وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه بین المللی امام خمینی

IMAM KHOMEINI
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دانشکده فنی و مهندسی

اثر روش های متداول حفاری تونل بر نشست های سطحی زمین

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی عمران

گرایش خاک و پی

احسان ایزدی

استاد راهنما:

دکتر رضا ضیائی موید

اسفند ماه ۱۳۹۰

ایران زمین

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه بین المللی امام خمینی

IMAM KHOMEINI
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دانشکده فنی و مهندسی

اثر روش های متداول حفاری تونل بر نشست های سطحی زمین

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی عمران

گرایش خاک و پی

احسان ایزدی

استاد راهنما:

دکتر رضا ضیائی موید

اسفند ماه ۱۳۹۰

بسمه تعالی

دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)
معاونت آموزشی دانشگاه- مدیریت تحصیلات تکمیلی
(فرم شماره ۲۶)

تعهد نامه اصالت پایان نامه

اینجانب **احسان ایزدی** دانشجوی رشته **عمران (گرایش خاک و پی)** مقطع تحصیلی **کارشناسی ارشد** بدین وسیله اصالت کلیه مطالب موجود در مباحث مطروحه در پایان نامه / رساله تحصیلی خود، با عنوان **اثر روش های متداول حفاری تونل بر نشست های سطحی زمین** را تأیید کرده، اعلام می نمایم که تمامی محتوی آن حاصل مطالعه ، پژوهش و تدوین خودم بوده و به هیچ وجه رونویسی از پایان نامه و یا هیچ اثر یا منبع دیگری، اعم از داخلی، خارجی و یا بین المللی، نبوده و تعهد می نمایم در صورت اثبات عدم اصالت آن و یا احراز عدم صحت مفاد و یا لوازم این تعهد نامه در هر مرحله از مراحل منتهی به فارغ التحصیلی و یا پس از آن و یا تحصیل در مقاطع دیگر و یا اشتغال و ... دانشگاه حق دارد ضمن رد پایان نامه نسبت به لغو و ابطال مدرک تحصیلی مربوطه اقدام نماید. مضافاً اینکه کلیه مسئولیت ها و پیامدهای قانونی و یا خسارت وارده از هر حیث متوجه اینجانب می باشد.

احسان ایزدی

دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)
معاونت آموزشی – مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم تاییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه/رساله

بدین وسیله گواهی میشود جلسه دفاعیه از پایان نامه کارشناسی ارشد **احسان ایزدی** دانشجوی رشته **عمران** گرایش **خاک و پی** تحت عنوان **اثر روش های متداول حفاری تونل بر نشست های سطحی زمین** در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۳ در دانشگاه برگزار گردید و این پایان نامه با نمره ..... و درجه ..... مورد تایید هیئت داوران قرار گرفت.

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه‌ی دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما				
۲	داور خارج				
۳	داور داخل				

نماینده تحصیلات تکمیلی		مهر و امضا

این رساله را به پدر بردبارم، مادر مهربانم و برادر دلسوزم تقدیم می کنم، که نه تنها در طول مدت تحصیلم بلکه در تمامی لحظات زندگی یار و یاور من بودند و همواره از تصمیماتم حمایت کردند تا راه سخت و ناهموار رفتن را برایم هموار تر سازند.
هرگز فداکاری هایشان را فراموش نخواهم کرد.

تقدیر و تشکر

این کار تحقیقاتی در قالب یک پایان نامه کارشناسی ارشد در سال های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۰ در دپارتمان مهندسی عمران (زیر گروه خاک و پی) در دانشکده ی فنی و مهندسی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) انجام شد. بی شک موفقیت این کار تحقیقاتی بدون کمک و حمایت افرادی که مایلم در ادامه از آن ها تشکر کنم، میسر نبود؛

مراتب سپاس و تشکر خود را به جناب آقای دکتر رضا ضیائی موید، استاد راهنمای عزیزم، تقدیم می دارم که راهنمایی های ایشان نه تنها در طول دوره ی کار بر روی پایان نامه ام، بلکه از آغاز ورودم به دانشگاه به عنوان دانشجوی کارشناسی، چراغ هدایتم بود. در طول مدت کار با ایشان آزادی لازم که برای ابراز خلاقیتم در پروژه های تحقیقاتی لازم داشتم را یافتم. از حمایت های بی دریغ ایشان در فراهم آوردن محیط کاری آرام و مناسب و همچنین ابزاری که جهت انجام پایان نامه ام نیاز داشتم، بسیار متشکرم. بی شک آشنایی با ایشان یکی از نقاط عطف زندگی من بوده است که سبب شد گام های بلندی در جهت پیشرفت های آکادمیک بردارم. امیدوارم که شاگرد قابلی برای ایشان بوده باشم.

از جناب آقای دکتر سید ابوالحسن نائینی، مدیر محترم گروه عمران، به دلیل راهنمایی های توام با صبر و حوصله ی ایشان در رفع مشکلاتم در مدت هفت سال تحصیلم در این دانشگاه صمیمانه قدردانی می نمایم. از اینکه افتخار همکاری در دو پروژه ی تحقیقاتی را با ایشان داشته ام بسیار خوشحالم. در طول همکاری با ایشان، تجربه های بسیار زیادی کسب کردم و اخلاق آکادمیک را به معنای واقعی کلمه دریافتم. مایه ی بسی خرسندی است که هر دو پروژه ی تحقیقاتی اشاره شده، هم اکنون به ثمر نشسته و تا چندی بعد از زمان نگارش پایان نامه ی حاضر، در مجلات معتبر بین المللی به چاپ خواهد رسید. از آن جایی که همکاری در زمینه های پژوهشی با ایشان جزء پر بار ترین و لذت بخش ترین لحظات زندگیم بوده است، بسیار مایلم که در آینده بتوانم باز هم افتخار همکاری با ایشان را داشته باشم.

از جناب آقای دکتر آرین آصف زاده، از دانشگاه پرینستون امریکا به خاطر زحمات خالصانه ای که در آموزش نرم افزار برایم کشیدند سپاسگزارم و برایشان آرزوی موفقیت دارم. از جناب آقای پروفسور یو(Chungsik Yoo) از دانشگاه Sungkyunkwan کره ی جنوبی به جهت صبر و حوصله ای که در پاسخگویی به سوالات مکررم از خود نشان دادند ممنونم. از جناب آقای پروفسور پیتر فرمییر (Pieter Vermeer) رئیس سابق انستیتو مهندسی ژئوتکنیک دانشگاه اشتوتگارت آلمان و آقای دکتر اسون مولر (Sven Möller)، پژوهشگر اسبق انستیتو مهندسی ژئوتکنیک دانشگاه اشتوتگارت به علت همکاری های و راهنمایی هایشان سپاسگزارم. از جناب آقای مهندس مهراد میرسپاهی، دوست عزیز و همراه همیشگیم، که همواره در مدت انجام این پایان نامه از کمک های بی دریغش بهره مند بودم کمال تشکر را دارم و برایش از صمیم قلب آرزوی موفقیت و شادکامی دارم.

بهمن ۱۳۹۰

احسان ایزدی

چکیده

افزایش جمعیت خصوصا در چند دهه اخیر و تراکم فزاینده در مناطق شهری از یک سو، و نیاز به دسترسی سریع به مناطق مختلف و سفر های درون شهری از سوی دیگر، مهندسان را ناگزیر به استفاده از فضا های زیر زمینی شهری ساخته است. بدیهی است که ساخت اینگونه فضا های زیر زمینی مخاطراتی را برای سازه های سطحی و زیر سطحی در بر خواهد داشت. که نادیده گرفتن آن می تواند خسارات جبران ناپذیر مالی و جانی را به بار آورد. تونلهایی که به منظور تسهیل و تسریع در حمل و نقل در نواحی شهری احداث می شوند، در اکثر موارد، از زیر ساختمان ها با کاربری مختلف شهری عبور مینمایند. حفاری این تونل ها سبب به وجود آمدن نشست هایی در سطح زمین می گردد که ممکن است به ساختمان های سطحی آسیب جدی وارد کند و آنها را از سرویس دهی خارج نماید. از آنجایی که قسمت قابل توجهی از این نشست ها در خلال فاز حفاری رخ میدهد، بسیار مهم است که روش های حفاری به نحوی موثر اصلاح و بهینه شوند تا نشست های سطحی و نتیجتا آسیب به سازه های سطحی به حداقل مقدار خود برسد. هدف از انجام این کار تحقیقی، بررسی تکنیک های متداول حفاری در حفاری تونل به روش جدید اتریشی – که خود روشی منشعب شده از روش های سنتی و دستی حفاری تونل می باشد– است. از آنجایی که روش جدید اتریشی، روشی است که در طول پروژه های متعدد مهندسی در اروپا تکمیل شده است، مبنایی تجربی دارد. لذا مطالعات پژوهشی کمی بر روی تکنیک های حفاری آن صورت گرفته است. گزینه ی مورد مطالعه ساختگاه تونل متروی شهر سئول در کره ی جنوبی انتخاب شد. در این پایان نامه سعی شده است که تکنیک های متفاوت حفاری در روش جدید اتریشی به نحوی موثر بهینه شوند تا کمترین نشست ها و تغییر مکان ها و به عبارت بهتر کمترین دستخوردگی ها از حیث میدان تنش های حاکم بر پیرامون تونل حاصل شود. جهت انجام این تحقیقات از مدلسازی های عددی به کمک روش اجزای محدود در حالت سه بعدی استفاده شد. در پایان نیز موثر ترین روش ها با الگوی حفاری بهینه شده ارائه شدند.

فهرست

فهرست جداول . . . . . **(IV)**
فهرست اشکال . . . . . **(V)**

۱ بیان مسئله، ضرورت و کاربرد تحقیق . . . . . **(۱)**
۱-۱ مقدمه . . . . . (۱)
۱-۲ بیان مسئله و ضرورت . . . . . (۱)
۱-۳ کاربرد های این تحقیق . . . . . (۲)

۲ حفاری تونل به روش جدید اتریشی . . . . . **(٤)**
۲-۱ مقدمه . . . . . (۴)
۲-۲ تاریخچه . . . . . (۵)
۲-۳ مبانی NATM . . . . . (۵)
۲-۴ تکنیک های کاهش نشست های سطحی در NATM . . . . . (۱۰)
۲-۴-۱ تکنیک حفاری . . . . . (۱۰)
۲-۴-۲ روش های تزریق و بهسازی . . . . . (۱۲)
۲-۴-۳ روش Umbrella arch method یا Forepoling . . . . . (۱۳)
۲-۵ چالش های NATM . . . . . (۱۴)

۳ مروری بر تاریخچه . . . . . **(١٦)**
۳-۱ مقدمه . . . . . (۱۶)
۳-۲ مطالعات در محل . . . . . (۱۶)
۳-۳ مطالعات عددی . . . . . (۲۲)

٤ صحت سنجی . . . . . **(۳۲)**
۴-۱ مقدمه . . . . . (۳۲)
۴-۲ ساختار ژئوتکنیکی زمین . . . . . (۳۴)
۴-۳ مدلسازی عددی . . . . . (۳۵)
۴-۴ تکنیک مدلسازی حفاری تونل به روش NATM . . . . . (۳۶)
۴-۵ نتایج . . . . . (۳۸)
۴-۵-۱ حفاری تمام مقطع . . . . . (۳۸)

۴-۵-۲ حفاری به صورت تک سکو و دو سکو . . . . . (۳۹)

۵ مدلسازی عددی و ارائه و تفسیر نتایج . . . . . .(٤١)

۵-۱ مقدمه . . . . . (۴۱)

۵-۲ مدلسازی به روش اجزای محدود . . . . . (۴۲)

۵-۲-۱ تکنیک های حفاری . . . . . (۴۳)

۵-۲-۲ روند حفاری . . . . . .(۴۶)

۵-۲-۳ مدلسازی عددی به روش اجزای محدود . . . . . (۴۶)

۵-۳ نقاط مانیتورینگ . . . . . .(۵۰)

۵-۴ نتایج و تفسیر . . . . . .(۵۱)

۵-۴-۱ روش top heading . . . . . (۵۱)

۵-۴-۱-۱ کلیات . . . . . .(۵۱)

۵-۴-۱-۲ بررسی اثرات متغیر h/H و افزایش ارتفاع سکو بر نشست ها و تغییر مکان ها . . . (۵۸)

۵-۴-۲ روش side wall drift . . . . . .(۶۳)

۵-۴-۲-۱ کلیات . . . . . .(۶۳)

۵-۴-۲-۲ بررسی اثرات تغییرات ضخامت pillar (d/D) و ارتفاع سکو (h/H) بر نشست ها و جابجایی ها . . . . . (۶۷)

۵-۴-۳ روش central diaphragm wall . . . . . (۷۳)

۵-۴-۳-۱ کلیات . . . . . .(۷۳)

۵-۴-۳-۲ بررسی اثرات ارتفاع سکو (h/H) و پهنای بخش L در حفاری (r/D) بر نشست ها و تغییر مکان ها . . . . . .(۷۷)

۵-۴-۴ مقایسه ی عملکرد روش های متفاوت حفاری تونل . . . . . (۸۴)

٦ نتیجه گیری و پیشنهادات . . . . . .(۹۰).

۶-۱ مقدمه . . . . . .(۹۰)

۶-۲ نتیجه گیری . . . . . (۹۱)

۶-۳ پیشنهادات . . . . . .(۹۲).

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۲-۱ روند رشد NATM (Karakuş and Fowell, 2004)	۶
جدول ۴-۱ خصوصیات ژئومکانیکی لایه های خاک در محل احداث تونل اشتاین هالدن فلد (Möller, 2006)	۳۵
جدول ۵-۱ روند حفاری در روشهای مختلف.	۴۷
جدول ۵-۲ مشخصات ژئومکانیکی زمین در لایه های مختلف (Seoul Metro, 2002)	۴۹

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۲-۱ مراحل مکانیزم شکست برشی پیرامون یک ناحیه ی حفاری شده توسط مفهوم باز توزیع تنش (after Rabcewicz 1964).	۸
شکل ۲-۲ توزیع تنش در پیرامون ناحیه ی حفاری (after Rabcewicz, 1973).	۹
شکل ۲-۳ گراف پاسخ و اندرکنش زمین-ساپورت (after Rabcewicz and Golser, 1973).	۱۰
شکل ۲-۴ شمایی از نحوه ی حفاری در روش top heading.	۱۱
شکل ۲-۶ روش حفاری central diaphragm wall.	۱۲
شکل ۲-۷ روش حفاری ring cut.	۱۲
شکل ۲-۸ شکل ناحیه ی تزریق پیرامون تونل (Ziaie Moayed and Izadi, 2011).	۱۳
شکل ۲-۹ شمایی از روش حفاری umbrella arch method.	۱۳
شکل ۳-۱ پروفایل ژئوتکنیکی منطقه در راستای محور تونل(Ocak, 2008) .	۱۷
شکل ۳-۲ جزئیات ساپورت به روش UAM (Ocak, 2008).	۱۸
شکل ۳-۳ مقایسه ی عملکرد روش های NATM و UAM در کاهش نشست های سطحی (Ocak, 2008). (۱۸)	۱۹
شکل ۳-۴ نشست های سطحی رخداده (Telioni, 2006).	
شکل ۳-۵ ساپورت های پیشنهاد شده برای حفاری تونل دو قلو (Brox and Hagedorn, 1999).	۲۰
شکل ۳-۶ موقعیت مکانی تونل ها نسبت به گسل های منطقه(Brox and Hagedorn, 1999) .	۲۱
شکل ۳-۷ جابجایی های ثبت شده در ایستگاه شماره ۲۸ برای تونل چپ (Brox and Hagedorn, 1999).	۲۱
شکل ۳-۸ روش های حفاری بررسی شده توسط یو (Yoo, 2009).	۲۲
شکل ۳-۹ اثر تغییرات طول مغزه در روش ring cut بر نشست های سطحی و جابجایی های تاج تونل (Yoo, 2009).	۲۳
شکل ۳-۱۰ اثر تغییرات طول سکو در روش ring cut بر نشست های سطحی و جابجایی های تاج تونل (Yoo, 2009).	۲۳
شکل ۳-۱۱ اثر طول سکو در روش ring cut بر نشست ماکزیمم و جابجایی تونل (Yoo, 2009).	۲۴
شکل ۳-۱۲ اثر تغییرات فاصله ی حفاری بین وجه سمت چپ و راست(LU و RU) در روش ring cut بر نشست های سطحی و جابجایی های تاج تونل (Yoo, 2009).	۲۴
شکل ۳-۱۳ اثر تغییرات طول سکو در روش ring cut بر نشست های سطحی و جابجایی های تاج تونل (Yoo, 2009).	۲۵
شکل ۳-۱۴ مقایسه ی نتایج حاصل از سه روش حفاری در حالت طول سکو برابر با ۷ متر برای همه حالات	۲۵

(Yoo, 2009).	
شکل ۳-۱۵ پروفایل عرضی نشست های سطحی در سه روش حفاری (Yoo, 2009).	۲۶
شکل ۳-۱۶ پروفایل طولی نشست های سطحی در حالت بدون و با ساختمان (Yoo and Kin, 2008).	۲۷
شکل ۳-۱۷ مقایسه ی نشست های طولی در حالت تحلیل کوپله و تحلیل تنش ساده (Yoo and Kim, 2008)	۲۷
شکل ۳-۱۸ نشست های پیش بینی شده در راستای عرضی توسط FEM و FDM (Karakush and Fowell, 2005).	۲۸
شکل ۳-۱۹ تقسیم بندی جبهه ی حفاری و لاینینگ برای حفاری سیکلیک و ترکیبی (Farias rt al., 2004)	۳۰
شکل ۳-۲۰ نشست های سطحی در راستای عرضی در مرحله ی مربوطه (Farias et al., 2004).	۳۰
شکل ۳-۲۱ اثر طول ناحیه ی بدون ساپورت بر نشست های سطحی طولی و عرضی (Farias et al., 2004)	۳۱
۴-۱ پلان موقعیت مکانی تونل اشتاین هالدن فلد (Möller, 2006).	۳۳
شکل ۴-۲ پروفایل عرضی تونل اشتاین هالدن فلد (Möller, 2006).	۳۳
شکل ۴-۳ ساختار ژئوتکنیکی زمین در امتداد محور طولی تونل اشتاین هالدن فلد (Möller, 2006).	۳۴
شکل ۴-۴ مش بندی دو بعدی مدل.	۳۶
شکل ۴-۵ منحنی پاسخ و تغییر مکان مربوطه ی زمین با توجه به زمان نصب لاینینگ.	۳۷
شکل ۴-۶ روند حفاری با توجه به تکنیک های مختلف.	۳۸
شکل ۴-۷ مقایسه نشست های سطحی بدست آمده با مقادیر واقعی و مقادیر گزارش شده از کارهای تحقیقاتی پیشین.	۳۹
شکل ۴-۸ اثرات استفاده از روش های حفاری مختلف بر نشست های سطحی.	۴۰
شکل ۵-۱ مقطع تونل و زمین در ساختگاه متروی فاز دوی سئول، کره جنوبی.	۴۲
شکل ۵-۲ مقطع حفاری و روند حفاری در روش top heading.	۴۴
شکل ۵-۳ مقطع حفاری و روند حفاری در روش side wall drift.	۴۴
شکل ۵-۴ مقطع حفاری و روند حفاری در روش central diaphragm wall.	۴۵
شکل ۵-۵ مدل سه بعدی FEM و مش بندی مدل.	۴۶
شکل ۵-۶ میدان تنش های اولیه تعریف شده در مرحله اول تحلیل های نرم افزاری.	۴۹
شکل ۵-۷ خطوط مانیتورینگ.	۵۰
شکل ۵-۸ پروفایل نشست های طولی و تغییر مکان تاج تونل در حفاری تونل به روش top heading در حالت دو سکو.	۵۳
شکل ۵-۹ پدیده ی آرچینگ در مراحل مختلف حفاری تونل.	۵۳
شکل ۵-۱۰ پدیده ی همگرایی خاک در جهت طولی محور تونل.	۵۴

شکل ۵-۱۱ پروفایل عرضی نشست های سطحی زمین در مقاطع مانیتورینگ عرضی در حفاری تونل به روش top heading در حالت دو سکو.	۵۴
شکل ۵-۱۲ پروفایل نشست های طولی و تغییر مکان تاج تونل در حفاری تونل به روش top heading در حالت یک سکو وقتی که h/H=0.66 است.	۵۶
شکل ۵-۱۳ پروفایل عرضی نشست های سطحی زمین در مقاطع مانیتورینگ عرضی در حالت یک سکو هنگامی که h/H=0.66 است.	۵۷
شکل ۵-۱۴ نشست های طولی و تغییر مکان تاج تونل در حفاری تونل به در حالت سه سکو در مرحله ی قبل از گسیختگی طاق تونل.	۵۷
شکل ۵-۱۵ پروفایل طولی نشست های سطحی زمین در تمامی حالات حفاری به روش top heading.	۵۸
شکل ۵-۱۶ نشست های سطحی نهایی در حالات حفاری یک سکو.	۵۹
شکل ۵-۱۷ پروفایل طولی تغییر مکان های عمودی تاج تونل در تمامی حالات حفاری به روش top heading.	۶۰
شکل۵-۱۸ بیضی شدگی تونل در اثر فشار های جانبی (بیضی شدگی با اغراق رسم شده است).	۶۰
شکل ۵-۱۹ جابجایی های عمودی نهایی تاج تونل در حفاری یک سکو.	۶۱
شکل ۵-۲۰ نشست های سطحی زمین در مقاطع مانیتورینگ مختلف در روش top heading.	۶۲
شکل ۵-۲۱ پروفایل طولی نشست های سطحی در نزدیکی تصویر جبهه ی حفاری بر سطح زمین.	۶۳
شکل ۵-۲۲ پروفایل نشست های طولی و تغییر مکان تاج تونل در حفاری تونل به روش side wall drift در حالتd/D=0.09 و h/H=0.25.	۶۴
شکل ۵-۲۳ پروفایل عرضی نشست های سطحی در مقاطع مانیتورینگ عرضی روش side wall drift در حالتd/D=0.09 و h/H=0.25.	۶۵
شکل ۵-۲۴ پروفایل نشست های طولی و تغییر مکان تاج تونل در حفاری تونل به روش side wall drift در حالتd/D=0.6 و h/H=0.	۶۶
شکل ۵-۲۵ پروفایل عرضی نشست های سطحی در مقاطع مانیتورینگ عرضی روش side wall drift در حالتd/D=0.6 و h/H=0.	۶۷
شکل ۵-۲۶ پروفایل طولی نشست های سطحی زمین در تمامی حالات حفاری به روش side wall drift.	۶۹
شکل ۵-۲۷ میزان نشست های بیشینه نهایی و اثرات h/H و d/D بر آن.	۶۹
شکل ۵-۲۸ پروفایل طولی تغییر مکان های عمودی تاج تونل در تمامی حالات حفاری به روش side wall drift.	۷۰
شکل ۵-۲۹ اثرات h/H و d/D بر تغییر شکل های رو به پایین تاج تونل در حالت نهایی به روش side wall drift.	۷۱
شکل ۵-۳۰ اثرات ارتفاع سکو و ضخامت بر پروفایل عرضی نشست های سطحی در FD=0.	۷۲
شکل ۵-۳۱ پروفایل نشست های طولی و تغییر مکان تاج تونل در حفاری تونل به روش central	۷۴

diaphragm wall در حالت بدون سکو و r/D=0.59.	
شکل ۵-۳۲ پروفایل عرضی نشست های سطحی در مقاطع مانیتورینگ در حفاری central diaphragm wall، بدون سکو، r/D=0.59.	۷۵
شکل ۵-۳۳ پروفایل طولی نشست های سطحی و تغییر مکان تاج تونل در حفاری تونل به روش central diaphragm wall در حالت h/H= 0.25 و r/D=0.76.	۷۶
شکل ۵-۳۴ پروفایل عرضی نشست های سطحی در مقاطع مانیتورینگ در حفاری central diaphragm wall، h/H=0.25، r/D=0.76	۷۷
شکل ۵-۳۵ پروفایل طولی نشست سطحی و جابجایی عمودی تاج تونل در حالت h/H=0.48 و r/D=0.76 در یک مرحله قبل از گسیختگی.	۷۸
شکل ۵-۳۶ پروفایل طولی نشست های سطحی زمین در تمامی حالات حفاری به روش central diaphragm wall.	۷۹
شکل ۵-۳۷ اثرات h/H و r/D بر نشست های سطحی نهایی در روش حفاری central diaphragm wall.	۸۰
شکل ۵-۳۸ پروفایل طولی تغییر مکان های عمودی تاج تونل در تمامی حالات حفاری به روش central diaphragm wall.	۸۱
شکل ۵-۳۹ اثرات h/H و r/D بر جابجایی های عمودی نهایی در روش حفاری central diaphragm wall.	۸۲
شکل ۵-۴۰ اثرات ارتفاع سکو و ضخامت بر پروفایل عرضی نشست های سطحی در FD=0.	۸۳
شکل ۵-۴۱ مقایسه ی پروفایل های طولی نشست های سطحی در روش های حفاری مختلف.	۸۵
شکل ۵-۴۲ مقایسه ی پروفایل های طولی جابجایی های تاج تونل در روش های حفاری مختلف.	۸۶
شکل ۵-۴۳ پروفایل عرضی نشست های سطحی نهایی در روش های حفاری مختلف.	۸۶
شکل ۵-۴۴ کانتور های تغییر مکان در FD=-4D در سه روش حفاری مختلف.	۸۷
شکل ۵-۴۵ کانتور های تغییر مکان در صفحه ی تقارن طولی تونل.	۸۸
شکل ۵-۴۶ محدوده ی نشست های سطحی بر اساس هر روش حفاری.	۸۹

فصل یکم

بیان مسئله، ضرورت و کاربرد تحقیق

۱-۱ مقدمه

افزایش جمعیت خصوصا در چند دهه اخیر و تراکم فزاینده در مناطق شهری از یک سو، و نیاز به دسترسی سریع به مناطق مختلف و سفر های درون شهری از سوی دیگر، مهندسان را ناگزیر به استفاده از فضا های زیر زمینی شهری ساخته است. بدیهی است که ساخت اینگونه فضا های زیر زمینی مخاطراتی را برای سازه های سطحی و زیر سطحی در بر خواهد داشت. که نادیده گرفتن آن می تواند خسارات جبران ناپذیر مالی و جانی را به بار آورد. از جمله این مخاطرات، مساله نشست سطح زمین و حتی بروز ناپایداری ناشی از حفاری تونل است که محیط اطراف تونل را تحت تاثیر خود قرار خواهد داد. آگاهی از این مخاطرات، مهندسان و دانشمندان را بر آن داشته است که روش های نوین و دقیقی را برای تخمین نشست های سطحی ناشی از حفاری تونل ارائه نمایند.

۱-۲ بیان مسئله و ضرورت

تونلهایی که به منظور تسهیل و تسریع در حمل و نقل در نواحی شهری احداث می شوند، در اکثر موارد، از زیر ساختمان ها با کاربری مختلف شهری عبور مینمایند. حفاری این تونل ها سبب به وجود آمدن نشست هایی در سطح زمین می گردد که ممکن است به ساختمان های سطحی آسیب جدی وارد کند و آنها را از سرویس دهی خارج نماید. از آنجایی که قسمت قابل توجهی از این نشست ها در خلال فاز حفاری رخ میدهد، بسیار مهم است که روش های حفاری به نحوی اصلاح و بهینه شوند تا نشست های سطحی و نتیجتا آسیب به سازه های سطحی به حداقل مقدار خود برسد. هدف از انجام این کار

تحقیقی، بررسی فاکتور هایی مانند اثرات تکنیک های حفاری مختلف و چگونگی پیکربندی آنها است، که در حفاری تونل ها نقش مهمی را ایفا مینمایند و بر نشست های سطحی تاثیر می گذارند، می باشد. با دانستن اثرات فاکتور های یاد شده و شناسایی مهمترین آنها می توان در احداث تونل ها راه حل هایی را اتخاذ نمود تا میزان نشست های به وجود آمده به حداقل مقدار خود برسد.

مطالعات رفتار تونل ها نیاز مند مدلسازی های بزرگ مقیاس که زمان و هزینه ی زیادی را می طلبد است، از سوی دیگر انجام مطالعات آزمایشگاهی مستلزم استفاده از دستگاه های مخصوص سانتریفیوژ می باشد، که ممکن است در دسترس نباشد. لذا جهت مطالعه چنین مسائل بزرگ ژئوتکنیکی، استفاده از نرم افزار های المان محدود (و یا تفاضلات محدود) رواج چشمگیری داشته است. این نرم افزار ها با مدلسازی رفتار مصالح و با تحلیل های دقیق، پاسخ سازه ژئوتکنیکی را می توانند به صورت قابل قبولی پیش بینی نمایند. طبق آنچه که شرح آن رفت، برای تحلیل های تحقیق حاضر، استفاده از نرم افزار المان محدود، ترجیح داده شده است.

این پایان نامه در شش فصل تدوین شده است. در فصل یکم مقدمه ای از موضوع حفاری تونل و اثرات آن بر نشست های سطحی بیان شده است، فصل دوم روش های حفاری تونل به روش جدید اتریشی (NATM) و همچنین عمده نکات مهم آن را در بر می گیرد، فصل سوم به مروری بر تاریخچه ی موضوع پرداخته است، در فصل چهارم صحت سنجی انجام شده است و عملکرد نرم افزار و همچنین مهارت اپراتور در مدلسازی و کار با نرم افزار با نتایج یک مطالعه ی موردی (تونل اشتاین هالدن فلد، در شهر اشتوتگارت، آلمان) مقایسه و تایید شده، فصل پنجم به بیان عمده موارد مربوط به اثرات روش های مختلف حفاری بر نشست ها سطحی و گاها پایداری وجوه تونل می پردازد. در حقیقت این فصل بیان کننده ی نتایج اصلی این پایان نامه است. برای حفظ جنبه ی کاربردی این تحقیق، تحلیل های نرم افزاری در این فصل با حفظ شرایط ساختگاه و تونل متروی سئول در کره جنوبی انجام شده است. فصل ششم نیز مختصرا به عمده نتایج مهم ارائه شده در فصل پنجم اشاره شده است و همچنین پیشنهاداتی برای مطالعات آینده ذکر شده است. در ادامه آن نیز منابع استفاده شده در این تحقیق ذکر شده است.

۱-۳ کاربرد های این تحقیق

با توجه به اهمیت موضوع تونل سازی در مناطق شهری و مخاطرات احتمالی آن، نتایج حاصل از این تحقیق می تواند در زمینه های اجرایی، مشاوره و همچنین زمینه های تحقیقاتی و پژوهشی بکارگرفته شود.

در دستگاه های اجرایی این کار تحقیقی می تواند کاربرد های مختلفی برای دستگاه های مختلف اجرایی و مهندسی با توجه به نوع وظایف تعریف شده ی هر دستگاه، داشته باشد. این موسسات و ارگان ها عبارتند از:

- شهرداری ها
- پیمانکاران صنعت تونل سازی
- شرکت های مهندسین مشاور

- وزارت راه و ترابری
- وزارت مسکن و شهرسازی
- انجمن تونل ایران

نتایج حاصل از این پایان نامه همچنین می تواند توسط مراکز، موسسات و ارگان ها در زمینه های پژوهشی آینده با نگرش بهبود روش های حفاری، کاهش نشست های سطحی و احتمال گسیختگی زمین، کاهش اسیب پذیری ساختمان های سطحی که تونل از زیر آنها عبور می نماید، مفید واقع شود. این موسسات و ارگان ها شامل موارد زیر می شوند:

- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن
- مراکز تحقیقاتی دانشگاه ها
- مهندسین مشاور
- انجمن تونل ایران

فصل دوم

حفاری تونل به روش جدید اتریشی

2-۱ مقدمه

حفاری تونل های کم عمق در خاک های نرم به دو دسته تقسیم می شوند: ۱) حفاری سنتی یا دستی، ۲) حفاری با استفاده از ماشین حفاری تونل یا TBM (Tunnel Boring Machine). حفاری به روش TBM به دلیل داشتن پروسه ی کاملا متفاوت در حفاری تونل نسبت به روش سنتی، و متعاقبا در مدلسازی عددی، مورد بحث قرار نخواهد گرفت و کانون توجه در این کار تحقیقی بر روی حفاری تونل به روش سنتی یا دستی معطوف گردیده است.

به طور کلی می توان گفت که حفاری به روش TBM زمانی مناسب خواهد بود که مشخصات زمینی که قرار است حفاری در آن انجام شود، در طول مسیر حفاری (مسیر تعیین شده ی تونل) دستخوش تغییرات زیاد نشود. زیرا در این صورت محاسبات پایداری وجوه تونل و نشست های سطحی و تغییر مکان های تونل در خاک با شرایط متفاوت قطعا تغییر خواهد کرد. اما حفاری تونل به روش دستی یا سنتی به گونه ای است که انعطاف پذیری لازم برای مواجهه با شرایط ژئولوژیکی متفاوت را داراست. به عبارت دیگر در روش حفاری دستی یا سنتی، امکان تزریق، تسلیح (میخکوبی یا nailing، مهار یا dowel)، حفاری چند مرحله ای وجود دارد. لذا این برتری ها روش سنتی یا دستی را از روش حفاری TBM متمایز می نماید.

البته محدودیت هایی نیز برای اجرای روش حفاری دستی یا سنتی وجود دارد؛ مثلا اگر مقطع حفاری تونل زیر سطح آب زیر زمینی واقع گردد و میزان نفوذپذیری خاک قابل توجه باشد، به نحوی که در حین حفاری به روش دستی دبی قابل توجهی با گرادیان های بالا وارد ناحیه ی حفاری شده بشود، ممکن است ادامه ی روند حفاری را غیر ممکن سازد. گرادیان های بالای آب در نزدیکی ناحیه ی حفاری سبب ایجاد ناپایداری در وجوه تونل و در نتیجه ریزش وجوه تونل خواهد شد. علاوه بر این

اگر میزان دبی ورودی به تونل زیاد باشد (بدون توجه به مسئله ی پایداری) سطح آب زیر زمینی به میزان قابل توجه ی به صورت موضعی در ناحیه ی بالای تونل پایین می آید. پایین آمدن سطح آب در توده خاک به این معناست که توده ی کمتری از خاک (نسبت به حالت قبل از افت سطح آب) در آب غوطه ور است. بنا بر این قسمتی از توده ی خاک وجود خواهد داشت که از حالت غوطه ور ($\gamma_{submerse}$) خارج خواهد شد و وزن موثر آن افزایش خواهد یافت که سبب افزایش تنش موثر در عمق تونل می گردد. این امر باعث افزایش نشست های سطحی می شود.

رفته رفته با پیشرفت صنعت حفاری تونل، محققان روش حفاری سنتی یا دستی را در چهارچوب قوانینی مطرح کردند که رعایت این قوانین سبب افزایش ایمنی و کاهش نشست های سطحی شد. از این روش امروزه غالبا به عنوان حفاری تونل به روش جدید اتریشی NATM ، (The New Austrian Tunnelling Method) یاد می شود.

۲-۲ تاریخچه

حفاری به روش جدید اتریشی (NATM) در سالهای ۱۹۵۷ و ۱۹۶۵ در اتریش، همانطور که از نامش پیداست، توسعه یافت. این نام در شهر سالزبرگ در سال ۱۹۶۲، به این روش اختصاص داده شد تا از روش قدیمی حفاری اتریشی تمایز داده شود. Rabcewicz، Müller و Pacher از اولین کسانی بودند که در ابداع NATM نقش به سزایی داشتند. ایده ی اصلی این روش در آن زمان استفاده از تنش های برجای خاک یا سنگ پیرامون تونل جهت پایداری تونل بود (Özdemir, 2006). بسیاری از مهندسان و دانشمندان در آن زمان این روش را زیر سئوال می بردند. دلیل آن ها این بود که این روش، روش جدیدی نبود و اتریشی ها این روش را قبلا نیز به کار برده اند. همچنین آن ها بر این باور بودند که NATM بیشتر به یک فلسفه می ماند تا به یک روش. این چالش ها بی شک سبب انقلابی در صنعت تونل سازی شد که در قرن حاضر شاهد آن هستیم. روند رشد روش NATM در جدول ۲-۱ نشان داده شده است.

۲-۳ مبانی NATM

NTAM در حقیقت شامل مجموعه ای از شناخت رفتار های زمین تحت بارگذاری و باربرداری و همچنین مانیتورینگ ناحیه ی حفاری می باشد. NATM شامل قوانین کاملا مشخص و از پیش تعیین شده ی قبلی نیست، بلکه بر اصل طراحی در حین اجرا استوار است. به عبارت دیگر، NATM یعنی طراحی بر اساس مشاهدات در حین ساخت. به عنوان مثال اگر در پروژه ای یک روش حفاری خاص برای تونلی اتخاذ بشود و پس از چند متر حفاری میزان تغییر مکان های رخداده بیش از حد مجاز تلقی گردد، تمهیداتی مضاف جهت کاهش تغییر مکان ها در نظر گرفته می شود؛ نظیر تزریق، مهار زنی(dowel) ، تغییر در تکنیک حفاری، استفاده از روش های پیش مهار (pre-support) و غیره. همانطور که ملاحظه می شود، NATM بر مبنای مانیتورینگ استوار است. بنا بر این در هر پروژه ی حفاری تونل به روش NATM می بایست سیستم های ابزار دقیق و مانیتورینگ، به شکل صحیح و در جای مناسب وجود داشته باشد.