه‌های موجود تحت تأثیر جابه‌جایی‌های زمین (مانند نشست) قرار می‌گیرند و دوم، تأثیر مراحل ساخت روی محیط مجاور (به عنوان مثال، با ایجاد ارزش و سر و صدا) می‌باشد [۲].

### ۱-۲-۲ تخریب سازه‌های موجود در اثر حفر تونل

جابه‌جایی زمین مؤلفه‌های مختلفی دارد که در تخریب سازه‌ها تأثیرگذار می‌باشند. نشست یکنواخت بعید است که مخاطراتی برای ساختمانها داشته باشد، اما می‌تواند خطرات جدی برای تجهیزات سرویس عمومی (مانند آب، برق، تلفن و غیره)، داشته باشد. در شکل (۱-۲) سازه‌های متأثر از پروفیل نشست سطحی ناشی از تونلسازی به صورت نشست یکنواخت، چرخش جسم صلب و تغییر شکل همراه با نرخ‌های تغییر شکل و جابه‌جایی‌های افقی نشان داده شده است. نمایش گودی نشست طولی که در جلو و پشت سینه کار تونل ایجاد می‌شود ممکن است به طور مساوی باعث تخریب ساختمان‌ها شوند ولی عددی کردن مقادیر آن بسیار مشکل می‌باشد. قطعیت کمی در مورد شکل گودی نشست وجود دارد و میزان نشستی که در جلوی سپر ایجاد می‌شود، وابسته به شیوه تونلسازی است.