

۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک

مقایسه پایداری تونل در زمین نرم با استفاده از میلگردهای الیاف شیشه و روش های مرسوم

توسط:

هانیه قائمی

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم زاده

تابستان ۱۳۹۶

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه خانم / آقای: هانیه قائمی

را با عنوان: مقایسه پایداری تونل نرم تقویت شده با استفاده از میلگردهای الیاف شیشه و روش‌های مرسوم پایداری

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی / کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر حسن قاسم زاده	دانشیار	
۲- استاد مشاور	-	-	-
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- استاد ممتحن	دکتر مسعود پلاسی	دانشیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر فرزین کلانتری	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر فرزین کلانتری	استادیار	

تقدیم

به پدر و مادر عزیزم که در تمامی مراحل زندگی همواره همراه و همیار من بوده و پشتیبانی خود را
هیچگاه از من دریغ ننمودند.

و

خواهر و برادر مهربانم که همیشه بهترین راهنما و مشوق من هستند.

و

همسر عزیزم که با قلبی آکنده از عشق و محبت، محیطی سرشار از امنیت و آرامش را برای من فراهم
آورده است.

تشکر و قدردانی

۱- استاد راهنمای ارجمند، جناب آقای دکتر قاسم زاده که در تمامی مراحل تدوین پایان نامه از راهنمایی‌ها و تجربیات علمی و مساعدت ایشان بهره‌مند گشته و نصایح ایشان همواره فرا راه دانش اندوزی من بوده است.

۲- جناب آقای مهندس اسماعیل قلی زاده، که در تمامی مراحل تهیه پایان نامه دلسوزانه پاسخگوی سوالات تخصصی نرم افزاری من بودند.

۳- قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء که مجری قطعه شرقی-غربی خط ۷ مترو تهران بوده و اطلاعات ژئوتکنیکی مسیر تونل جهت مدل‌سازی در این پروژه را در اختیار اینجانب قرار دادند.

چکیده

با افزایش روز به روز جمعیت تقاضا برای احداث فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شلوغ شهری بسیار زیاد شده و این روند در آینده نیز ادامه خواهد یافت. تونل‌سازی به ویژه در زمین‌های نرم همواره با خطر ریزش در حین حفاری مواجه بوده است. در این تحقیق روش نوین تونل‌سازی ADECO-RS (Analisis of Controlled Deformation in Rocks and Soils) که بیشتر یک روش مواجهه در زمین‌های نرم محسوب شده و اساس آن مستحکم‌سازی هسته‌ی پیش‌روی با نصب لوله‌های از جنس الیاف شیشه در داخل سینه‌کار تونل می‌باشد، مورد تحقیق قرار خواهد گرفت. از آنجائیکه هرگونه تغییر شکل در هسته‌ی پیش‌روی منجر به ایجاد "تغییر شکل روی سطح سینه‌کار" و در "جداره‌ی حفره‌ی حفاری شده" خواهد شد، لذا مستحکم‌سازی هسته برای کنترل تغییر شکل‌ها در زمین‌های نرم و ریزشی منطقی می‌نماید.

در همین راستا، در تحقیق پیش‌رو و در ابتدا تاثیر حضور این الیاف در داخل سینه‌کار در کاهش میزان تغییر شکل‌ها بررسی گردیده و در ادامه تاثیر تغییر پارامترهای مختلف الیاف همچون تعداد، طول و سختی آن‌ها در کنترل تغییر شکل‌ها، تفسیر نیروهای ایجاد شده در الیاف در یک مقطع خاص و یا با قرارگیری تونل در اعماق مختلف، مشاهده و تفسیر ناحیه پلاستیک ایجاد شده به هنگام باربرداری، برای مشخصات فنی خط ۷ مترو تهران و به کمک مدل‌سازی در نرم‌افزار FLAC 3D، مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است.

در کیلومتر ۱۰ انتخاب شده برای مدل‌سازی (کیلومتر ۹۰۰+ تا ۱۰۰۰+ متر از ابتدای جنوب شرقی خط ۷) سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز سینه‌کار تونل قرار دارد، اما برای تحقیق بیشتر، در حالت وجود تراز آب زیرزمینی در محدوده‌ی سینه‌کار نیز، پارامترهای فوق مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

بر طبق نتایج مدل‌سازی، استفاده از این الیاف تاثیر بسزایی در کنترل تغییر شکل‌های سینه‌کار حفاری و همچنین جداره‌های تونل داشته و به‌ویژه در حالت حضور تراز آب مانع از ریزش سینه‌کار شده است. همچنین ابعاد ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اثر باربرداری در خاک محدوده‌ی تونل، با تقویت هسته بسیار کاهش می‌یابد. در ادامه حداقل طول باقیمانده در داخل هسته‌ی پیش‌روی برای جلوگیری از ایجاد تغییر شکل‌های زیاد برابر ۲۰٪ طول اولیه الیاف به دست آمده و همچنین نشان داده شده است که تاثیر تغییر تعداد المان‌ها در کاهش تغییر شکل‌ها بیشتر از تغییر طول آن‌هاست. نیروی ایجاد شده در الیاف نیز با پیش‌روی حفاری و برای الیاف هر سری نسبت به سری قبل و همچنین در طی گام‌های حفاری هر سری افزایش یافته و بدین ترتیب منجر به کاهش تغییر شکل‌های سینه‌کار در حین حفاری، می‌شوند.

کلید واژه: روش‌های نوین حفاری تونل، لوله‌های الیاف شیشه، پایدارسازی سینه‌کار تونل.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول‌ها.....	ث
فهرست شکل‌ها.....	ج
فهرست علائم و نشانه‌ها.....	ر
فصل ۱- مقدمه.....	۱
۱-۱- پیشگفتار	۱
۱-۲- طرح مساله.....	۳
۱-۳- موضوع تحقیق.....	۷
۱-۴- اهمیت موضوع.....	۷
۱-۵- هدف تحقیق.....	۸
۱-۶- سوالات تحقیق.....	۸
۱-۷- روش تحقیق.....	۸
۱-۸- ساختار پایان نامه.....	۹
فصل ۲- مبانی تئوری و ادبیات موضوع.....	۱۰
۱-۲- مقدمه	۱۰
۲-۲- مروری بر فعالیت‌های پیشین.....	۱۰
۳-۲- مروری بر روش‌های مرسوم تونل‌سازی.....	۱۶
۱-۳-۲- تونل‌های با روش حفر روباز یا روش کندوپوش.....	۱۶
۲-۳-۲- تونل‌های با روش حفر زیرزمینی.....	۱۷
۱-۲-۳-۲- روش‌های حفاری در زمین‌های نرم.....	۱۷
۲-۲-۳-۲- روش‌های حفاری در زمین‌های متوسط تا سخت.....	۲۱
۴-۲- مقدمه ای بر روش نوین حفاری بر اساس کنترل تغییرشکل‌ها (ADECO-RS).....	۲۴
۱-۴-۲- تعیین مقطع نصب مجدد المان‌های سینه‌کار در شرایط اجرایی.....	۲۴
۵-۲- مقایسه‌ی روش نوین ADECO-RS با روش‌های مرسوم.....	۲۷
فصل ۳- روش تحقیق و مشخصات مدل.....	۳۰
۱-۳- مقدمه.....	۳۰

۳۰	۲-۳ معرفی نرم افزار مورد استفاده.....
۳۱	۳-۳ مشخصات ژئوتکنیکی مسیر مورد مدل سازی.....
۳۴	۳-۳-۱ خاک نوع ET2.....
۳۵	۳-۳-۲ خاک نوع ET3.....
۳۶	۴-۳ معیار گسیختگی خاک.....
۳۶	۵-۳ مشخصات هندسی مسیر مورد مدل سازی.....
۴۰	۶-۳ مشخصات حفاری مسیر مورد مدل سازی.....
۴۰	۷-۳ مشخصات المان های به کار رفته به عنوان لوله های الیاف شیشه.....
۴۴	۸-۳ مشخصات المان به کار رفته به عنوان پوشش جداره های تونل.....
۴۵	۹-۳ منحنی واحد مادر.....
۵۰	فصل ۴ - شرح و نتایج پژوهش.....
۵۰	۴-۱ مقدمه.....
	۴-۲ منحنی تنش محصور کننده - بیرون زدگی سینه کار و صحت سنجی مدل سازی ها در نرم افزار.....
۵۱	۴-۲-۱ رسم منحنی مشخصه برای تونل با N^* های مختلف.....
۵۳	۴-۳ تعیین مقطع بحرانی برای الیاف فایبری.....
۶۳	۴-۴ بررسی پتانسیل ریزشی بودن خاک محدوده مدل سازی.....
۶۵	۴-۵ شکل بیرون زدگی سینه کار.....
۶۷	۴-۶ بررسی نشست سطح زمین برای دو حالت سینه کار با و بدون تقویت.....
۷۰	۴-۷ ترسیم منحنی بیرون زدگی - تنش محصور کننده برای سینه کار تقویت شده.....
	۴-۷-۱ ترسیم منحنی بیرون زدگی - تنش محصور کننده برای سینه کار تقویت شده برای المان های تقویت با طول های متفاوت.....
۷۲	۴-۷-۲ ترسیم منحنی بیرون زدگی - تنش محصور کننده برای سینه کار تقویت شده برای تعداد متفاوت از المان های تقویت.....
۷۴	۴-۸ بررسی تاثیر تقویت سینه کار در ابعاد ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف سینه کار.....
۸۱	۴-۹ بررسی اثر سربار تونل در منحنی های بیرون زدگی - تنش محصور کننده.....
۸۱	۴-۱۰ بررسی نیروی محوری ایجاد شده در المان های الیاف شیشه.....
۸۲	۴-۱۰-۱ نیروی ایجاد شده در الیاف یک مقطع برای تونل در اعماق مختلف.....
۸۵	۴-۱۰-۲ نیروی ایجاد شده در الیاف فایبری از بالا تا پایین مقطع.....
۸۸	۴-۱۰-۳ نیروی ایجاد شده در طول الیاف.....

۹۰.....	۱۱-۴ - تغییرات سختی المان‌ها.....
۹۲.....	۱۲-۴ - آنالیز حساسیت تونل در حالت حضور سطح آب زیرزمینی در محدوده‌ی سینه‌کار.....
۹۳.....	۱-۱۲-۴ - تمام مقطع تونل زیر سطح ایستایی.....
۹۳.....	۱-۱۲-۴ - حفاری بدون تقویت سینه‌کار.....
۹۳.....	۲-۱۲-۴ - حفاری سینه‌کار با تقویت.....
۹۴.....	۲-۱۲-۴ - بخشی از مقطع زیر سطح ایستایی.....
۹۵.....	۱۳-۴ - تعیین مقطع نصب سری بعدی فایبرها در حالت وجود تراز آب زیرزمینی.....
۹۹.....	۱۴-۴ - بررسی نشست‌های سطحی در حالت حضور تراز آب زیرزمینی.....
۱۰۰.....	۱۵-۴ - مقایسه نیروی ایجاد شده در المان‌های الیاف شیشه یک مقطع، در حالت حضور و عدم حضور تراز آب زیرزمینی در تراز تونل.....
۱۰۱.....	۱۶-۴ - مقایسه‌ی ناحیه پلاستیک ایجاد شده در مقطع تونل در دو حالت حضور و عدم حضور تراز آب زیرزمینی.....
۱۰۳.....	۱۷-۴ - جمع بندی.....
۱۰۷.....	فصل ۵ - نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۱۰۷.....	۱-۵ - مقدمه.....
۱۰۸.....	۲-۵ - نتیجه گیری.....
۱۱۰.....	۳-۵ - پیشنهادها برای ادامه‌ی تحقیق.....
۱۱۱.....	فهرست مراجع.....

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۳-۱: اطلاعات ژئوتکنیکی خاک‌های مسیر تونل.....	۳۳
جدول ۳-۲: توصیف خاک و طبقه بندی خاک‌های مسیر تونل.....	۳۳
جدول ۳-۳: مشخصات فیزیکی المان‌های الیاف شیشه.....	۴۲
جدول ۴-۱: بیرون زدگی تجمعی سینه کار برای هر مقطع از اولین گام حفاری سری تا رسیدن به آن مقطع، سری دوم الیاف.....	۶۱
جدول ۴-۲: بیرون زدگی خالص سینه کار برای هر مقطع در گام‌های حفاری، از اولین گام حفاری سری تا رسیدن به آن مقطع، سری دوم الیاف.....	۶۱
جدول ۴-۳: مقادیر بیرون زدگی سینه کار در حین حفاری برای دو حالت با و بدون تقویت.....	۶۴
جدول ۴-۴: مقادیر متفاوت α جهت بررسی تعداد الیاف.....	۷۴
جدول ۴-۵: مقادیر حداکثر بیرون زدگی سینه کار تونل برای الیاف فایبری با سختی‌های متفاوت.....	۹۰
جدول ۴-۶: حداکثر نیروی ایجاد شده در الیاف فایبری با تغییر سختی آن‌ها.....	۹۱
جدول ۴-۷: مقادیر بیرون زدگی براس سینه کار خشک و سینه کار تماماً زیر سطح ایستایی.....	۹۴
جدول ۴-۸: مقادیر بیرون زدگی سینه کار برای قرارگیری تراز آب در سطوح مختلف سینه کار.....	۹۴
جدول ۴-۹: حداکثر بیرون زدگی سینه کار قرار گرفته در زیر سطح ایستایی برای سه سری اولیه الیاف.....	۹۶
جدول ۴-۱۰: مقادیر بیرون زدگی سینه کار و نشست‌های سطحی برای سینه کار خشک و زیر سطح ایستایی در دو حالت با و بدون اعمال تقویت سینه کار در مقطع $y=48m$ از ابتدای تونل صد متری.....	۹۹

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: انحراف خطوط جریان تنش و شکل‌گیری اثر قوسی در اثر ایجاد یک حفره در سنگ.....	۲
شکل ۱-۲: الف) دسته‌های رفتاری محیط در ارتباط با پاسخ به حفاری (دسته‌های A، B و C).....	۵
شکل ۱-۲: ب) مفاهیم بیرون‌زدگی، همگرایی و پیش همگرایی.....	۵
شکل ۱-۳: نصب المان‌های الیاف شیشه در داخل سینه‌کار با تزریق دوغاب (دستی).....	۶
شکل ۱-۴: نصب المان‌های الیاف شیشه در داخل سینه‌کار با تزریق دوغاب (ماشینی).....	۷
شکل ۲-۱: مکانیزم بیرون‌زدگی سینه‌کار در اثر حفاری، کانتینی ۲۰۱۱.....	۱۳
شکل ۲-۲: روش حفاری در زمین‌های نرم - روش دیافراگم میانی.....	۱۷
شکل ۲-۳: روش حفاری در زمین‌های نرم - روش دریافت کناری.....	۱۸
شکل ۲-۴: روش حفاری در زمین‌های نرم - روش نیمه مقطع یا نیمه بالایی.....	۱۸
شکل ۲-۵: روش حفاری در زمین‌های نرم - روش آلمانی.....	۱۹
شکل ۲-۶: روش حفاری در زمین‌های نرم - روش پیش برش مکانیکی.....	۲۰
شکل ۲-۷: روش حفاری در زمین‌های نرم - روش حائل گذاری چتری.....	۲۱
شکل ۲-۸: قسمت‌های مختلف دستگاه رودهدر.....	۲۲
شکل ۲-۹: روش حفاری سنتی در زمین‌های سخت، روش چالزنی و انفجار - حفر دومرحله‌ای پلکانی.....	۲۳
شکل ۲-۱۰: روش حفاری سنتی در زمین‌های سخت، روش چالزنی و انفجار - حفر دومرحله‌ای با تونل پیشاهنگ.....	۲۳
شکل ۲-۱۱: ابزار اندازه‌گیری بیرون‌زدگی سینه‌کار (اکستنسومتر).....	۲۵
شکل ۲-۱۲: نحوه‌ی اندازه‌گیری جابجایی‌های طولی و مطلق زمین در هسته‌ی پیش‌روی توسط میکرومتر لغزشی.....	۲۶
شکل ۲-۱۳: طول حفاری شده با روش ADECO و روش NATM از تونل Sochi روسیه.....	۲۷
شکل ۲-۱۴: مقایسه شیوه حفاری به دو روش ADECO و NATM در تونل روسیه.....	۲۸
شکل ۲-۱۵: مقایسه حجم حفاری ماهانه بر حسب مترمکعب برای دو روش ADECO و NATM.....	۲۸
شکل ۲-۱۶: مقایسه‌ی هزینه‌های حفاری به دو روش ADECO و NATM برای دو مقطع مشابه در متر حفاری.....	۲۹
شکل ۳-۱: موقعیت مسیر خط ۷ مترو بر روی نقشه تهران.....	۳۱
شکل ۳-۲: الف) پروفیل طولی قسمت حفاری نشده (ایستگاه A7 (+۸۰) تا ایستگاه B7 (۷۷۵، ۸) (+۱).....	۳۲

- شکل ۳-۲: ب) کیلومتر از مورد مدل سازی (۹۰۰+۰ تا ۱۰۰۰+۰)..... ۳۳
- شکل ۳-۳: منحنی دانه بندی و نمونه‌ی خاک نوع ET2..... ۳۴
- شکل ۳-۴: منحنی دانه بندی و نمونه‌ی خاک نوع ET3..... ۳۵
- شکل ۳-۵: مشخصات هندسی مسیر تونل..... ۳۷
- شکل ۳-۶: مش بندی مدل و لایه‌های زمین شناسی تعریف شده در نرم افزار..... ۳۸
- شکل ۳-۷: نحوه‌ی تعریف هندسه تونل در نرم افزار FLAC 3D..... ۳۹
- شکل ۳-۸: کوچکترین و بزرگترین المان تعریف شده در هندسه‌ی مدل..... ۳۹
- شکل ۳-۹: آرایش شبکه‌ای المان‌های الیاف شیشه در داخل سینه‌کار تونل..... ۴۱
- شکل ۳-۱۰: رفتار محوری المان‌های سازه‌ای الیاف فایبری..... ۴۳
- شکل ۳-۱۱: رفتار برشی گروت با خاک اطراف در مدل سازه‌ای الیاف فایبری..... ۴۳
- شکل ۳-۱۲: مکانیزم حرکت المان سازه‌ای الیاف فایبری در خاک..... ۴۴
- شکل ۳-۱۳: منحنی مادر معرفی شده در ارائه‌ی مور وود..... ۴۷
- شکل ۳-۱۴: منحنی مادر برای پوشش با سختی‌های متفاوت..... ۴۸
- شکل ۴-۱: اعتبارسنجی مدل سازی‌ها در نرم افزار با ترسیم منحنی مشخصه برای تونل در سه حالت مختلف..... ۵۳
- شکل ۴-۲: منحنی مقادیر بیرون زدگی سینه‌کار در حین حفاری سری اول الیاف فایبری..... ۵۵
- شکل ۴-۳: منحنی مقادیر همگرایی حفره تونل در فواصل ۱-۳ و ۵ متری سینه‌کار در حین حفاری سری اول الیاف فایبری..... ۵۵
- شکل ۴-۴: منحنی مقادیر بیرون زدگی سینه‌کار در حین حفاری سری دوم الیاف فایبری..... ۵۶
- شکل ۴-۵: منحنی مقادیر همگرایی حفره تونل در فواصل ۱-۳ و ۵ متری سینه‌کار در حین حفاری سری دوم الیاف فایبری..... ۵۶
- شکل ۴-۶: منحنی مقادیر بیرون زدگی سینه‌کار در حین حفاری سری سوم الیاف فایبری..... ۵۷
- شکل ۴-۷: منحنی مقادیر همگرایی حفره تونل در فواصل ۱-۳ و ۵ متری سینه‌کار در حین حفاری سری سوم الیاف فایبری..... ۵۸
- شکل ۴-۸: منحنی بیرون زدگی بوجود آمده در گام‌های حفاری سری اول، دوم و سوم الیاف فایبری..... ۵۹
- شکل ۴-۹: الف) منحنی حداکثر نیروی ایجاد شده در لوله‌های الیاف شیشه در گام ششم حفاری برای لوله‌های سری ۱ و ۲ و ۴..... ۶۰
- شکل ۴-۹: ب) منحنی بیرون زدگی سینه‌کار تقویت شده در گام ششم حفاری برای لوله‌های الیاف شیشه سری ۱ و ۲ و ۴..... ۶۰
- شکل ۴-۱۰: منحنی مقادیر بیرون زدگی هر مقطع در حین حفاری، سری دوم الیاف..... ۶۲

شکل ۴-۱۱: منحنی حداکثر نیروی ایجاد شده در الیاف فایبری هر سری در گام‌های حفاری آن‌ها..... ۶۳

شکل ۴-۱۲: الف) بیرون‌زدگی سینه‌کار بدون تقویت در مقطع $y=40m$ از ابتدای حفاری..... ۶۵

شکل ۴-۱۲: ب) بیرون‌زدگی سینه‌کار تقویت شده در مقطع $y=40m$ از ابتدای حفاری..... ۶۵

شکل ۴-۱۳: منحنی مقادیر بیرون‌زدگی برای دو حالت سینه‌کار با و بدون تقویت در مقطع $y=40m$ ۶۶

شکل ۴-۱۴: نشست‌های ایجاد شده در سطح زمین در حالت حفاری تمام مقطع تونل بدون تقویت سینه‌کار در $y=48m$ ۶۷

شکل ۴-۱۵: نشست‌های ایجاد شده در سطح زمین در حالت حفاری تمام مقطع تونل با تقویت سینه‌کار در $y=48m$ ۶۸

شکل ۴-۱۶: منحنی نشست سطح زمین برای سینه‌کار با و بدون تقویت در مقطع $y=48m$ و منحنی نشست تجربی پک ۷۰

شکل ۴-۱۷: منحنی تنش محصور کننده-بیرون‌زدگی برای سینه‌کار تقویت نشده و تقویت شده با $I=1$, $\alpha=0.214\%$ ۷۱

شکل ۴-۱۸: منحنی تنش محصور کننده-بیرون‌زدگی برای سینه‌کار تقویت شده با لوله‌های به طول $I=0.5$ ۷۲

شکل ۴-۱۹: منحنی تنش محصور کننده-بیرون‌زدگی برای سینه‌کار تقویت شده با لوله‌های به طول $I=1.5$ ۷۳

شکل ۴-۲۰: منحنی تنش محصور کننده-بیرون‌زدگی برای سینه‌کار تقویت شده با لوله‌های به طول‌های متفاوت ۷۳

شکل ۴-۲۱: منحنی تنش محصور کننده-بیرون‌زدگی برای سینه‌کار تقویت شده با تعداد متفاوتی از الیاف..... ۷۵

شکل ۴-۲۲: ابعاد ناحیه پلاستیک برای سینه‌کار تقویت نشده..... ۷۶

شکل ۴-۲۳: حجم و تعداد زون پلاستیک در هسته‌ی پیش‌روی حفاری و در مقطع $y=48m$ برای طول‌های متفاوتی از الیاف..... ۷۷

شکل ۴-۲۴: منحنی تاثیر تغییر طول الیاف در تعداد و حجم ناحیه‌های پلاستیک ایجاد شده در مقطع حفاری..... ۷۸

شکل ۴-۲۵: حجم و تعداد زون پلاستیک در هسته‌ی پیش‌روی حفاری و در مقطع $y=48m$ برای تعداد متفاوتی از الیاف..... ۷۹

شکل ۴-۲۶: منحنی تاثیر تغییر تعداد الیاف در تعداد و حجم مش‌های پلاستیک ایجاد شده در مقطع حفاری..... ۸۰

شکل ۴-۲۷: منحنی تاثیر سربار تونل در میزان بیرون‌زدگی‌های مقطع..... ۸۱

شکل ۴-۲۸: تغییرات نیرو در الیاف فایبری یک مقطع با قرارگیری تونل در اعماق مختلف.....۸۳

شکل ۴-۲۹: منحنی حداکثر نیروی ایجاد شده در الیاف با قرارگیری تونل در اعماق مختلف در مقطع $y=30m$۸۴

شکل ۴-۳۰: تغییرات نیرو در الیاف مقطع $y=30m$ از بالا تا پایین مقطع برای تونل در اعماق مختلف.....۸۶

شکل ۴-۳۱: منحنی‌های نیروی ایجاد شده در الیاف فایبری روی قطر قائم اصلی با قرارگیری تونل در اعماق مختلف در مقطع $y=30m$۸۷

شکل ۴-۳۲: نیروی ایجاد شده در الیاف مقطع $y=30m$ و در طول باقیمانده‌ی آن‌ها در داخل سینه‌کار.....۸۸

شکل ۴-۳۳: منحنی‌های تغییرات نیرو در طول باقیمانده‌ی الیاف فایبری‌ها در داخل سینه‌کار در گام حفاری $y=30m$۸۸

شکل ۴-۳۴ الف: نیل تکی و توزیع تنش برشی در طول سطح تماس گروت اطراف آن با خاک.....۹۰

شکل ۴-۳۴ ب: نمودار توزیع نیروی کششی در طول نیل تکی داخل خاک، مورد استفاده در طراحی‌ها.....۹۰

شکل ۴-۳۵: منحنی‌های تاثیر سختی المان‌های تقویت در میزان بیرون‌زدگی سینه‌کار برای حفاری تا مقطع $y=48m$۹۱

شکل ۴-۳۶: منحنی‌های تاثیر سختی المان‌های تقویت در حداکثر نیروی ایجاد شده در آن‌ها برای حفاری تا مقطع $y=48m$۹۲

شکل ۴-۳۷: بیرون‌زدگی سینه‌کار تقویت شده با قرار دادن سطح ایستایی در اعماق مختلف سینه‌کار در مقطع حفاری $y=8m$۹۵

شکل ۴-۳۸: منحنی مقادیر بیرون‌زدگی سینه‌کار تماما زیر سطح ایستایی در حین حفاری سری اول الیاف.....۹۷

شکل ۴-۳۹: منحنی مقادیر بیرون‌زدگی سینه‌کار تماما زیر سطح ایستایی در حین حفاری سری دوم الیاف.....۹۷

شکل ۴-۴۰: منحنی مقادیر بیرون‌زدگی سینه‌کار تماما زیر سطح ایستایی در حین حفاری سری سوم الیاف.....۹۸

شکل ۴-۴۱: منحنی‌های مقادیر بیرون‌زدگی سینه‌کار تماما زیر سطح ایستایی در گام‌های حفاری سه سری اول فایبرها.....۹۸

شکل ۴-۴۲: نیروی ایجاد شده در الیاف فایبری مقطع $y=40m$ در دو حالت وجود و عدم وجود سطح ایستایی.....۱۰۰

شکل ۴-۴۳: ابعاد ناحیه پلاستیک در مقطع حفاری در حالت سینه‌کار خشک و تراز آب در $۱/۴$ ، $۲/۴$ ، $۳/۴$ و تمامی سینه‌کار زیر سطح ایستایی.....۱۰۱

شکل ۴-۴۴: تاثیر تغییر سطح تراز آب زیرزمینی در تعداد زون پلاستیک ایجاد شده در سینه‌کار.....۱۰۲

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
مقاومت برشی تک محوره گروت	q_u
مدول برشی گروت	G_g
زاویه اصطکاک داخلی خاک	ϕ_{soil}
قطر تونل	D
ضخامت گروت	t
وزن مخصوص خاک	γ
بار سطحی معادل بار سازه	q
چسبندگی زهکشی نشده‌ی خاک	C_{cu}
طول الیاف تقویت	L_r
مجموع سطح مقطع الیاف تقویت	A_r
سطح مقطع کلی تونل	A_t

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

خطوط جریان میدان تنش در توده سنگ در اثر باز شدن یک حفره در آن، به اطراف حفره تغییر مسیر می‌دهند و پیرامون آن به تمرکزشان افزوده می‌شود. بنابراین در حوالی حفره ناحیه‌ای از تنش‌های افزایشی ایجاد خواهد شد. به این تغییر مسیر جریان تنش‌ها، پدیده‌ی "اثر قوسی" گفته می‌شود. شکل ۱-۱ مفهوم این پدیده را نشان می‌دهد. این انحراف مسیر بسته به اندازه‌ی تنش‌های وارده و خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل زمین می‌تواند به یکی از حالات زیر رخ دهد:

۱- کاملاً نزدیک به پروفیل حفاری

۲- با فاصله نسبتاً دور از پروفیل حفاری

۳- عدم وقوع

مورد اول هنگامی رخ می‌دهد که زمین اطراف حفره در برابر جریان تنش‌های انحرافی، به خوبی پایداری می‌کند و به لحاظ مقاومت و تغییر شکل دارای رفتاری الاستیک است.

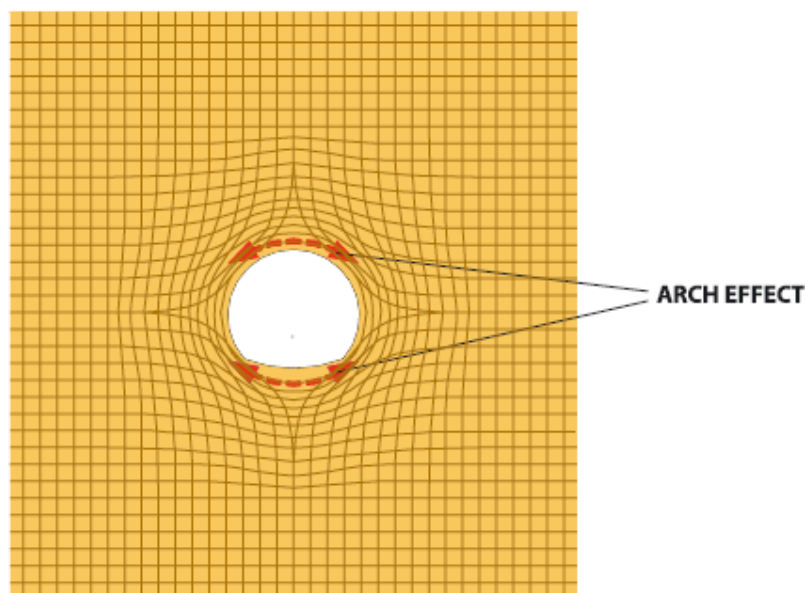
مورد دوم در مواقعی رخ می‌دهد که زمین اطراف حفره در برابر جریان تنش‌های انحرافی، قادر به پایداری نبوده و به نسبت حجم توده‌ی درگیر در فرآیند بارگذاری، یک رفتار تغییرشکلی الاستوپلاستیک یا دگرشکلی دائمی از خود نشان می‌دهد. پدیده‌ی دومی (دگرشکلی دائمی) که اغلب موجب افزایش حجم منطقه‌ی تحت تاثیر خود می‌شود، به صورت شعاعی منتشر شده و مسیر تنش‌های انحرافی را از دیواره‌ها دور و به داخل توده سنگ هدایت می‌کند (تا منطقه‌ای که در آن حالت تنش‌های سه محوره با خواص مقاومتی زمین برابر است). بنابراین در چنین شرایطی، اثر قوسی، اگرچه با فاصله از دیواره‌های تونل اما در هر صورت شکل می‌گیرد و زمین اطراف تونل که دچار آشفته‌گی شده در چنین وضعیتی می‌تواند با مقاومت پسماند خود در پایداری نهایی حفره شرکت کند. لذا شاهد تغییر شکل‌هایی خواهیم بود که اغلب ایمنی سازه را به صورت جدی مورد تهدید قرار نمی‌دهند.

مورد سوم هنگامی رخ می‌دهد که توده‌ی اطراف حفره در برابر جریان تنش‌های منحرف شده به طور کامل ناپایدار است و واکنش آن در محدوده‌ی شکست می‌باشد که در نهایت موجب متلاشی شدن و فروریختن حفره خواهد شد.

از تحلیل این سه موقعیت، موارد زیر برداشت می‌شوند:

- در مورد اول، یک اثر قوسی به صورت طبیعی رخ می‌دهد.
- در مورد دوم، یک اثر قوسی طبیعی تنها در صورتی به شکل موثر تولید می‌شود که زمین با تمهیدات مناسب، تقویت شود.
- در مورد سوم، از آنجائیکه یک اثر قوسی نمی‌تواند به صورت طبیعی تولید شود، لذا می‌بایست آن را با استفاده از ابزارها و روش‌های مصنوعی که پیش از حفر زمین بر روی آن اعمال می‌شوند، ایجاد کرد.

THE LINES OF FLOW IN THE STRESS FIELD OF THE GROUND AROUND A CAVITY



شکل ۱-۱: انحراف خطوط جریان تنش و شکل‌گیری اثر قوسی در اثر ایجاد یک حفره در سنگ [۱]

چنانچه حین عبور از وضعیت تنش سه محوره به تنش صفحه‌ای در خلال پیشروی تونل، یک کاهش تصاعدی در فشار محصورکننده‌ی سینه‌کار موجب تولید تنش در محدوده‌ی الاستیک در مقابل سینه‌کار تونل شود، در این وضعیت سینه‌کار با یک تغییر شکل کاملاً جزئی و محدود، پایدار باقی می‌ماند. در این موارد، انتقال تنش‌ها در اطراف حفره (اثر قوسی) بسته به پروفیل حفاری، به صورت طبیعی صورت می‌پذیرد.

از سوی دیگر در صورتی که کاهش تصاعدی محدوده‌ی تنش در سینه‌کار، موجب تولید تنش در محدوده‌ی الاستوپلاستیک در مقابل آن شود، متعاقباً با در نظر گرفتن واکنش منطقه‌ی پیش‌رو، تغییر شکل سینه‌کار به صورت الاستوپلاستیک و به سمت داخل حفره خواهد بود. این حالت منجر به شرایط پایدار اما در کوتاه مدت خواهد شد. بدان معنی که در صورت عدم پایداری، وضعیت پلاستیسیته (خمیری) به صورت شعاعی و طولی نسبت به دیواره‌ی فضای حفر شده گسترش خواهد یافت و رفته رفته منجر به دورتر شدن اثر قوسی از دیواره‌ها و انتقال آن به عمق توده سنگ می‌شود. البته با استفاده از تمهیدات پایداری زمین و نصب به موقع آن‌ها می‌توان این پدیده را تحت کنترل درآورد.

در حالت سوم اگر کاهش تصاعدی فشار محصورکننده در سینه‌کار موجب تولید تنشی در محدوده‌ی شکست زمین مقابل سینه‌کار شود، در این صورت میزان تغییر شکل غیر قابل قبول بوده و یک وضعیت ناپایدار بر زمین پیش‌روی سینه‌کار حاکم می‌شود. در این حالت (اغلب در زمین‌های شل و فاقد چسبندگی) شکل‌گیری اثر قوسی ممکن نیست و از آنجائیکه این پدیده به صورت طبیعی رخ نمی‌دهد می‌بایست آن را به شکل مصنوعی تولید نمود [۱].

لذا پس از بررسی شرایط استاتیکی و دینامیکی پیش‌روی تونل به دو مقوله‌ی اساسی دست می‌یابیم:

۱- پایداری کوتاه مدت یا بلند مدت یک فضای زیرزمینی، رابطه‌ی تنگاتنگی با شکل‌گیری یک اثر قوسی در پیرامون آن دارد و بنابراین این مسئله می‌بایست نخستین موضوع مورد بررسی توسط طراح تونل باشد.

۲- شکل‌گیری یک اثر قوسی و موقعیت آن نسبت به حفره با توجه به نوع و ابعاد واکنش تغییرشکلی محیط در برابر عملیات حفاری مشخص می‌شود.

لذا لازم است تا مطالعات عمیق‌تری در مورد ارتباط میان وضعیت تنش در محیط (تنش القایی در اثر حفاری) و پاسخ تغییرشکلی زمین، صورت گیرد.

۱-۲- طرح مساله

مسئله‌ی ارتباط میان وضعیت تنش در محیط و پاسخ تغییرشکلی محیط به حفاری، همانگونه که تاکنون توسط محققین مختلف پیگیری شده، در چهارچوب سه مرحله‌ی زیر قابل مطالعه می‌باشد [۱]:

مرحله اول، مشاهده منظم و سیستماتیک رفتار تنش- کرنشی سینه‌کار می‌باشد. این مهم از مشاهده‌ی طیف گسترده‌ای از تونل‌های در حال ساخت و ساز به دست می‌آید. توجه ویژه در این مرحله معطوف به رفتار سینه‌کار (و البته نه فقط در مواقعی که سینه‌کار در وضعیت پایدار و بدون شکست است) می‌باشد.

پیچیدگی رفتار تغییر شکلی سینه کار که موضوع اصلی مطالعات ما را تشکیل می‌دهد نیازمند درک مفاهیم جدیدی است که در زیر ارائه شده‌اند:

هسته‌ی پیش‌روی (Advance Core): حجم زمینی که به شکل یک استوانه‌ی مجازی در مقابل سینه‌کار قرار دارد و هنوز حفاری نشده است. ارتفاع و قطر این استوانه برابر با ارتفاع و قطر تونل است و تغییر شکل‌ها در طول آن که ۲ تا ۳ برابر قطر تونل در نظر گرفته می‌شود، مشاهده و کنترل می‌گردند.

بیرون‌زدگی (Extrusion): اولین مولفه‌ی پاسخ تغییرشکلی محیط به حفاری است. این پدیده به مقاومت و خواص تغییرشکلی هسته پیش‌روی و همچنین میدان تنش اصلی که در معرض آن قرار گرفته، وابسته است. بیرون‌زدگی روی سطح سینه‌کار و در امتداد محور طولی تونل نمود پیدا می‌کند و هندسه‌ی آن می‌تواند کمابیش دارای تقارن بوده (شکم دادگی سینه‌کار) و یا ناشی از دوران سینه‌کار باشد.

حفره (Cavity): به قسمت حفاری شده‌ی تونل اطلاق می‌شود.

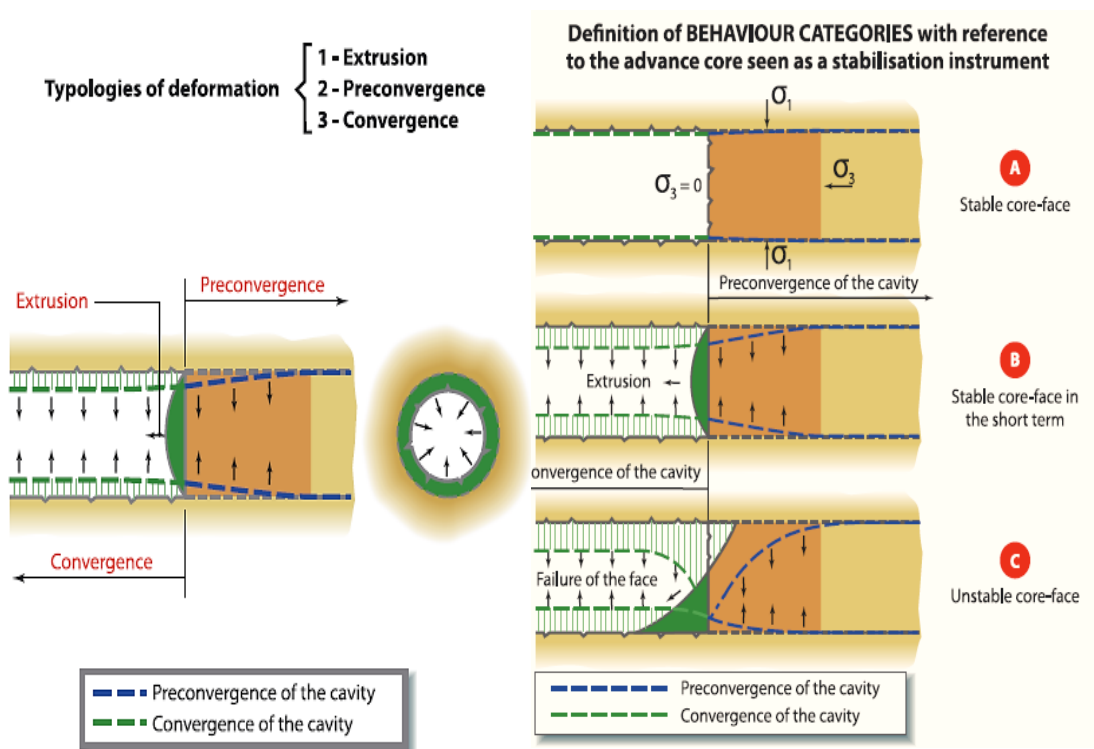
همگرایی (Convergence): نزدیک شدن جداره‌های حفره در اثر پیش‌روی حفاری که به صورت مداوم در حین حفاری و پس از آن در طول عمر بهره‌برداری تونل توسط ابزارهایی که روی جداره نصب می‌شوند، اندازه‌گیری و کنترل می‌شود.

پیش همگرایی (Preconvergence): همگرایی پروفیل فرضی تونل در منطقه‌ی پیش‌روی سینه‌کار (منظور منطقه‌ای است که هنوز حفر نشده) که به شدت به نحوه‌ی تعامل میان هسته با میدان تنش اصلی که در معرض آن قرار دارد، وابسته است.

اقدامات محدودسازی (Confinement): در مواردی که شرایط تنش-کرنشی سینه‌کار به نحوی است که در محدوده‌ی رفتاری الاستیک و پایدار قرار دارد (دسته رفتاری A در شکل ۱-۲، الف)، تنها با اقدامات محدودسازی در قسمت حفره می‌توان فرایند حفاری را ادامه داد.

اقدامات پیش محدودسازی (Preconfinement): در مواردی که شرایط تنش-کرنش در سینه‌کار در محدوده‌ی الاستو-پلاستیک یا شکست (دسته رفتاری B و C در شکل ۱-۲، الف) قرار داشته باشد، باید با اقدامات پیش محدودسازی در داخل هسته‌ی پیش‌روی، به افزایش سختی و جلوگیری از ریزش آن کمک نمود.

شکل ۱-۲ ب، این مفاهیم را بهتر نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: الف) دسته‌های رفتاری محیط در پاسخ به حفاری (دسته‌های A، B و C) ب) مفاهیم بیرون‌زدگی، همگرایی و پیش همگرایی [۱]

سینه‌کار تقویت شده (Reinforced Tunnel Face): در کلیه‌ی قسمت‌های تحقیق پیش‌رو، منظور از سینه‌کار تقویت شده، سینه‌کاری است که در داخل آن لوله‌های از جنس الیاف شیشه با تزریق فشاری دوغاب قرار گرفته‌اند و سختی آن را بهبود بخشیده‌اند.

سینه‌کار بدون تقویت (Unreinforced Tunnel Face): در کلیه‌ی قسمت‌های تحقیق پیش‌رو، منظور از سینه‌کار تقویت نشده، سینه‌کاری است که بدون هرگونه اقدامات پیش محدودسازی حفاری می‌شود، همانگونه که در روش‌های مرسوم به کار گرفته می‌شد.

مرحله دوم مطالعات، تحلیل تفصیلی رفتار سینه‌کار به ویژه در مورد پدیده‌های ناپایداری مشاهده شده، می‌باشد. هدف در اینجا جستجوی رابطه‌ای میان رفتار تنش-کرنشی مجموعه هسته-سینه‌کار (بیرون‌زدگی و پیش همگرایی) با رفتار کل حفره (به لحاظ همگرایی) است. مطالعات صورت گرفته توسط محققین، نشان داده است که کلیه‌ی واکنش‌های تغییرشکلی (بیرون‌زدگی، پیش همگرایی و همگرایی) به صورت

قاعده‌مندی تابع سختی هسته‌ی پیش‌روی هستند و سختی هسته نیز به نوبه‌ی خود تابعی از حالت تنش‌ی وارد بر آن می‌باشد [۱].

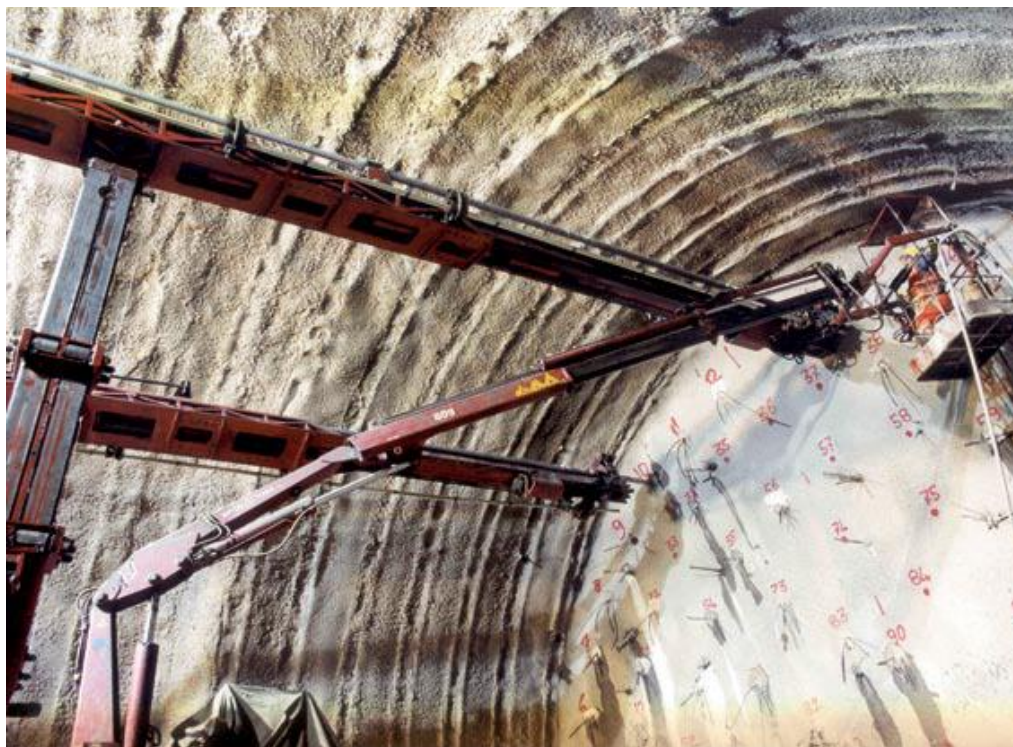
در مرحله‌ی سوم مطالعات، تلاش بر این است که کشف شود تا چه حد می‌توان این واکنش‌های تغییرشکلی را با تمرکز بر مستحکم سازی هسته پیش‌روی، کنترل نمود. برای این منظور، رفتار تنش- کرنشی هسته به صورت منظم با رفتار تنش-کرنشی حفره مقایسه شده و سپس داده‌های حاصل از این واریسی در هر دو حالت حضور و عدم حضور تمهیدات تقویتی و محافظتی هسته، مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

بنابراین مسئله‌ی اساسی مطرح شده در این پروژه اینست که با تکیه بر مدل‌های سه بعدی جستجو شود که تا چه حد می‌توان با افزایش سختی هسته به کمک نصب لوله‌های الیاف شیشه در داخل آن، تغییرشکل‌های سطحی و سینه‌کار را کنترل نموده و به حفاری در زمین‌های نرم و ریزشی ادامه داد.

در شرایط اجرایی، این لوله‌ها با اعمال فشار و تزریق دوغاب در طول آن‌ها به صورت دستی (شکل ۱-۳) یا ماشینی (شکل ۱-۴) در داخل سینه‌کار نصب می‌شوند.



شکل ۱-۳: نصب المان‌های الیاف شیشه در داخل سینه‌کار با تزریق دوغاب (دستی) [۱]



شکل ۱-۴: نصب المان‌های الیاف شیشه در داخل سینه‌کار با تزریق دوغاب (ماشینی) [۱]

۳-۱- موضوع تحقیق

در تحقیق پیش‌رو، موضوع اصلی مورد بررسی، تاثیر نصب لوله‌های الیاف شیشه در داخل سینه‌کار و افزایش سختی هسته‌ی پیش‌روی در کاستن تغییرشکل‌های سینه‌کار و نشست‌های سطح زمین ناشی از تونل‌سازی می‌باشد. همچنین تاثیر تغییر پارامترهای مختلف المان‌های لوله‌ای، محیط حفاری و شرایط هندسی مدل نیز دیده شده است.

۴-۱- اهمیت موضوع

روش تونل‌سازی مورد بررسی، امروزه با سرعت فزاینده‌ای در دست تحقیق و مطالعات میدانی و آزمایشگاهی است و تاکنون بیش از ۴۰۰ کیلومتر تونل به این روش در کشورهایی همچون ایتالیا، فرانسه و برزیل ساخته شده است [۱]. اما در کشور عزیزمان حتی در مرحله مطالعات اولیه نیز به صورت جدی بررسی‌هایی روی آن صورت نپذیرفته است. از طرفی با توجه به افزایش روزافزون روند ساخت و ساز تونل در شهرهای مختلف ایران پهناور، نیاز به روش‌های جدید برای افزایش سرعت و ایمنی حفاری بسیار محسوس می‌باشد. مطالعات عددی جنبه‌های مختلف روش می‌تواند آغازگر بررسی‌های جدی برای به کارگیری آن در شرایط واقعی و اجرایی در کشور باشد.

۱-۵- هدف تحقیق

هدف از تحقیق صورت گرفته، امکان‌سنجی استفاده از روش تقویت سینه‌کار به هنگام حفاری در زمین‌های نرم و برداشتن گامی در راستای آغاز به کارگیری و توسعه‌ی این روش نوین در صنعت تونل‌سازی کشور می‌باشد.

۱-۶- سوالات تحقیق

مهم‌ترین سؤالاتی که در آغاز تحقیق وجود دارد عبارتست از:

روش معرفی شده تا چه حد در ایران و با توجه به شرایط ژئوتکنیکی آن و امکانات در دسترس قابل اجراست. حضور یا عدم حضور تراز آب زیرزمینی در محدوده‌ی تونل چه تاثیری در کارایی روش خواهد داشت. عملکرد این روش در کاهش تغییر شکل‌ها به چه صورت می‌باشد. هزینه‌های ناشی از حفاری به این روش با روش‌های قبلی چه میزان تفاوت دارد. در طول تحقیق پیش‌رو سعی می‌گردد تا همه‌ی این سوالات پوشش داده شده و با استناد به مدل‌سازی‌های عددی و نتایج اجرایی از تونل‌های ساخته شده بدین روش، به پاسخ به آن‌ها پرداخته شود.

۱-۷- روش تحقیق

در این تحقیق از اطلاعات ژئوتکنیکی خط ۷ متروی تهران قسمت شرقی-غربی، برای مدل‌سازی استفاده شده است. مدل‌سازی با استفاده از نرم افزار FLAC 3D و در قسمتی از تونل که با بررسی‌های انجام شده بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی، به نظر می‌رسد دارای زمین سست و ریزشی باشد، صورت گرفته است. مدل سه بعدی تونل به طول ۱۰۰ متر و با فاصله‌ی کافی از مرزهای ثابت جهت عدم تاثیرگذاری ساخته شد. (اطلاعات کامل‌تر ابعاد مدل، زمین‌شناسی منطقه، ابعاد تونل و مشخصات فیزیکی المان‌های به کار رفته در سینه‌کار، در فصل ۳ آورده شده است). برای باربرداری از روی یک مقطع مشخص، از روش فشار محصورکننده‌ی معادل استفاده می‌گردد. یعنی برداشتن خاک از محدوده‌ای که قرار است حفاری شود، اعمال پوشش بتنی صلب به جداره‌ها و همچنین اعمال تنش افقی معادل به سینه‌کار و سپس برداشتن این تنش در گام‌های یکسان که همان روند حفاری را شبیه‌سازی می‌کند. برای مشاهده‌ی تغییرات در حین حفاری نیز فرایند قرار دادن الیاف در داخل هسته، انجام حفاری با گام مشخص و همزمان کردن و دور ریختن الیاف نصب شده و سپس نصب سری بعدی از آن‌ها در مقطعی که ضروریست، صورت گرفته است.

۸-۱- ساختار پایان نامه

این پایان نامه در ۵ فصل به شرح ذیل تهیه و تدوین شده است:

در این فصل مقدمه‌ای بر آنچه که در هنگام باز شدن یک حفره در زمین به هنگام تونل‌سازی، برای جریان‌های تنشی در خاک اتفاق می‌افتد و انواع پاسخ زمین در مقابل این تغییر جریان‌های تنشی، به طور مختصر آورده شده است. در ادامه به طرح مسئله‌ی مورد بررسی، اهمیت موضوع، اهداف تحقیق و روشی که در این پژوهش به کار گرفته می‌شود، پرداخته شده است.

در فصل دوم مروری بر فعالیت‌های صورت گرفته توسط پیشینیان در زمینه‌ی موضوع مورد بررسی و در ادامه روش‌های مرسوم حفاری تونل که از گذشته تا به امروز به کار گرفته می‌شوند، آورده شده، همچنین مقایسه‌ی کوتاهی از زمان و هزینه‌های به کار رفته در روش نوین مورد بررسی با سایر روش‌های مرسوم، که توسط بنیان‌گذار این روش صورت گرفته، آورده شده است.

در فصل سوم هندسه‌ی مدل، مشخصات ژئوتکنیکی مسیر تونل، مشخصات لوله‌های به کار رفته به عنوان الیاف شیشه و المان پوسته‌ای به کار گرفته جهت پوشش تونل، معیار گسیختگی خاک و سایر فرضیات به کار گرفته شده توضیح داده شده است.

در فصل چهارم، پارامترهای متعددی برای لوله‌ها همچون طول، تعداد و سختی آن‌ها به عنوان متغیر در نظر گرفته شده و به مقایسه‌ی تغییر شکل‌ها در دو حالت سینه‌کار با و بدون تقویت پرداخته شده است. همچنین در ادامه به تعیین مقطع ضروری در حین حفاری برای نصب سری بعدی الیاف، مشاهده‌ی نیروی ایجاد شده در لوله‌ها در مراحل مختلف حفاری، مشاهده‌ی ناحیه پلاستیک ایجاد شده در مقطع با و بدون تقویت، تاثیر سربار تونل، تاثیر حضور تراز آب زیرزمینی در محدوده‌ی تونل پرداخته و نتایج مدل‌سازی‌ها آورده شده است.

در پایان و در فصل پنجم نیز نتیجه‌گیری درمورد نتایج به دست آمده از مدل‌های سه‌بعدی و پیشنهاداتی برای انجام مطالعات بیشتر بر روی این موضوع آورده شده است.