



پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک

مدلسازی پدیده فرونشست سطح زمین، ناشی از تونل سازی،

به کمک روش های عددی و تکنیک تداخل سنجی راداری

توسط:

علیرضا ایروانی ۸۸۰۰۹۲۴

اساتید راهنما:

جناب آقای دکتر قاسم زاده

جناب آقای دکتر ولدان زوج

استاد مشاور:

سرکار خانم دکتر دهقانی

زمستان ۱۳۹۰

الله أكبر

تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه خانم / آقای: علیرضا ایروانی

را با عنوان: مدل سازی پدیده فرونشست سطح زمین، ناشی از تونل سازی، به کمک روش های

عددی و تکنیک تداخل سنجی راداری

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

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	حسن قاسم زاده	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	محمدجواد ولدان زوج	دانشیار	
۳- استاد مشاور	مریم دهقانی	استادیار	
۴- استاد ممتحن	فرزین کلانتری	استادیار	
۵- استاد ممتحن	مهرداد امامی	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	فرزین کلانتری	استادیار	

تقدیم بہ

مادر کہ رسم محبت بہ من آموخت

پدر کہ رسم زندگی بہ من آموخت

ہمسرم کہ رسم عاشقی بہ من آموخت

تشکر و قدردانی

با تشکر از زحمات بی دریغ و حمایت‌های همیشگی جناب آقای مهندس کتابچی و همسر محترم ایشان با تشکر از راهنمایی و راهگشایی همه جانبه جناب آقای دکتر قاسم‌زاده در تمامی مراحل تهیه این رساله با تشکر از راهنمایی و همکاری همه جانبه جناب آقای دکتر ولدان‌زوج در تمامی مراحل تهیه این رساله با تشکر از زحمات و راهنمایی‌های بی‌دریغ سرکار خانم دکتر دهقانی در تمامی مراحل تهیه این رساله با تشکر از همراهی‌ها و همکاری‌های دوستان عزیز، آقایان مهندسین صدوقی، یزدانی، برازنده و روحانی با تشکر از همکاری اعضای محترم هیئت مدیره شرکت بلندپایه در راستای گردآوری این رساله و در پایان با تشکر از تمامی عزیزانی که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم اینجانب را در گردآوری این رساله یاری کردند.

چکیده

پژوهش حاضر با هدف به کارگیری یک روش تقریبی نسبتاً ساده در راستای ارائه مدلی جهت برآورد فرونشست سطح زمین، ناشی از تونل‌سازی، توأم با بهره‌گیری از فناوری تداخل سنجی راداری انجام شده است. مدل‌های شبیه‌سازی شده، شامل گروهی از پارامترهای مؤثر بر فرونشست در دو حوزه مشخصه‌های هندسی و حفاری تونل‌سازی می‌باشند. بدین منظور فرآیند تونل‌سازی در بخشی از پروژه‌های در حال اجرای ناوگان حمل و نقل زیرزمینی تهران بزرگ به کمک دو الگوریتم عددی مبتنی بر هوش مصنوعی، نخست شبکه عصبی مصنوعی و دوم مدل تطبیقی عصبی- فازی شبیه‌سازی شده است. به موازات استفاده از این دو روش، مدل یاد شده جهت مقایسه نتایج برآوردها به کمک روش اجزاء محدود در محیط نرم‌افزار Plaxis3D نیز شبیه‌سازی شده است. در پایان رفتار و میزان حساسیت این پدیده نسبت به پارامترهای ورودی مدل، ارزیابی می‌شود.

بدین ترتیب پس از معرفی و طبقه‌بندی مهمترین روش‌ها و رویکردهای مدل‌سازی پدیده فرونشست ناشی از تونل‌سازی، شبیه‌سازی مسئله در منطقه مورد مطالعه به کمک مدل اجزاء محدود و به استناد اطلاعات روزانه پیشروی جبهه کار و روند حفاری‌ها، گزارش ژئوتکنیک و مشخصات هندسی مسئله در محیط نرم افزار Plaxis3D انجام و نتایج برآورد شبیه‌سازی عددی با قرائت‌های واقعی مشاهداتی مقایسه شد. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر تصاویر رادار با دقت موجود، توانایی ثبت اطلاعات فرونشست ناشی از تونل‌سازی در منطقه را نداشتند و اطلاعات فرونشست به دست آمده از تحلیل تصاویر راداری صرفاً به صورت گستره فرونشستی در بخش‌های جنوبی شهر تهران ثبت شد، لذا فرآیند شبیه‌سازی به کمک دو الگوریتم مبتنی بر هوش مصنوعی با استفاده از اطلاعات پایش میدانی به روش ترازبایی دقیق صورت پذیرفت. مدل‌های هوش مصنوعی بر اساس اطلاعات هشت پارامتر کلیدی مؤثر بر فرونشست‌های ناشی از تونل‌سازی، شامل مشخصه‌های هندسی و حفاری تحت عنوان ورودی‌های مدل و نتایج قرائت‌های میدانی فرونشست تحت عنوان خروجی مدل، آموزش داده شده و طی یک فرآیند آزمایشی اقدام به برآورد مقادیر فرونشست کردند. در ادامه مدل شبکه عصبی مصنوعی، نسبت به پارامترهای ورودی حساسیت سنجی شد. نتیجه مهم این حساسیت‌سنجی، طبقه‌بندی پارامترهای ورودی مدل در قالب هشت اولویت مؤثر بر فرونشست بود. در نهایت، نتایج برآورد فرونشست دو مدل هوش مصنوعی با سه روش ارزیابی خطا مورد بررسی قرار گرفت و با یکدیگر و نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه شد. نتایج به دست آمده حاکی از دقت نسبتاً بالای برآوردها بود. ذکر این نکته ضروری است که نتایج شبیه‌سازی‌ها و حساسیت سنجی انجام شده به کمک دو مدل هوش مصنوعی صرفاً به موارد مشابه قابل تعمیم بوده و استفاده کلان از آن‌ها نیازمند مطالعات موردی گسترده‌تر می‌باشد.

کلید واژه: فرونشست، شبکه عصبی مصنوعی، مدل تطبیقی عصبی- فازی، حساسیت‌سنجی، تداخل سنجی راداری

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول‌ها.....	د
فهرست شکل‌ها.....	ه
فهرست علائم و نشانه‌ها.....	ی
مقدمه.....	۱
۱-۱- کلیات بحث.....	۱
۲-۱- ضرورت تحقیق.....	۵
۳-۱- هدف تحقیق.....	۶
۴-۱- سؤالات تحقیق.....	۶
۵-۱- روش تحقیق.....	۷
۶-۱- ساختار تحقیق.....	۸
فصل ۲- مبانی مدلسازی پدیده فرونشست ناشی از تونلسازی.....	۱۰
۱-۲- مقدمه‌ای بر روش تونل‌سازی مورد مطالعه پژوهش حاضر.....	۱۰
۲-۲- مدل‌سازی پدیده فرونشست ناشی از تونل‌سازی.....	۱۲
۱-۲-۲- فاکتورهای اصلی مؤثر بر فرونشست ناشی از تونل‌سازی.....	۱۳
۱-۲-۲-۱- مقدمه‌ای بر جابجایی توده زمین ناشی از تونل‌سازی.....	۱۳
۱-۲-۲-۲- طبقه‌بندی عوامل تأثیر گذار بر فرونشست‌های سطح زمین ناشی از تونل‌سازی.....	۱۳
۲-۲-۲- اثر بافت زمین اطراف تونل بر فرونشست‌های ناشی از تونل‌سازی.....	۱۴
۱-۲-۲-۲- تونل‌سازی در محیط‌های خاکی یا سنگی نسبتاً نرم یا ضعیف.....	۱۴
۲-۲-۲-۲- تونل‌سازی در محیط‌های سخت سنگی.....	۱۵
۳-۲-۲- اثر روش حفاری جلو باز سنتی بر فرونشست‌های ناشی از تونل‌سازی.....	۱۶
۴-۲-۲- روش‌های مدل‌سازی پدیده فرونشست ناشی از تونل‌سازی.....	۱۸
۱-۴-۲-۲- مدل‌سازی به روش تجربی.....	۱۸
۲-۴-۲-۲- مدل‌سازی به روش تحلیلی.....	۲۳
۳-۴-۲-۲- مدل‌سازی به روش عددی.....	۲۶
۴-۴-۲-۲- مدل‌سازی به کمک الگوهای عددی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی.....	۳۷
۵-۲-۲- بحث و بررسی.....	۵۲
فصل ۳- روش‌های پایش اطلاعات فرونشست ناشی از تونل‌سازی.....	۵۶
۱-۳- روش ترازبایی دقیق.....	۵۶
۲-۳- سیستم تعیین موقعیت جهانی.....	۵۸
۳-۳- تکنیک تداخل سنجی راداری.....	۶۰
۱-۳-۳- مقدمه.....	۶۰
۲-۳-۳- تاریخچه بهره‌گیری از تکنیک تداخل سنجی راداری در پایش اطلاعات فرونشستی.....	۶۰
۳-۳-۳- اصول کلی پایش و پردازش اطلاعات به روش تداخل سنجی راداری.....	۶۳

۶۳	InSAR - هندسه ۱-۳-۳-۳
۶۳	 تعیین جابجایی سطح زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری ۲-۳-۳-۳
۶۸	 محدودیت‌ها و نقاط ضعف روش تداخل سنجی راداری ۴-۳-۳
۶۸	 همبستگی داده‌ها در فناوری تداخل سنجی راداری ۱-۴-۳-۳
۶۹	 مسأله ابهام فاز در تکنولوژی تداخل سنجی راداری ۲-۴-۳-۳
۶۹	 بحث و بررسی ۴-۳-۳
۷۰	فصل ۴- مطالعات میدانی و تحلیل تصاویر رادار.....
۷۱	 معرفی مناطق مورد مطالعه؛ اطلاعات جغرافیایی، اجرایی، چینه شناسی و ژئوتکنیک ۱-۴-۱
۷۳	 منطقه شماره یک ۱-۱-۴
۷۵	 منطقه شماره دو ۲-۱-۴
۷۸	 منطقه شماره سه ۳-۱-۴
۸۰	 روش و روند کار تهیه نقشه جابجایی و ارائه نتایج ۲-۴-۲
۸۰	 تکنیک تداخل سنجی راداری ۱-۲-۴
۸۰	 شناسایی مناطق مورد نظر ۱-۱-۲-۴
۸۱	 ثبت هندسی تصاویر ۲-۱-۲-۴
۸۱	 تشکیل اینترفروگرام ۳-۱-۲-۴
۸۲	 حذف اثر توپوگرافی ۴-۱-۲-۴
۸۳	 حل ابهام فاز اینترفروگرام جابجایی ۵-۱-۲-۴
۸۳	 تبدیل اطلاعات فاز به جابجایی و کالیبراسیون نهایی ۶-۱-۲-۴
۸۶	 روش تراز یابی دقیق درجه یک ۲-۲-۴
۸۶	 ضرورت پایش‌های میدانی در پروژه حاضر ۱-۲-۲-۴
۸۶	 روند کار ۲-۲-۲-۴
۹۰	 بررسی و مقایسه نتایج دو روش پایش اطلاعات فرونشست ۳-۲-۴
۹۱	 روش و روند کار مطالعه و ثبت اطلاعات خروج ذرات ریزدانه ۳-۴-۳
۹۳	فصل ۵- مدل سازی عددی مطالعات موردی.....
۹۳	 روش شبیه سازی اجرای تونل ۱-۵-۱
۹۴	 مدل سازی عددی مطالعه موردی ۲-۵-۱
۹۵	 روند کار ۱-۲-۵
۹۹	 ارائه نتایج ۲-۲-۵
۱۰۰	 ارائه نتایج شبیه سازی با اطلاعات مدل مرجع ۱-۲-۲-۵
۱۰۳	فصل ۶- مدل سازی به کمک الگوریتم های عددی مبتنی بر هوش مصنوعی.....
۱۰۵	 مدل سازی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی ۱-۶-۱
۱۰۵	 طراحی شبکه ۱-۱-۶
۱۰۶	 مروری بر پارامترهای ورودی و خروجی مدل و نحوه محاسبه آن‌ها ۲-۱-۶
۱۰۶	 معرفی پارامترهای ورودی و خروجی مدل نحوه محاسبه آن‌ها ۱-۲-۱-۶
۱۱۰	 بررسی رفتاری پارامترهای ورودی در مقابل خروجی مدل با دو رویکرد جزئی و کلان ۲-۲-۱-۶
۱۱۳	 آموزش شبکه عصبی مصنوعی ۳-۱-۶
۱۱۴	 ارزیابی مدل طراحی شده ۴-۱-۶
۱۱۴	 بررسی ضریب همبستگی داده های برآورد شده در مدل شبیه سازی شده ۱-۴-۱-۶

۱۱۷	۶-۱-۲- بررسی خطای برآوردها در بهترین مدل شبیه‌سازی شده
۱۱۷	۶-۱-۳- بررسی خطای میانگین مربعات برآوردها در مدل شبیه‌سازی شده
۱۱۸	۶-۲- مدل‌سازی با استفاده از مدل تطبیقی عصبی- فازی
۱۱۸	۶-۲-۱- طراحی شبکه
۱۱۹	۶-۲-۲- آموزش مدل تطبیقی
۱۲۱	۶-۲-۳- ارزیابی مدل تطبیقی طراحی شده
۱۲۱	۶-۲-۳-۱- بررسی ضریب همبستگی داده‌های برآورد شده در مدل تطبیقی شبیه‌سازی شده
۱۲۳	۶-۲-۳-۲- بررسی خطای برآوردها در بهترین مدل تطبیقی شبیه‌سازی شده
۱۲۳	۶-۲-۳-۳- بررسی خطای میانگین مربعات برآوردها در مدل تطبیقی شبیه‌سازی شده
۱۲۴	۶-۳- تحلیل حساسیت مدل شبیه‌سازی شده نسبت به پارامترهای ورودی
۱۲۶	۶-۴- بحث و بررسی
۱۲۸	فصل ۷- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات
۱۲۸	۷-۱- نتیجه‌گیری
۱۳۱	۷-۲- توصیه و پیشنهادات
۱۳۲	ضمیمه أ - نتایج برداشت‌های میدانی فرونشست به روش ترازیابی دقیق و پارامترهای ورودی مدل‌های هوش مصنوعی
۱۵۳	ضمیمه ب- اطلاعات گمانه حفاری شده شماره ۱۰ و نتایج آزمایش‌های شناسایی مشخصات ژئوتکنیک مربوط به آن؛ منطقه شماره ۳
۱۶۴	فهرست مراجع

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول شماره ۱ : مطالعات انجام شده در زمینه فناوری تداخل سنجی راداری با استفاده از داده‌های ماهواره‌ها.....	۶۲
جدول شماره ۲ : مشخصات سنجنده، زمان و مختصاتی تصاویر راداری مناطق مورد مطالعه.....	۸۳
جدول شماره ۳ : مشخصات هندسی مدل عددی شبیه‌سازی شده منطقه مورد مطالعه.....	۹۸
جدول شماره ۴ : مشخصات ژئوتکنیک مدل شبیه‌سازی شده عددی مربوط به منطقه مورد مطالعه شماره سه.....	۱۰۰
جدول شماره ۵ : برآوردهای انجام شده در مقایسه با نتایج مشاهدات میدانی و ارزیابی خطا – مدل مرجع.....	۱۰۲
جدول شماره ۶ : نمونه جدول تهیه شده از پارامترهای ورودی و خروجی هر دو مدل عصبی و تطبیقی.....	۱۱۱
جدول شماره ۷ : اطلاعات ضریب همبستگی داده‌های برآورد شده برای مدل طراحی شده پس از ۱۰۰ بار اجرا.....	۱۱۷
جدول شماره ۸ : اطلاعات ضریب همبستگی داده‌ها برای بهترین مدل تطبیقی شبیه‌سازی شده.....	۱۱۷
جدول شماره ۹ : اطلاعات خطای میانگین مربعات برای مدل طراحی شده پس از ۱۰۰ بار اجرای مدل.....	۱۲۰
جدول شماره ۱۰ : اطلاعات ضریب همبستگی داده‌ها برای مدل تطبیقی طراحی شده پس از ۱۰۰ بار اجرای مدل.....	۱۲۴
جدول شماره ۱۱ : اطلاعات ضریب همبستگی داده‌ها برای بهترین مدل تطبیقی شبیه‌سازی شده.....	۱۲۴
جدول شماره ۱۲ : اطلاعات خطای میانگین مربعات برای مدل طراحی شده پس از ۱۰۰ بار اجرای مدل.....	۱۲۶
جدول شماره ۱۳ : ترتیب اولویت پارامترهای ورودی مدل شبیه‌سازی شده عصبی پس از ۱۰۰ بار اجرای مدل.....	۱۲۷

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ : دیاگرام کلیات روش تحقیق در پژوهش حاضر.....	۸
شکل ۱-۲ : استفاده از سیستم نگهدارنده مهاربند و بتن پاششی در تونل‌سازی به روش جلو باز سنتی.....	۱۲
شکل ۲-۲ : شمای جام فرونشست سطح زمین ناشی از تونل‌سازی.....	۱۴
شکل ۳-۲ : فرونشست ایجاد شده ناشی از اجرای تونل و زهکش شدن آب از مسیر تونل Gotthard سوییس.....	۱۶
شکل ۴-۲ : مؤلفه‌های اصلی تغییر شکل زمین ناشی از تونل‌سازی به روش جلو باز.....	۱۷
شکل ۵-۲ : نمایش عرضی توزیع گوسی جام فرونشست ناشی از تونل‌سازی.....	۱۹
شکل ۶-۲ : نمایش حجم زمین واداده، V_t ، طی فرآیند تونل‌سازی.....	۱۹
شکل ۷-۲ : رابطه بین عرض جام فرونشست و عمق تونل برای خاک‌های مختلف.....	۲۱
شکل ۸-۲ : عرض جام فرونشست پایش شده به صورت تابعی از عمق.....	۲۱
شکل ۹-۲ : منحنی فرونشست طولی در راستای پروفیل طولی تونل.....	۲۲
شکل ۱۰-۲ : مسئله شماره یک Mindlin، بار نقطه‌ای در نیم فضای الاستیک نامحدود.....	۲۳
شکل ۱۱-۲ : نمونه‌ای از مدل‌سازی عددی سه بعدی فرآیند تونل‌سازی و فرونشست ناشی از آن.....	۲۸
شکل ۱۲-۲ : مش بندی محیط تونل یک مدل عددی در محیط نرم افزار اجزاء محدود Plaxis3D.....	۲۸
شکل ۱۳-۲ : جزئیات شرایط مرزی کف، سطح و جداره قائم مسئله در حالت متقارن در نرم‌افزار Plaxis3D.....	۲۹
شکل ۱۴-۲ : اثر سائز مش (تعداد المان در طول محافظت نشده) بر نتایج تحلیل عددی.....	۳۱
شکل ۱۵-۲ : نمونه‌ای از ابعاد محدوده مش‌بندی شده یک تونل طی شبیه‌سازی سه بعدی عددی.....	۳۲
شکل ۱۶-۲ : حالت‌های مختلف تنش‌های اولیه در مسئله تونل‌سازی.....	۳۳
شکل ۱۷-۲ : نمودار رابطه بین OCR و K_0	۳۴
شکل ۱۸-۲ : نتایج فرونشست طولی یک تونل به روش عددی برای مقادیر مختلف K_0	۳۵
شکل ۱۹-۲ : نتایج نرمال شده فرونشست طولی یک تونل به روش عددی برای مقادیر مختلف K_0	۳۵
شکل ۲۰-۲ : نتایج فرونشست عرضی یک تونل به روش عددی برای مقادیر مختلف K_0	۳۶
شکل ۲۱-۲ : مدل ریاضی نورون با ورودی p و خروجی a - عملکرد تابع محرک بر روی ورودی‌ها.....	۴۳
شکل ۲۲-۲ : نمونه‌ای از چند تابع سیگموئیدی مورد استفاده در شبکه عصبی به عنوان تابع تبدیل (محرک).....	۴۴
شکل ۲۳-۲ : مدل ساده سازی شده ریاضی یک شبکه عصبی مصنوعی تک نورون.....	۴۵
شکل ۲۴-۲ : نمونه‌ای از یک توپولوژی فرضی برای شبکه عصبی مصنوعی.....	۴۵
شکل ۲۵-۲ : شمای کلی و ساده ساز شده یک سیستم منطق فازی (FIS).....	۴۹

- شکل ۲-۲۶: ساختار کلی شبکه ANFIS ۴۹
- شکل ۲-۲۷: دو ورودی در مدل درجه اول Sugeno با دو قاعده (قانون) ۵۱
- شکل ۳-۱: اصول روش ترازایی دقیق درجه ۱ در حالت منفرد ۵۷
- شکل ۳-۲: هندسه برداشت اطلاعات فرونشستی به روش تداخل سنجی راداری ۶۵
- شکل ۴-۱: جانمایی مناطق مورد مطالعه در سطح شهر تهران ۷۲
- شکل ۴-۲: شکل مقطع تونل NATM در حال اجرا در کل مناطق مورد مطالعه ۷۳
- شکل ۴-۳: جانمایی منطقه مورد مطالعه شماره یک ۷۴
- شکل ۴-۴: پروفیل طولی لایه های زیرزمینی مسیر تونل در حال اجرای منطقه شماره یک ۷۴
- شکل ۴-۵: پروفیل طولی مسیر تونل در حال اجرای منطقه شماره یک ۷۷
- شکل ۴-۶: جانمایی منطقه مورد مطالعه شماره دو ۷۸
- شکل ۴-۷: پروفیل طولی لایه های زیرزمینی مسیر تونل در حال اجرای منطقه شماره دو ۷۷
- شکل ۴-۸: پروفیل طولی مسیر تونل در حال اجرای منطقه شماره دو ۷۸
- شکل ۴-۹: جانمایی منطقه مورد مطالعه شماره سه ۸۰
- شکل ۴-۱۰: پروفیل طولی مسیر تونل در حال اجرای منطقه شماره سه به طول تقریبی سه کیلومتر ۸۱
- شکل ۴-۱۱: اینترفروگرام جابجایی بدست آمده از تحلیل تصاویر راداری منطقه شماره سه ۸۴
- شکل ۴-۱۲: نتایج رفع ابهام فاز از اینترفروگرام جابجایی منطقه شماره سه - حاوی اطلاعات فاز ۸۵
- شکل ۴-۱۳: اینترفروگرام نهایی بدست آمده از تحلیل تصویر راداری منطقه شماره سه در همپوشانی با نقشه تهران حاوی اطلاعات جابجایی در واحد متر ۸۶
- شکل ۴-۱۴: پروفیل طولی فرونشست های پایش شده به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری در منطقه شماره سه در مسیر تونل مورد مطالعه ۸۷
- شکل ۴-۱۵: پروفیل طولی فرونشست های پایش شده به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری در منطقه شماره سه در مسیر تونل مورد مطالعه ۸۷
- شکل ۴-۱۶: نمونه ای از جانمایی ۶ ایستگاه قرائت کننده در یک برش عرضی از تونل ۸۹
- شکل ۴-۱۷: جزئیات اجرایی نقاط ثابت برداشت های میدانی ترازایی دقیق درجه یک ۸۹
- شکل ۴-۱۸: جانمایی ایستگاه های ثبت فرونشست روی محور تونل - منطقه شماره سه ۹۰
- شکل ۴-۱۹: قرائت روزانه توسط دوربین نیوو N3 - منطقه شماره سه ۹۰
- شکل ۴-۲۰: میر دو لبه انوار - ترازایی دقیق منطقه شماره سه ۹۰
- شکل ۴-۲۱: جانمایی ایستگاه های ثبت فرونشست در عرض تونل - منطقه شماره سه ۹۰
- شکل ۴-۲۲: ثبت روزانه اطلاعات پیشروی جبهه کار تونل منطقه شماره سه ۹۰
- شکل ۴-۲۳: دوربین نیوو N3 مورد استفاده جهت ثبت اطلاعات فرونشستی منطقه مورد مطالعه شماره سه ۹۰
- شکل ۴-۲۴: جزئیات اجرایی و اندازه های میله (میخ) آهنی انتهای تشکیلات نقاط ثابت ۹۱
- شکل ۴-۲۵: نمونه ای از فرونشست طولی (در راستای محور تونل) ۹۲

شکل ۴-۲۶: نمونه‌ای از فرونشست عرضی (برش از مقطع تونل)..... ۹۲

شکل ۴-۲۷: یکی از چاه‌های زهکش منطقه شماره یک..... ۹۴

شکل ۴-۲۸: برداشت نمونه آب جهت بررسی وضعیت خروج ذرات ریزدانه - تونل منطقه شماره یک ۹۴

شکل ۴-۲۹: وضعیت ریزش آب در تونل منطقه شماره دو و عملکرد تونل به عنوان زهکش..... ۹۴

شکل ۴-۳۰: وضعیت ریزش آب در تونل‌های منطقه شماره یک حین عملیات اجرای پوشش نهایی..... ۹۴

شکل ۵-۱: روش پیشروی گام به گام جهت تونل‌سازی به روش سنتی NATM..... ۹۶

شکل ۵-۲: پروفیل طولی بخش مورد نظر از تونل مورد مطالعه جهت شبیه‌سازی عددی..... ۹۸

شکل ۵-۳: نحوه مش‌بندی مدل شبیه‌سازی شده تونل مورد مطالعه، در نرم افزار اجزاء محدود Plaxis3D..... ۱۰۰

شکل ۵-۴: نتایج رگرسیون خطی و ضریب همبستگی میان داده‌های برآورد شده به روش اجزاء محدود و داده‌های مشاهداتی میدانی..... ۱۰۲

شکل ۵-۵: منحنی فرونشست عرضی برای مقطع کیلومتر ۱+۹۱۰..... ۱۰۳

شکل ۵-۶: منحنی فرونشست طولی برای کیلومتراژ ۱+۸۳۰ تا ۱+۹۲۰..... ۱۰۳

شکل ۵-۷: منحنی فرونشست عرضی برای مقطع کیلومتر ۱+۹۱۰..... ۱۰۳

شکل ۵-۸: منحنی فرونشست طولی برای کیلومتراژ ۱+۸۳۰ تا ۱+۹۲۰..... ۱۰۳

شکل ۵-۹: منحنی فرونشست عرضی برای مقطع کیلومتر ۱+۹۱۰..... ۱۰۳

شکل ۵-۱۰: منحنی فرونشست طولی برای کیلومتراژ ۱+۸۳۰ تا ۱+۹۲۰..... ۱۰۳

شکل ۶-۱: الگوریتم پیشنهادی جهت شبیه‌سازی پدیده فرونشست به کمک دو مدل مبتنی بر هوش مصنوعی..... ۱۰۸

شکل ۶-۲: پارامترهای ورودی مورد استفاده در دو مدل هوش مصنوعی بر اساس شماره و حروف اختصاری..... ۱۱۱

شکل ۶-۳: تغییرات کلیه داده‌های مربوط به عمق تاج جبهه کار فوقانی در مقابل فرونشست‌های متناظر قرائت شده..... ۱۱۳

شکل ۶-۴: تغییرات کلیه داده‌های مربوط به عمق تاج جبهه کار تحتانی در مقابل فرونشست‌های متناظر قرائت شده..... ۱۱۳

شکل ۶-۵: تغییرات کلیه داده‌های مربوط به فاصله افقی جبهه کار فوقانی در مقابل فرونشست‌های متناظر قرائت شده..... ۱۱۳

شکل ۶-۶: تغییرات کلیه داده‌های مربوط به فاصله افقی جبهه کار تحتانی در مقابل فرونشست‌های متناظر قرائت شده..... ۱۱۳

شکل ۶-۷: تغییرات کلیه داده‌های مربوط به پیشروی انباشته جبهه کار فوقانی در مقابل فرونشست‌های متناظر قرائت شده..... ۱۱۳

شکل ۶-۸: تغییرات کلیه داده‌های مربوط به پیشروی انباشته جبهه کار تحتانی در مقابل فرونشست‌های متناظر قرائت شده..... ۱۱۳

شکل ۹-۶: تغییرات کلیه داده‌های مربوط به فاصله فضایی تاج جبهه کار فوقانی در مقابل فرونشست‌های متناظر قرائت شده..... ۱۱۴

شکل ۱۰-۶: تغییرات کلیه داده‌های مربوط به مدت زمان سپری شده در مقابل فرونشست‌های متناظر قرائت شده..... ۱۱۴

شکل ۱۱-۶: تغییرات داده‌های یکی از ایستگاه‌های ترازیب مربوط به فاصله افقی نزدیکترین جبهه کار فوقانی تا ایستگاه ترازیب در مقابل فرونشست‌های متناظر قرائت شده..... ۱۱۴

شکل ۱۲-۶: تغییرات داده‌های یکی از ایستگاه‌های ترازیب مربوط به فاصله افقی نزدیکترین جبهه کار تحتانی تا ایستگاه ترازیب در مقابل فرونشست‌های متناظر قرائت شده..... ۱۱۴

شکل ۱۳-۶: منحنی عملکرد مدل برای هر سه گروه داده، در بهترین حالت جواب‌ها پس از ۱۰۰ تکرار..... ۱۱۶

شکل ۱۴-۶: نمودار مقایسه بهترین نتایج برآورد شده شبکه عصبی در مقایسه با واقعیت - داده‌های آموزش..... ۱۱۷

شکل ۱۵-۶: نمودار مقایسه بهترین نتایج برآورد شده شبکه عصبی در مقایسه با واقعیت - داده‌های آزمایش..... ۱۱۷

شکل ۱۶-۶: نتایج گرافیکی فرآیند شبیه‌سازی پدیده فرونشست ناشی از تونل‌سازی در بهترین مدل عصبی مصنوعی طراحی شده..... ۱۱۸

شکل ۱۷-۶: نمودار فراوانی ضریب همبستگی داده‌های برآورد شده جهت آموزش شبکه به ازاء ۱۰۰ بار اجرا..... ۱۱۸

شکل ۱۸-۶: نمودار فراوانی ضریب همبستگی داده‌های برآورد شده جهت آزمایش شبکه به ازاء ۱۰۰ بار اجرا..... ۱۱۸

شکل ۱۹-۶: نمودار فراوانی خطای پیش‌بینی فرونشست (میلیمتر) برای کل داده‌ها در بهترین شبیه‌سازی..... ۱۱۹

شکل ۲۰-۶: نمودار فراوانی خطای پیش‌بینی فرونشست (میلیمتر) برای داده‌های آزمایشی در بهترین شبیه‌سازی..... ۱۱۹

شکل ۲۱-۶: نمودار فراوانی خطای RMSE برای کل داده‌های برآورد شده در مدل به ازاء ۱۰۰ بار اجرا..... ۱۲۰

شکل ۲۲-۶: نمودار فراوانی خطای RMSE برای داده‌های برآورد شده جهت آزمایش شبکه به ازاء ۱۰۰ بار اجرا..... ۱۲۰

شکل ۲۳-۶: نتایج عملکرد مدل تطبیقی برای بهترین مدل شبیه‌سازی شده..... ۱۲۲

شکل ۲۴-۶: توابع عضویت بدست آمده برای پارامتر فاصله افقی جبهه کار تا ایستگاه ترازیب در ۲۲ قاعده؛ بهترین مدل تطبیقی شبیه‌سازی شده..... ۱۲۲

شکل ۲۵-۶: توابع عضویت بدست آمده برای پارامتر فاصله فضایی جبهه کار تا ایستگاه ترازیب در ۲۲ قاعده؛ بهترین مدل تطبیقی شبیه‌سازی شده..... ۱۲۲

- شکل ۶-۲۶ : مقایسه بهترین نتایج برآورد شده مدل تطبیقی در مقایسه با واقعیت – داده‌های آموزش
۱۲۳.....
- شکل ۶-۲۷ : مقایسه بهترین نتایج برآورد شده مدل تطبیقی در مقایسه با واقعیت – داده‌های آزمایش
۱۲۳.....
- شکل ۶-۲۸ : نمودار فراوانی ضریب همبستگی داده‌های برآورد شده جهت آموزش مدل به ازاء ۱۰۰ بار
اجرا..... ۱۲۴.....
- شکل ۶-۲۹ : نمودار فراوانی ضریب همبستگی داده‌های برآورد شده جهت آزمایش شبکه به ازاء ۱۰۰ بار
اجرا..... ۱۲۴.....
- شکل ۶-۳۰ : نمودار فراوانی خطای پیش‌بینی فرونشست (میلی‌متر) برای داده‌های آموزش در بهترین
شبه‌سازی..... ۱۲۵.....
- شکل ۶-۳۱ : نمودار فراوانی خطای پیش‌بینی فرونشست (میلی‌متر) برای داده‌های آزمایش در بهترین
شبه‌سازی..... ۱۲۵.....
- شکل ۶-۳۲ : نمودار فراوانی خطای RMSE برای داده‌های برآورد شده جهت آموزش مدل به ازاء ۱۰۰ بار
اجرا..... ۱۲۶.....
- شکل ۶-۳۳ : نمودار فراوانی خطای RMSE برای داده‌های برآورد شده جهت آزمایش مدل به ازاء ۱۰۰ بار
اجرا..... ۱۲۶.....

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
فرونشست سطح زمین	S_v
فاصله نقطه عطف منحنی فرونشست تا محور تونل	i
حجم وادادگی زمین	V_s
حجم حفاری شده	V_t
نسبت وادادگی زمین	GLR
عمق تونل	z_0
کرنش شعاعی	ε
پارامتر بیضی شدگی	δ
پارامتر گپ فیزیکی	G_p
تغییر شکل الاستوپلاستیک جبهه کار	U_{3D}
اثر کار نیروی انسانی	ω
فشار جانبی خاک	K_0
توابع وزن مدل‌های هوش مصنوعی	w_i
پارامتر بایاس شبکه عصبی	b
تابع عملکرد نورون در شبکه عصبی	F
پارامتر آستانه نورون	θ
نرخ آموزش شبکه تطبیقی	η
خطای برآورد در مدل‌های هوش مصنوعی	E_p
قطر تونل	D
وزن مخصوص خشک توده زمین	γ_d
وزن مخصوص اشباع توده زمین	γ
پارامتر نفوذپذیری	k_x, k_y
زاویه اصطکاک داخلی توده زمین	φ
چسبندگی توده زمین	C
مدول تغییر شکل پذیری توده زمین	E
نسبت پواسون	ν
نسبت حفرات اولیه	e_{init}
درصد رطوبت	w
سرعت موج برشی	V_s
ضریب اندرکنش توده زمین و نگهدارنده	R_{inter}

عنوان	علامت اختصاری
فاصله قائم تاج مقطع فوقانی تا سطح زمین	z_H
فاصله قائم تاج مقطع تحتانی تا سطح زمین	z_B
فاصله افقی تاج مقطع فوقانی تا ایستگاه تراز یاب	d_H
فاصله افقی تاج مقطع تحتانی تا ایستگاه تراز یاب	d_B
فاصله فضایی تاج مقطع فوقانی تا ایستگاه تراز یاب	l_H
پیشروی مقطع فوقانی	Ad_H
پیشروی مقطع تحتانی	Ad_B
مدت زمان سپری شده	T
ضریب همبستگی	R
خطای میانگین مربعات	$RMSE$

۱-۱- کلیات بحث

تونل‌سازی یکی از پرکاربردترین و رو به رشدترین صنایع در زمینه فعالیت‌های ژئوتکنیکی است. این صنعت در قالب روش‌ها و فرآیندهای اجرایی متعددی طی سالیان متمادی ظهور کرده است. از آن جمله می‌توان به روش قدیمی کند و پوش^۱، روش نسبتاً مدرن جلو باز سنتی^۲، روش‌های حفاری اتریشی^۳ و بلژیکی^۴ و بسیاری روش‌های مدرن رایج دهه‌های اخیر نظیر حفاری با تجهیزات و ماشین‌های حفار تحت عنوان تونل‌سازی به روش سپری^۵ اشاره کرد. در سال‌های اخیر به دلیل گسترش شهرنشینی و اهمیت سیستم‌های حمل و نقل زیرزمینی در بحث‌های مدیریت، برنامه‌ریزی و کنترل زمان و ترافیک، همچنین نقش راه‌گشای خطوط انتقال زیرزمینی (اعم از انسانی و غیرانسانی) در توسعه کلان شهرها، اهمیت این صنعت در جوامع رو به رشد بشری دو چندان شده است.

یک تیم مهندسی تونل جهت اطمینان از دستیابی به یک سطح مناسب از ضریب اطمینان^۶ پایداری تونل و خاک یا سنگ اطراف آن، نقطه نظرات مختلفی را باید مدنظر قرار دهد. شاید بتوان گفت محور اصلی فرآیند طراحی یک تونل شامل برآورد دو پارامتر اصلی یکی فشار وارد بر پوشش محافظ داخلی تونل (اعم از موقت و دائمی) و دیگری جابجایی‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در محیط اطراف تونل، از دیواره تونل تا سطح زمین، به خصوص در مناطق شهری است. در این راستا، به دو دلیل عمده و مؤثر، یکی پایداری خود تونل حین و پس از اجرای تونل و دوم کنترل اثرات احداث تونل مورد نظر بر سازه‌های همجوار (راه، پل، غالب سازه‌های عمرانی روبنایی نظیر ساختمان‌ها، سازه‌های زیربنایی نظیر تونل‌ها و در نهایت سازه‌های طبیعی نظیر گسل‌ها) پارامتر نشست ناشی از تونل‌سازی به یک مؤلفه کلیدی و تعیین کننده تبدیل خواهد شد که بررسی، برآورد و ارزیابی نتایج مطالعات، قبل از احداث تونل، در حین انجام تونل‌سازی و بعضاً پس از اتمام عملیات، امری ضروری به نظر می‌رسد.

بطور کلی پس از حفاری و خاکبرداری مقطع تونل، توده خاک فوقانی مقطع تونل در جهت پر کردن حفره ایجاد شده تغییر شکل‌هایی خواهد داشت که اثرات آن‌ها در اغلب موارد به سطح زمین نیز خواهد رسید. تغییر شکل‌های ناشی از تونل‌سازی در دیواره تونل به نام همگرایی دیواره تونل^۷ و در سطح زمین به نام فرونشست سطح زمین^۸ شناخته می‌شوند. شکل و میزان این تغییر شکل‌ها به پارامترهایی نظیر عمق،

¹ Cut and cover

² Conventional open face

³ Austrian

⁴ Belgian

⁵ Shield tunneling

⁶ Safety factor

⁷ Tunnel wall convergence

⁸ Surface subsidence

قطر و در کل مشخصات هندسی تونل^۱، پارامترهای ژئوتکنیک خاک^۲، شرایط اولیه و در حین حفاری تنش‌ها و بارگذاری‌ها^۳، وضعیت آب‌های زیرزمینی در منطقه و در نهایت شرایط اجرای کار وابسته‌است. به علاوه روش اجرای تونل که خود به نوعی یک معیار طبقه‌بندی تونل محسوب شده و به شدت بر شکل و میزان فرونشست نهایی تونل تأثیرگذار است همچنین نحوه عملیات اجرایی و ماشین‌آلات حفار نیز در تغییر شکل‌های اطراف تونل تأثیرگذار هستند. در صورت اجرای پوشش محافظ داخلی (موقت یا دائم) نیز خواهد بود و مقدار این جابجایی‌ها با فشار وارد بر محافظ داخلی ارتباط دارد. تجربه و مطالعات موارد گوناگون اجرای تونل نشان داده‌است، جابجایی (فرونشست) سطح زمین ناشی از عملیات تونل‌سازی در اغلب موارد، علیرغم اجرای پوشش محافظ موقت و یا حتی دائمی نیز رخ خواهد داد و تنها بسته به ویژگی‌های محافظ اجرا شده، شکل هندسی، نحوه توزیع و مقادیر این جابجایی‌ها متفاوت خواهد بود. علاوه بر پارامترهای یاد شده، یکی از مهمترین پارامترهای مؤثر بر فرونشست ناشی از تونل‌سازی، عملکرد تونل به عنوان یک زهکش^۴ در مناطقی است که سطح آب زیرزمینی بالاتر از تراز تونل قرار دارد. در این حالت، فرونشست پس از آغاز فرآیند زهکش شدن آب از طریق تونل و به دو دلیل عمده، یا آغاز فرآیند نشست تحکیمی بلند مدت همگام با افت فشار منفذی در توده خاک اطراف تونل [۱ و ۲ و ۳] و یا احتمالاً نشست‌های آنی و کوتاه مدت توده خاک یا سنگ‌های نسبتاً ضعیف اطراف تونل همگام با افت فشار منفذی و افزایش تنش روباری، پدید می‌آید. علاوه بر نشست‌های تحکیمی و آنی ناشی از افت فشار و افزایش تنش مؤثر، در صورت وجود بافت ریزدانه در مسیر زهکشی، امکان خروج این ذرات به دلیل شدت جریان آب خروجی در خاک‌های نسبتاً سست فراهم شده و پدیده آب شستگی در بافت خاکی رخ خواهد داد. این آب شستگی‌ها به دلیل فرو ریزش‌های موضعی یا کلی مناطق شسته شده عمدتاً منجر به نشست‌های موضعی یا کلی بافت خاک شسته شده خواهند شد و اثرات این نشست‌ها بعضاً در سطح زمین به شکل فرونشست پدیدار می‌شوند [۴]. تا کنون، روابط تجربی، تحلیلی و عددی زیادی در زمینه شسته شدن خاک و سنگ با مایعات ارائه شده‌است [۵ و ۶]. در این راستا جهت شبیه‌سازی این پدیده در مدل مورد نظر باید از یکی روابط ارائه شده در این زمینه استفاده کرده و در ادامه با اتکا به داده‌های واقعی خروج ذرات ریزدانه و میزان آب شستگی در محل که غالباً در چاه‌های زهکش تونل مذکور و یا مجاری خروج آب قابل بررسی و کنترل خواهد بود، اقدام به کالیبراسون الگوی شبیه‌سازی مورد استفاده می‌نماییم. در نهایت جهت برآورد سهم این پدیده در فرونشست نهایی سطح زمین، باید اثرات این آب شستگی به صورت تغییرات پارامترهای ورودی درگیر مسئله نظیر تخلخل^۵ و مدول تغییر شکل پذیری^۶ خاک منطقه در مدل اصلی شبیه‌سازی شده تونل مورد نظر لحاظ شود. در پایان باید گفت، جهت یک

¹ Tunnel geometry

² Geotechnical soil properties

³ Initially and excavation associated stress state

⁴ Drainage

⁵ Porosity

⁶ Elasticity modulus

پیش‌بینی قابل قبول از میزان جابجایی‌ها، لازم است تمامی پارامترهای یاد شده با دقت نسبتاً بالایی برآورد شده و در مدل‌های شبیه‌سازی شده این پدیده و فرآیند تونل‌سازی لحاظ شوند.

در راستای مدل‌سازی پدیده فرونشست ناشی از تونل‌سازی، تاکنون روش‌های مختلفی از قبیل روش‌های تجربی^۱، روش‌های آماری^۲ (استفاده از سری‌های زمانی)، روش‌های تحلیلی^۳، روش‌های عددی مبتنی بر مدل‌های ژئوتکنیک (نظیر اجزاء محدود^۴) و پاره‌ای از روش‌های عددی مبتنی بر الگوریتم‌های هوش مصنوعی^۵ جهت برآورد میزان نشست‌های ایجاد شده مورد استفاده قرار گرفته‌اند و پیشرفت‌های چشمگیری نیز در همین زمینه حاصل شده‌است. روش‌های تجربی که شاید بتوان گفت Peck در سال ۱۹۶۹ [۷] از نخستین پیشگامان آن بود، عمدتاً بر پایه مدل‌سازی پروفیل عرضی جام فرونشست^۶ با یک توزیع گاوسی^۷ (توزیع نرمال) استوارند. روش‌های آماری نیز با استناد به داده‌های واقعی فرونشست بدست آمده از پایش‌های در محل^۸ و به کمک توابع ریاضی به عنوان نمونه سری‌های زمانی^۹ اقدام به مدل‌سازی این پدیده می‌نمایند. روش‌های تحلیلی نیز عمدتاً با تکیه بر نظریه الاستیسیته^{۱۰} و با یک روش حل دقیق^{۱۱} و تحلیلی به مدل‌سازی این پدیده می‌پردازند. به عنوان نمونه‌های مدل‌سازی تحلیلی این پدیده می‌توان به کارهای Sagaseta [۸] و Verruijt و Booker [۹] در سال‌های ۱۹۸۷ و ۱۹۹۶ میلادی اشاره کرد. مدل تحلیلی Sagaseta یک مدل الاستیک خطی با فرض تراکم ناپذیری^{۱۲} همگن^{۱۳} و همسانگرد^{۱۴} خاک در مورد میدان کرنش ناشی از فرونشست سطح زمین، بود. وی ارائه دهنده اصلی مفهوم تصاویر مجازی^{۱۵} در محاسبات فرونشست ناشی حفاری تونل بود. پس از او دانشمندان بسیاری این نظریه را اصلاح کرده و توسعه دادند. چنانکه Verruijt و Booker نیز پس از Sagaseta روش او را به عنوان یک آیتم در معادلات فرونشست تحت عنوان پارامتر "وادادگی زمین"^{۱۶} نه فقط برای حالت تراکم ناپذیری بلکه برای مقادیر مختلف ضریب پوآسون توسعه داده و اثر بیضوی^{۱۷} (بیضی شدگی) را نیز در روش پیشنهادی خود لحاظ کردند. لازم به ذکر است پژوهشگران بطور عمده مدل‌های تحلیلی را در قالب دو رفتار، الاستیک کامل [۱۰] و الاستوپلاستیک [۱۱] ارائه کرده‌اند. در سال‌های اخیر روش‌های عددی

¹ Empirical

² Statistical

³ Analytical

⁴ Finite element

⁵ Artificial intelligence algorithm

⁶ Subsidence trough

⁷ Gaussian distribution

⁸ In Situ monitored data

⁹ Time series

¹⁰ Elasticity theory

¹¹ Closed form solution

¹² Incompressibility

¹³ Homogenous

¹⁴ Isotropic

¹⁵ Virtual image

¹⁶ Ground loss

¹⁷ Ovalization

پیشرفت‌های خوبی در مدل‌سازی انواع فرونشست‌ها داشته‌اند. در همین راستا نرم‌افزارهای عددی زیادی با قابلیت‌های فراوان، جهت شبیه‌سازی هرچه بهتر و واقعی‌تر این پدیده ارائه شدند. لحاظ کردن مدل رفتاری^۱ مورد نظر یکی از مهمترین شاخصه‌های روش‌های عددی است که جهت واقعی‌تر شدن رفتار مدل در هر بخش از مسئله می‌باشد. به علاوه در جدیدترین مطالعات، پژوهشگران با استفاده از اطلاعات و نتایج یک مدل‌سازی عددی و نتایج واقعی مشاهداتی، اقدام به کالیبراسیون بسیاری از مدل‌های تجربی و تحلیلی نموده‌اند. به عنوان نمونه می‌توان به کالیبراسیون و تصحیح یک مدل تجربی پیش‌بینی فرونشست با استفاده از مدل‌های عددی، به کمک روابطی بر مبنای سه آیتام کلیدی فاصله فیزیکی^۲ دیواره تونل تا پوشش محافظ دائمی تونل (لاینینگ)، تغییر شکل‌های الاستوپلاستیک منطقه اطراف تونل (دیواره تونل تا سطح زمین) و در نهایت اثرات کار نیروی انسانی و ماشین آلات حفار در جبهه کار، که در اغلب روش‌های تجربی مورد استفاده بودند [۱۲ و ۱۳ و ۱۴]، اشاره کرد. این روابط به مراتب دقت بیشتری در برآورد مقادیر واقعی فرونشست‌ها داشتند و سه مؤلفه یاد شده نیز مقدار فرونشست نهایی را به صورت عددی محاسبه می‌کردند و امکان کالیبراسیون این مؤلفه‌ها با شاخص‌های برداشت میدانی^۳ و مدل‌سازی تحلیلی و دقیق مسئله براحتی میسر خواهد بود.

در کنار کلیه روش‌های مدل‌سازی پدیده فرونشست که تاکنون بدان‌ها اشاره شد، یکی از روش‌های کاربردی و قابل توجه در این زمینه که در سال‌های اخیر به صورت گسترده‌ای مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته‌است، استفاده از یک الگوریتم عددی مبتنی بر هوش مصنوعی است. در این روش نخست پارامترهای ورودی مؤثر بر مسئله به صورت دقیق محاسبه و طبقه‌بندی شده و در ادامه مدل مورد نظر، با تعداد قابل قبولی اطلاعات خروجی، که به صورت واقعی پایش شده‌است، در مقابل پارامترهای ورودی مؤثری متناظر که قبلاً تنظیم شده‌است، آموزش^۴ داده می‌شود. در نهایت مدل شبیه‌سازی شده اقدام به پیش‌بینی دسته‌ای از داده‌های خروجی خواهد کرد. تاکنون در اغلب شبیه‌سازی‌های انجام شده با این الگوها، دقت خروجی‌های پیش‌بینی شده به میزان قابل توجهی بالا بوده‌است. به همین دلیل استفاده از این روش در مدل‌سازی پدیده فرونشست ناشی از تونل‌سازی در سال‌های اخیر بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌است. نکته حائز اهمیت در این زمینه تشخیص پارامترهای مؤثر بر مسئله و ارائه یک مجموعه جامع و مناسب از اطلاعات دقیق مربوط به این پارامترها جهت آموزش مدل جهت شبیه‌سازی صحیح مسئله است.

امروزه روش‌های تجربی، آماری و تحلیلی ساده، که به عنوان روش‌های مقدماتی شناخته می‌شوند، کماکان جهت برآورد اولیه فرونشست‌های ناشی از تونل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان همگام با پیشرفت‌های چشمگیر روش‌های عددی و با توجه به توسعه انواع کامپیوترها و توانایی‌هایشان، این روش‌ها به صورت گسترده‌ای وارد محیط طراحی و مدل‌سازی تونل شده‌اند و به دنبال آن شبیه‌سازی

¹ Constitutive model

² Gap parameter

³ Field monitoring

⁴ Train

فرآیند تونل‌سازی به صورت قابل ملاحظه‌ای واقع‌بینانه شده‌است. لذا می‌توان گفت در حال حاضر مدل‌سازی عددی این پدیده، محوریت اصلی فرآیند شبیه‌سازی فرآیند تونل‌سازی را تشکیل می‌دهد و روش‌های تجربی، آماری، تحلیلی و در نهایت الگوریتم‌های عددی مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند به نوعی الگوهای خوبی جهت برآوردهای اولیه، شاخص تصمیم‌گیری کلان و ارزیابی انتخاب‌ها (اعم از روش اجرا، شرایط کار و غیره) به صورت نسبتاً قابل قبولی مورد استفاده قرار گیرند. از میان روش‌های مقدماتی یاد شده شاید بتوان گفت الگوهای عددی مبتنی بر هوش مصنوعی ارتباط خوبی با کاربران و محققین این عرصه برقرار کرده است. یکی از مهمترین کاربردهای این الگوها، حساسیت‌سنجی^۱ پارامترهای ورودی مسئله و ارائه یک گزارش مناسب از عملکرد هر یک از پارامترهای ورودی و اثر آن‌ها بر خروجی مسئله است. این مهم کارائی این الگوها را در عرصه شبیه‌سازی فرآیند تونل‌سازی دو چندان کرده است.

۱-۲- ضرورت تحقیق

یکی از برجسته‌ترین نقش‌های تونل در جوامع امروزی نقش کلیدی آن به عنوان خطوط انتقال زیرزمینی است. این خطوط چه در قالب خطوط انتقال انسانی نظیر تونل‌های متروی درون شهری و برون شهری و شبکه‌های بزرگراه زیرزمینی که بطور مستقیم با مباحث کلان مدیریت و برنامه‌ریزی زمان و ترافیک در ارتباط است و چه در قالب خطوط انتقال غیر انسانی نظیر شبکه آب و فاضلاب درون شهری و برون شهری و معابر زیرزمینی تأسیسات زیربنایی، نقشی استراتژیک در زندگی روزمره ما ایفا می‌کنند. علاوه بر موارد یاد شده اثرات مثبت زیست محیطی گسترش شبکه حمل و نقل زیرزمینی به دلیل کاهش منابع آلوده کننده محیط زیست چشمگیر خواهد بود. نمونه‌های بارز گسترش خطوط انتقال زیرزمینی و معابر زیرزمینی تأسیسات زیربنایی را در کلان شهرهایی نظیر لندن، واشنگتن دی سی، نیویورک، پاریس و توکیو می‌توان مشاهده کرد. در کشور ما نیز با توجه به گسترش روزافزون مناطق و جمعیت شهرنشین و به دنبال آن نیاز به یک سیستم یکپارچه و هماهنگ مدیریت و برنامه‌ریزی شهری، گسترش و به‌روزرسانی این صنعت در دو حوزه حمل و نقل و تأسیسات به شدت ضروری به نظر می‌رسد. چنانکه در سال‌های اخیر نیز مشاهده شده‌است که توقف یا تعطیلی چند دقیقه‌ای بخش‌هایی از مترو تهران چه عواقب ترافیکی-زمانی غیر منتظره‌ای را به دنبال داشته‌است.

شاید بتوان گفت یکی از مهمترین ابعاد فرآیند تونل‌سازی، صرف نظر از محیطی که تونل در آن حفر می‌شود (انواع دسته‌بندی تونل‌های خاکی و سنگی) پس از مسئله پایداری جداره تونل و طراحی سیستم حائل^۲ محافظ موقت و دائمی آن، بررسی و کنترل تغییرشکل‌های ایجاد شده در محیط اطراف تونل، بین دیواره تونل تا سطح زمین می‌باشد. در اولین نگاه این تغییر شکل‌ها غالباً بایستی جهت حفظ پایداری تونل مورد نظر کنترل شده و اثر آن‌ها در طراحی‌های مربوط به همان تونل لحاظ شود. اما در یک نگاه جامع‌تر، به دلیل همجواری بسیاری از تونل‌های درون شهری و به ندرت برون شهری، با بسیاری از

^۱ Sensitivity survey

^۲ Tunnel support

سازه‌های عمرانی نظیر راه‌ها، پل‌ها، ساختمان‌ها، تونل‌ها و بسیاری از تأسیسات زیربنایی و روبنایی، همچنین بسیاری از عوارض طبیعی و زیست محیطی نظیر گسل‌ها^۱، بررسی ماهیت، میزان و اثرات این تغییر شکل‌ها بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد. به عبارت دیگر تهیه و تنظیم یک سیستم نظامند جهت مدل‌سازی این پدیده با هدف برآورد دقیق میزان جابجایی‌های ناشی از تونل‌سازی در تمامی مراحل یک پروژه تونل‌سازی، (از اولین گام‌های طراحی آن تا بهره‌برداری از تونل) حوزه انتخاب و تصمیم‌گیری طراحان، مهندسين اجرا و کاربران را بشدت گسترده کرده و در نهایت به توسعه مبانی مدیریت و برنامه‌ریزی شهری کمک شایانی خواهد کرد.

۱-۳- هدف تحقیق

پژوهش حاضر با هدف اصلی مدل‌سازی پدیده فرونشست ناشی از تونل‌سازی تونل‌های در حال ساخت به کمک داده‌های مشاهداتی سنجش از دور^۲ و پایش در محل به روش ترازیابی دقیق به عنوان ابزار آموزش و کالیبراسیون^۳ در مدل‌های مورد استفاده، جهت شبیه‌سازی هر چه بهتر این پدیده انجام شده و نتایج آن در رساله حاضر ارائه شده‌است. در راستای مدل‌سازی پدیده فرونشست ناشی از تونل‌سازی، هدف اصلی استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، ارائه یک راهکار کم‌هزینه و در عین حال صرفه جویی بسیار قابل توجه در زمان و سایر تجهیزات و تشکیلات مصرفی است. به علاوه اطلاعات فرونشست ثبت شده در تصاویر راداری عمده‌تاً نتایج را به صورت گستره ارائه کرده و تجزیه و تحلیل قرائت‌ها صرفاً مربوط و محدود به یک خط خاص، نظیر اطلاعات بدست آمده از روش ترازیابی دقیق، نخواهد بود. با این رویکرد، شاید بتوان گفت جزئیات ساختاری اهداف پژوهش حاضر در چند مورد زیر خلاصه می‌شود؛ بررسی توانمندی مدل‌های عددی و مبتنی بر هوش مصنوعی در مدل‌سازی پدیده فرونشست ناشی از تونل‌سازی، ارائه یک رویکرد در مورد شناسایی پارامترهای اثر گذار بر این پدیده با توجه به حوزه عملکرد هریک (طبقه‌بندی ردیف عملکردی هر یک از پارامترهای اثر گذار) و بررسی حوزه اثرگذاری هریک از این پارامترها، بررسی سهم هریک از پارامترهای اثر گذار در میزان و شکل فرونشست، بررسی توانمندی هریک از روش‌های پایش اطلاعات فرونشست در راستای کمک به مدل‌سازی این پدیده و در نهایت ارائه راهکار مناسب جهت مدل‌سازی و رفتار سنجی این پدیده در صورت محدودیت دسترسی به تمامی فاکتورهای اثر گذار. در نهایت و در یک جمع‌بندی کلی باید گفت، رویکرد اصلی پژوهش حاضر ارائه یک روش ساده و نسبتاً جامع در مدل‌سازی پدیده فرونشست جهت بررسی، برآورد و ارزیابی رفتار این نوع تغییر شکل‌ها و مقایسه نتایج برآوردها با مشاهدات واقعی به روش ترازیابی دقیق و تکنیک تداخل سنجی راداری است.

۱-۴- سؤالات تحقیق

در راستای هدف اصلی پژوهش حاضر و مجموعه اهدافی که در ادامه هدف کلان دنبال خواهیم کرد، قصد داریم به سؤالات زیر پاسخ دهیم:

¹ Fault

² Remotely sensed data

³ Calibration

۱- آیا روش‌های عددی مبتنی بر الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند ابزار مناسبی جهت مدل‌سازی این پدیده تلقی شوند؟ این روش‌ها تا چه حد نیاز یک کاربر را به شبیه‌سازی این پدیده برآورده خواهند کرد؟

۲- در زمینه رفتارسنجی فرونشست‌های ناشی از تونل‌سازی و تعیین پارامترها و مؤلفه‌های تأثیرگذار بر این پدیده و حوزه عملکرد هریک روش‌های هوش مصنوعی تا چه حد موفق بوده و هستند؟ معضلات پیش‌روی این روش‌ها در این راستا چیست؟

۳- دقت و صحت روش‌های عددی مبتنی بر الگوریتم‌های هوش مصنوعی تا چه حد به دقت اطلاعات اولیه مسئله وابسته است. آیا این روش می‌تواند ضعف‌های ناشی از نقصان اطلاعات پایگاه داده‌ها و سایر نقص‌های سیستم را پوشش دهد؟

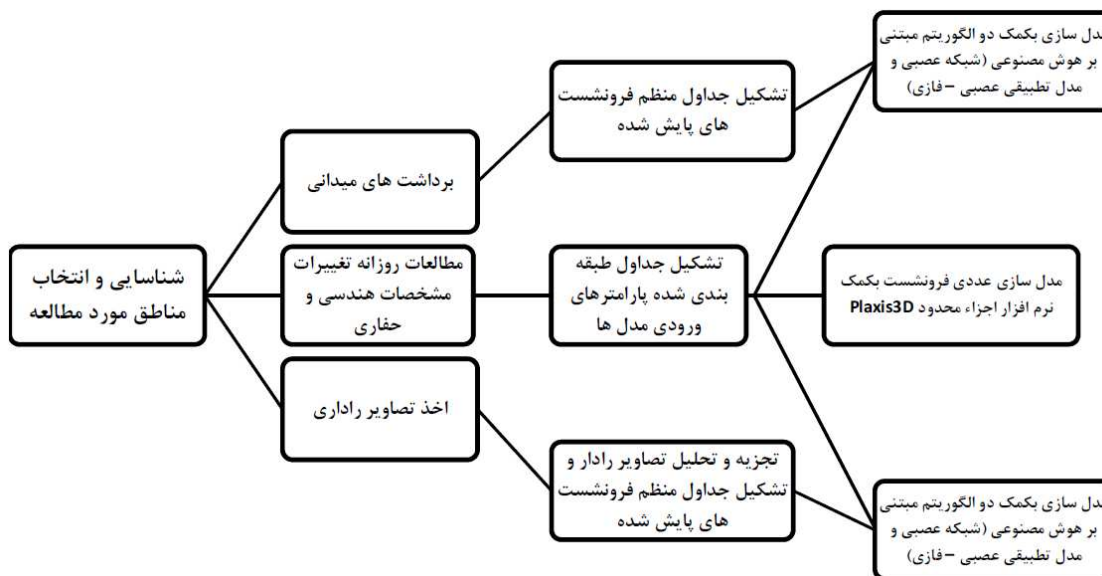
۴- نتایج بدست آمده از مدل‌سازی به کمک روش‌های عددی مبتنی بر الگوریتم‌های هوش مصنوعی تا چه حد قابل تعمیم به موارد دیگر خواهد بود؟ کارایی مدل‌های بدست آمده تحت تأثیر چه فاکتورهاییست و چه محدودیت‌ها، الزامات و نیازمندی‌های خواهد داشت؟ (قابلیت تعمیم نتایج)

۵- آیا فناوری تداخل سنجی راداری می‌تواند نقشی مؤثری در مدل‌سازی بهتر، موفق‌تر و کالیبراسیون مدل‌های شبیه‌سازی شده این مسئله ایفا کنند؟ نقش راهبردی این تکنولوژی در شبیه‌سازی این پدیده چگونه خواهد بود؟

۱-۵- روش تحقیق

در راستای دستیابی به هدف اصلی پژوهش حاضر یعنی مدل‌سازی پدیده فرونشست ناشی از تونل‌سازی در مورد تونل‌های در حال ساخت، همچنین دستیابی به تمام اهداف جزئی مورد نظر، پژوهش حاضر در قالب یک پروژه تحلیلی-میدانی تعریف شد. عبارت دیگر، مدل‌سازی تونل‌های در حال ساخت با دو روش، نخست اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی Plaxis3D و دوم دو الگوریتم عددی هوش مصنوعی (شبکه عصبی و مدل تطبیقی عصبی-فازی) انجام خواهد شد. در نهایت نتایج برآوردهای انجام شده توسط مدل‌های یاد شده با داده‌های واقعی فرونشست که با استفاده از دو روش، نخست تکنیک تداخل‌سنجی راداری و دوم ترازیابی دقیق در محل پایش شده‌است، مقایسه خواهد شد. در این راستا، ابتدا مناطق سه‌گانه‌ای جهت آغاز مطالعات موردی هدف تعیین شد. مناطق مورد مطالعه، بخشی از پروژه‌های در حال اجرای خط سوم شبکه حمل و نقل زیرزمینی تهران بزرگ - مترو (قبل از اجرای سازه محافظ نهایی- لاینینگ) در سه حوزه بزرگراه ارتش (شمال خط ۳)، خیابان آیت ا... قدوسی (بخش‌های میانی خط ۳) و بزرگراه شهید چراغی محدوده پادگان قلعه مرغی تا شهرک شهید بخارایی (جنوب خط ۳) تعریف شدند. عملیات میدانی به روش ترازیابی دقیق فقط در منطقه مورد مطالعه سوم انجام شد و تصاویر راداری مورد نیاز پروژه پس از مشخص شدن حوزه مطالعاتی در مختصات UTM و تهیه پروپوزال تحقیقاتی در راستای پژوهش حاضر جهت اخذ تصویر از طریق سازمان هوا- فضای کشور آلمان، در بازه زمانی مورد نظر توسط ماهواره TerraSAR-X اخذ شد. در پایان، فرآیند مدل‌سازی پدیده فرونشست با استفاده از روش‌های یاد شده انجام شد. در این بین، داده‌های مشاهداتی نقش اصلی در شکل‌گیری مدل

هوش مصنوعی ایفا کرده و به نوعی رکن اساسی مدل سازی به این روش خواهند بود. همچنین این داده ها در مدل عددی شبیه سازی شده در صحت سنجی نتایج مدل سازی عددی به ایفای نقش می پردازند.



شکل ۱-۱: دیاگرام کلیات روش تحقیق در پژوهش حاضر

۱-۶- ساختار تحقیق

رساله حاضر جهت دستیابی به مضامین اهدافی که در ابتدا مشخص شد، همچنین پاسخگویی به کلیه سؤالاتی که در راستای نیل به اهداف یاد شده تنظیم شده است، به روشی که در بخش قبل به تشریح آن پرداخته شد، پس از بخش مقدمه، در چارچوب و فصول زیر تدوین شده است؛

- **فصل دوم - مبانی مدل سازی پدیده فرونشست ناشی از تونل سازی؛** در این فصل پس از معرفی مقدماتی تونل سازی به روش سنتی گام به گام به طبقه بندی مهمترین عوامل مؤثر بر فرونشست های سطح زمین ناشی از تونل سازی و پس از آن دو رویکرد کلان جهت بررسی و ارزیابی فرونشست های ناشی از تونل سازی اشاره شده است. رویکرد کلان طبقه بندی فرونشست، نخست شامل محیطی که حفاری تونل در آن انجام می شود و دوم روش حفاری تونل می باشد. سایر بخش های این فصل به تشریح انواع روش های مدل سازی این پدیده، نقاط ضعف و قوت و در نهایت میزان کارایی و کاربرد هر یک از آن ها اختصاص یافته است.
- **فصل سوم - روش های پایش اطلاعات فرونشست ناشی از تونل سازی؛** در این فصل به معرفی، تشریح روند کار و بررسی نقاط ضعف و قوت سه روش عمده پایش اطلاعات فرونشست ناشی از تونل سازی ها می پردازیم؛ ترازیبی دقیق، سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) و تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR).
- **فصل چهارم - مطالعات میدانی و تحلیل تصاویر رادار؛** در این فصل مطالعات میدانی انجام شده در پژوهش حاضر شامل عملیات ترازیبی دقیق و نمونه برداری از آب های در حال