

مستطاب



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

موضوع رساله دکتری تخصصی مکانیک سنگ

پیش‌بینی نشست ناشی از حفاری ماشینی نوع EPB با استفاده
از روش متامدل

نگارنده: لیلا نیک اختر

اساتید راهنما
دکتر شکراله زارع
دکتر حسین میرزائی نصیرآباد

استاد مشاور
دکتر بهنام فردوسی

مهر ۱۴۰۰

فرم ۱۱ صورتجلسه دفاع

تقدیم بہ

ہمسرم بہ مہربانی دریا
ودخترم بہ لطافت شبنم (تاسو)

مشکر و قدردانی

خداوند بزرگ را شکر می‌کنم که در این مرحله از زندگی و تحصیل، موفق به انجام این رساله شدم. بر خود لازم می‌دانم از زحمات استاتید راهنمای کرامت‌مندی، جناب آقای دکتر شکراله زارع و دکتر حسین میرزائی نصیرآباد که بارها بنی‌های ارزنده‌شان مراد این راه‌یاری دادند، شکر کنم. همچنین از جناب آقایان: دکتر بهنام فردوسی، دکتر علی آری‌ن‌فر، دکتر محمد رضا گل‌پسند، دکتر حمید زارعی و تمامی همکاران و عزیزانی که در زمان کردآوری داده‌ها و انجام شییه‌سازی‌ها، کمک‌شایانی به این‌جانب نمودند، کمال شکر را دارم. نام و یاد این عزیزان همانند برک‌زیرینی در این‌کند دوار خواهد ماند.

تعهد نامه

اینجانب لیلا نیک اختر دانشجوی دوره دکتری رشته مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله پیش‌بینی نشست ناشی از حفاری ماشینی نوع EPB با استفاده از روش متامدل تحت راهنمایی دکتر شکراله زارع و دکتر حسین میرزائی نصیرآباد متعهد می‌شوم:

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



تاریخ
امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

شبیه‌سازی عددی تونلسازی با داده‌هایی با عدم قطعیت‌های چندگانه به طور کلی زمان‌بر است که مستلزم تلاش محاسباتی فراوان با تعداد زیادی از مفاهیم و عامل‌ها می‌باشد. به منظور پیش‌بینی‌های منطقی در زمان کوتاه و هدایت همراه با نگهداری در تونلسازی ماشینی، مدل‌های جایگزین برای توصیف وابستگی پاسخ با عامل‌های با عدم قطعیت ژئوتکنیکی و عملیاتی تونلسازی بسیار مناسب هستند. در این تحقیق بعد از انجام مدلسازی اجزا و عامل‌های درگیر در فرآیند تونلسازی با استفاده از روش تفاضل محدود و با نرم افزار $FLAC^{3D}$ و تایید اعتبار مدل با داده‌های ابزاربندی، تحلیل حساسیت بر روی عامل‌های ژئوتکنیکی و عملیاتی ساخت تونل با ماشین حفاری از نوع تعادلی فشار زمین در خاک انجام شده است. کل فرآیند انجام تحقیق بر روی دو مطالعه موردی خط ۷ مترو تهران و خط ۲ مترو تبریز صورت گرفته است. برای انجام تحلیل حساسیت کلی نمونه‌های تصادفی با استفاده از روش فرامکعب لاتین تولید و سپس با استفاده از روش تاثیر مقدماتی Morris، تحلیل حساسیت بر روی عامل ورودی انجام و عامل‌های موثر انتخاب شدند. پس از طراحی و ساخت متامدل شبکه عصبی برای هر دو مورد، پیش‌بینی نشست سطحی با استفاده از متامدل و داده ابزاربندی و شبیه‌سازی عددی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که، مدل متا تلاش‌های محاسباتی مربوط به فرآیند شبیه‌سازی عددی را کاهش می‌دهد و امکان پیش‌بینی نشست ناشی از حفر تونل را در یک بخش از پیش انتخاب شده با قابلیت اطمینان معقول (بیش از ۹۸٪) دارد. در ادامه از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای مطالعه موردی اول و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک (GA) برای مطالعه موردی دوم با شبکه عصبی برای انجام واکاوی برگشتی و شناسایی عامل‌های ژئوتکنیکی و عملیاتی استفاده شد. برخلاف روش استاندارد برای واکاوی برگشتی، که در آن برای هر حالت جدید از عامل‌ها باید مدلسازی انجام شود و این فرآیند چندین ساعت طول خواهد کشید، فرایند شناسایی و تحلیل برگشتی با متا مدل در زمان بسیار کوتاه (در حد چند دقیقه) انجام شد. سرانجام، از این فرآیند، برای پیش‌بینی عامل‌های عملیاتی (فشار تزریق و فشار سینه کار) برای دستیابی به میزان نشست سطحی بهینه استفاده شد. در نهایت عملکرد دو الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی عامل‌های ژئوتکنیکی بررسی و مقایسه شد. بررسی دوالگوریتم نشان داد که هر دو الگوریتم با میزان خطای حدود ۶ درصد قابلیت استفاده در واکاوی برگشتی با استفاده از متا مدل را دارند.

کلمات کلیدی: تونلسازی ماشینی، متامدل، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، خط ۷ مترو تهران، الگوریتم

بهینه‌سازی ژنتیک، خط ۲ مترو تبریز

مقالات مستخرج از رساله

مقالات مجله ای

- Numerical modelling of backfill grouting approaches in EPB tunneling, Journal of Mining and Environment
- Application of ANN-PSO algorithm based on FDM numerical modelling for Back Analysis of EPB TBM Tunneling Parameters, European Journal of Environmental and Civil Engineering
- واکاوی حساسیت جامع در پیش بینی نشست سطحی ناشی از فرآیند تونلسازی ماشینی، مجله عمران امیرکبیر

مقاله کنفرانسی

- شناسایی مهم ترین پارامترهای موثر در میزان نشست سطحی ناشی از ساخت تونل مترو (بازار امیرکبیر- خط ۲ مترو تبریز)، کنفرانس ملی معماری، عمران، شهرسازی و افق‌های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب

فهرست مطالب

فصل اول: معرفی تحقیق

۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- تعریف مساله و ضرورت انجام تحقیق	۶
۳-۱- اهداف و نوآوری	۹
۴-۱- روش انجام تحقیق	۱۱
۵-۱- ساختار تحقیق	۱۱

فصل دوم: مفاهیم کلی

۱-۲- متامدل برای تونلسازی ماشینی	۱۴
۲-۲- شبیه سازی عددی	۱۵
۱-۲-۲- معرفی نرم افزار	۱۷
۲-۲-۲- انتخاب ابعاد مدل، شرایط مرزی و شرایط اولیه	۱۹
۳-۲-۲- مدلسازی سپر	۲۲
۴-۲-۲- مدلسازی سیستم نگهدارنده بتنی	۲۲
۵-۲-۲- مدلسازی فشار سینه کار و فشار تزریق	۲۳
۳-۲- شبکه عصبی مصنوعی	۲۷
۱-۳-۲- اصول شبکه عصبی	۲۷
۲-۳-۲- سلول عصبی مصنوعی	۲۸
۳-۳-۲- شبکه عصبی مصنوعی	۲۹
۴-۲- واکاوی حساسیت	۳۴
۱-۴-۲- واکاوی حساسیت تاثیر مقدماتی Morris	۳۶
۲-۴-۲- نمونه برداری تصادفی	۳۸
۵-۲- واکاوی برگشتی	۴۰
۱-۵-۲- شناسایی عامل ها	۴۲
۶-۲- جمع بندی	۴۹

فصل سوم: مروری به مطالعات گذشته

۳-۱- مقدمه.....	۵۲
۳-۲- مطالعات موردی در زمینه شبیه‌سازی عددی در تونلسازی.....	۵۲
۳-۳- نمونه‌هایی از کاربرد شبکه‌های عصبی در تونلسازی با TBM.....	۶۰
۳-۴- مطالعات موردی متامدل‌ها در تونلسازی.....	۶۸
۳-۵- جمع بندی.....	۷۵

فصل چهارم: پیش‌بینی نشست سطحی به روش متا مدل (مطالعات موردی خط ۷ مترو تهران و خط ۲ مترو تبریز)

۴-۱- مطالعه موردی ۱: خط ۷ مترو تهران.....	۷۸
۴-۱-۱- معرفی خصوصیات پروژه.....	۷۹
۴-۱-۲- مدلسازی عددی.....	۸۰
۴-۱-۳- ارزیابی نتایج مدلسازی عددی با استفاده از نقطه کنترلی.....	۸۳
۴-۱-۴- واکاوی حساسیت و تعیین عامل‌های موثر.....	۸۵
۴-۱-۵- تولید داده برای متا مدل و ساخت شبکه عصبی مصنوعی.....	۸۹
۴-۱-۶- واکاوی برگشتی با ANN-PSO.....	۹۲
۴-۲- مطالعه موردی دوم: خط ۲ مترو تبریز.....	۹۵
۴-۲-۱- معرفی خصوصیات پروژه.....	۹۶
۴-۲-۲- ابزاربندی برای نشست سطحی.....	۹۸
۴-۲-۳- مدلسازی عددی.....	۱۰۳
۴-۲-۴- واکاوی حساسیت.....	۱۰۷
۴-۲-۵- متامدل برای داده خط ۲ مترو تبریز.....	۱۰۹
۴-۲-۶- واکاوی برگشتی.....	۱۱۳
۴-۲-۷- استفاده از واکاوی برگشتی در هدایت دستگاه حفاری.....	۱۱۶
۴-۲-۸- مقایسه نتایج برای دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات.....	۱۲۰
۴-۳- جمع بندی.....	۱۲۲

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه.....	۱۲۴
-----------------	-----

۱۲۴.....	۵-۲- نتایج موردی
۱۲۷.....	۵-۳- نتایج کلی
۱۲۷.....	۵-۴- پیشنهادها
۱۲۹.....	مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- توصیفی از متامدل براساس پوشش و شبیه‌سازی عددی راهبردی..... ۹
- شکل ۱-۲- متا مدل برای پیش بینی سریع نشست در تونلسازی ماشینی ۱۵
- شکل ۲-۲- طرحی از TBM ۲۶
- شکل ۳-۲- تصویر یک نورون عصبی ۲۷
- شکل ۴-۲- اجزای نورون مصنوعی ۲۸
- شکل ۵-۲- شمای کلی یک شبکه عصبی مصنوعی ۳۰
- شکل ۶-۲- مقایسه تصویری روش نمونه برداری مونت کارلو و روش فرا مکعب لاتین..... ۴۰
- شکل ۸-۲- رابطه‌ی بین روش تحلیل عادی و تحلیل برگشتی..... ۴۰
- شکل ۹-۲- الگوریتم ازدحام ذرات ۴۵
- شکل ۱۰-۲- الگوریتم ژنتیک ۴۹
- شکل ۱-۳- اجزای مدل شبیه‌سازی تونلسازی سپری : الف) توصیف ماشین، ب) مدل عددی..... ۵۴
- شکل ۲-۳- توالی حفاری در مدل عددی المان محدود ۵۵
- شکل ۲-۳- مدل سه بعدی تونل با استفاده از نرم افزار Ansys ۵۷
- شکل ۳-۳ - الف) ساختار کلی مدل، ب) دید نزدیک از قسمت مرکزی مدل، ج) سپر TBM، د) قسمت بیش حفاری، ه) پوشش تونل و ی) تزریق ۵۸
- شکل ۴-۳- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با شبکه عصبی مصنوعی ۶۳
- شکل ۵-۳- نصب سازه جعبه‌ای در زیر مسیر راه آهن ۶۴
- شکل ۶-۳- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از سه مدل شبکه عصبی ۶۵
- شکل ۷-۳- معماری شبکه عصبی ۶۶
- شکل ۸-۳- مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مرحله آموزش و تربیت شبکه ۶۷
- شکل ۹-۳- معماری شبکه حافظه کوتاه مدت طولی ۶۷
- شکل ۱۰-۳- شبیه‌سازی عددی از مقطع تونل و بررسی سطحی پروژه ۷۲
- شکل ۱-۴- مراحل انجام تحقیق ۷۹
- شکل ۲-۴- نقشه خط ۷ مترو تهران ۸۰

- شکل ۳-۴- ابعاد مدل سه بعدی، موقعیت تونل و ضخامت لایه های موجود..... ۸۲
- شکل ۴-۴- جابه جایی قائم برای نقطه کنترلی و جایگاه نقطه کنترلی در مدل ۸۴
- شکل ۵-۴- نمودار جابه جایی قائم نسبت به مراحل حفاری در نقطه کنترلی و داده ابزاربندی..... ۸۴
- شکل ۶-۴- الف) ساختار پین های نشست سنجی ب) مراحل نصب پین ج) قرائت میزان جابه جایی قائم.. ۸۵.
- شکل ۷-۴- مقادیر میانگین و انحراف معیار برای ۶ عامل انتخابی بعد از ۱۲ مرحله حفاری در نقطه کنترلی ۸۷
- شکل ۸-۴- مقادیر میانگین و انحراف معیار برای ۶ عامل انتخابی بعد از ۱۸ مرحله حفاری در نقطه کنترلی ۸۸
- شکل ۹-۴- نمودار کلی میانگین مطلق ۶ عامل نسبت به مراحل حفاری ۸۹
- شکل ۱۰-۴- ساختار شبکه عصبی پس انتشار به کار رفته برای متا مدل خط ۷ مترو تهران..... ۹۰
- شکل ۱۱-۴- مقایسه نتایج نشست سطحی به دست آمده از مدلسازی عددی و شبکه عصبی مصنوعی ۹۱
- شکل ۱۲-۴- نتایج شبیه سازی با متامدل، مدلسازی $FLAC^{3D}$ و داده ابزاربندی در مقطع انتخاب شده ۹۲
- شکل ۱۳-۴- مقایسه پاسخ های مدل (مدل تفاضل محدود منفرد، پیش بینی ANN، الگوریتم ANN-PSO)..... ۹۴
- شکل ۱۴-۴- مقایسه نتایج (پیش بینی ANN، بهینه سازی عامل های خاک با PSO، بهینه سازی عامل عملیاتی با PSO و عملکرد PSO در شناسایی عامل ها) ۹۵
- شکل ۱۵-۴- نمایی از مراحل انجام تحقیق شامل فرآیند واکاوی برگشتی و شناسایی عامل ها ۹۶
- شکل ۱۶-۴- موقعیت نبریز در نقشه ایران و نقشه خط ۲ مترو تبریز ۹۷
- شکل ۱۷-۴- مقطع زمین شناسی از خط ۲ مترو تبریز ۹۸
- شکل ۱۸-۴- a) تصویری از پین ، موقعیت پین های نصب شده نسبت به تونل b) مدل تک نقطه ای c) مدل سه نقطه ای d) مدل چهار نقطه ای e) نحوه نصب تراز یاب برای قرائت نشست..... ۹۹
- شکل ۱۹-۴- a) تصویری از بازار امیرکبیر b) پلان منطقه و c) نقشه محل نصب پین ها..... ۹۹
- شکل ۲۰-۴- مقادیر حداکثر نشست رخ داده در پین های ۴+۶۷۰ تا ۴+۷۰۰..... ۱۰۱
- شکل ۲۱-۴- مقادیر حداکثر نشست رخ داده در پین های ۴+۷۰۰ تا ۴+۸۰۰..... ۱۰۲
- شکل ۲۲-۴- مدل سه بعدی و موقعیت لایه های خاک ۱۰۴
- شکل ۲۳-۴- توصیف مراحل حفاری ۱۰۶
- شکل ۲۴-۴- مدل عددی ساخته شده برای مترائ (۷۵۰+۰) و کانتورهای جابه جایی قائم ۱۰۷
- شکل ۲۵-۴- میزان نشست سطحی در مقاطع ۱۵، ۳۰ و ۴۵ متری سطح زمین در مترائ ۷۵۰+۰ ۱۰۷

- شکل ۴-۲۶- تحلیل حساسیت عامل‌های خط ۲ مترو تبریز در نقطه کنترلی ۱۰۸
- شکل ۴-۲۷- معماری شبکه عصبی مصنوعی به کار رفته در متامدل ۱۱۰
- شکل ۴-۲۸- نتایج (a) داده آزمایش (b) داده اعتبارسنجی (c) داده تربیت ۱۱۳
- شکل ۴-۲۹- روند انجام واکاوی برگشتی با ANN-GA ۱۱۴
- شکل ۴-۳۰- مقایسه نشست در مقابل مراحل پیشروی برای داده ابزاربندی و متامدل بعد از واکاوی برگشتی ۱۱۵
- شکل ۴-۳۱- الف) مدل سه‌بعدی و نقاط اندازه‌گیری شده در آن، ب-ج) نتایج شبیه‌سازی نشست در ۵ نقطه اندازه‌گیری بعد از بهینه‌سازی عامل‌های عملیاتی ۱۲۰
- شکل ۴-۳۲- نمودار نشست سطحی در برابر مراحل پیشروی ماشین حفاری برای سه حالت ابزاربندی، بعد از واکاوی برگشتی با GA و PSO ۱۲۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱ - فنون متامدلسازی	۶
جدول ۱-۲ - عامل‌های مدل برای تونلسازی	۳۵
جدول ۱-۳ - مطالعات موردی استفاده از متامدل در تونلسازی ماشینی	۷۴
جدول ۱-۴ - خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک	۸۱
جدول ۲-۴ - خصوصیات مکانیکی سپر و سگمنت	۸۳
جدول ۳-۴ - بازه عامل‌ها برای انجام واکاوی حساسیت	۸۷
جدول ۴-۴ - نتایج شبکه عصبی مصنوعی	۹۱
جدول ۵-۴ - مقایسه زمان محاسبات برای روش‌های مختلف با استفاده از کامپیوتر ۲ هسته‌ای	۹۲
جدول ۶-۴ - عامل‌های الگوریتم PSO	۹۴
جدول ۷-۴ - خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک در ساختگاه پروژه	۱۰۳
جدول ۸-۴ - مشخصات پوشش و ماده تزریقی مایع و جامد	۱۰۶
جدول ۹-۴ - عامل‌های الگوریتم ژنتیک	۱۱۴
جدول ۱۰-۴ - خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک در نظر گرفته در فاز طراحی	۱۱۶
جدول ۱۱-۴ - عامل‌های الگوریتم PSO	۱۲۰
جدول ۱۲-۴ - نتایج واکاوی برگشتی با GA و PSO	۱۲۱

فهرست علائم و اختصارات

H	عمق محور تونل
D	قطر تونل
Ji	ممان اینرسی درزه‌ها
Je	ممان اینرسی موثر
Jg	ممان اینرسی پوشش بدون درزه
n	تعداد درزه
EE	تأثیر مقدماتی
μ	میانگین
σ	انحراف معیار
v	سرعت
p	موقعیت
C	چسبندگی
γ	وزن مخصوص
Pf	فشار سینه‌کار
Pg	فشار تزریق
Phi	زاویه اصطکاک داخلی
E	مدول الاستیسیته

فصل اول

معرفی تحقیق

با افزایش روز افزون شهرنشینی، گسترش شهرها و نیاز فزاینده به زمین به ویژه در مناطق شلوغ و پرتراکم شهری، استفاده از فضای زیرزمینی و پروژه‌های تونلسازی برای اهداف مختلف از قبیل ایجاد راه‌های ارتباطی، خطوط مترو، تاسیسات زیربنایی و زیرساخت‌ها افزایش چشم‌گیری در سال‌های اخیر داشته است. در کشور ایران نیز پروژه‌های تونلسازی با شتاب زیادی در حال افزایش بوده و علاوه بر ۵ کلان شهر کشور در اکثر شهرهای بزرگ نیز پروژه‌های تونلسازی برای اهداف مختلف در حال اجرا یا مطالعه می‌باشد. تونلسازی ماشینی به دلیل داشتن مزایای فراوان نسبت به روش‌های حفاری و نگهداری سنتی، ازجمله امکان حفاری در انواع مختلف خاک‌ها و شرایط سخت ژئوتکنیکی مانند وجود آب زیرزمینی، زمین‌های نرم با عمق سرباره کم و همچنین امکان کنترل نشست‌های سطحی به عنوان مهم‌ترین روش تونلسازی در دهه‌های اخیر مطرح شده است.

توسعه شهرسازی در کنار حفظ محیط زیست، نیاز به سیستم‌های حمل و نقل مناسب و سریع و فن‌آوری‌های ساخت آن‌ها را افزایش می‌دهد. تاثیر منفی ناشی از ساخت تونل در محیط شهری به سازه‌های سطحی آسیب پذیر باید در حد کمینه نگه‌داشته شوند. تونلسازی ماشینی فن‌آوری ساخت بسیار رایجی است که اجازه پیشروی تونل در بازه‌ی وسیعی از محیط‌های خاکی با کمترین آسیب به اطراف را می‌دهد.

به علاوه ضرورت شهرسازی مدرن برای عبورمرور زیرزمینی با خطوط عبوری چند لایه قطارها، نیازمند توسعه فن‌آوری تونلسازی ماشینی با سپرهایی با قطرهای بزرگ می‌باشد. به عنوان مثال یک ماشین حفاری ۱۷/۶ متری با سپر ترکیبی بزرگ برای ساخت بزرگراه زیرآبی در هنگ کنگ^۱ استفاده شده است [۱].

¹ Hong Kong

با وجود کاربرد فن آوری ساخت قابل اعتماد برای محیط شهری در ۵۰ سال اخیر (از زمانی که فن آوری تونلسازی سپری به طور گسترده استفاده شده است)، تعداد زیادی از ریزش و خرابی ها در طول فرآیند ساخت به وقوع پیوسته است. تعدادی از این ریزش ها با پی آمدهای سنگین در سال های اخیر شامل متروشانگای^۱ در چین (۲۰۰۳)، مترو خط ۳ گوانگزو^۲ در چین (۲۰۰۴)، ترانزیت سریع کائوسایینگ^۳ در تایوان (۲۰۰۴)، خط اصلی فاضلاب لانگ استف^۴ در تورنتو کانادا (۲۰۰۸)، خط مترو تراموا شمال- جنوب کولوگن^۵ در آلمان (۲۰۰۹) و تونل مترو قاهره^۶ در مصر (۲۰۰۹) همراه بوده است. در این موارد نه تنها خود ساختار تونل دچار ریزش شده، بلکه سازه های سطحی هم آسیب جدی دیده اند، که در نهایت منجر به هزینه های سنگین شده اند [۱].

تونلسازی ماشینی به وسیله یک فرآیند ساخت پیچیده که شامل اندرکنش تونل با زمین احاطه کننده، پیشروی مرحله به مرحله دستگاه حفاری، نصب سیستم نگهدارنده، تزریق در فضای خالی پشت پوشش و غیره شناخته می شود. بنابراین، یک پیش بینی قابل اعتماد از تاثیرات ناشی از تونلسازی به همراه کنترل فرآیند پیوسته برای اقدام متقابل در ساخت ایمن و جلوگیری از شکست ها لازم است. شبیه سازی های عددی پیچیده می توانند به عنوان یک ابزار با ارزش و قابل اعتماد برای پیش بینی نشست هم در فاز طراحی و هم در موقعیت های غیرمعمول حین فرآیند ساخت، استفاده شوند.

استفاده از فن تونلسازی ماشینی در مناطق شهری امروزه یک ضرورت می باشد. اگرچه در گذشته تعدادی از ریزش ها در نتیجه کاهش پایداری جبهه کار تونل، نشست بزرگ زمین، شکست قطعات پوشش، تغییر شکل سپر و غیره وجود داشته است. این شکست ها اغلب به خاطر واقعیت متفاوت شرایط زیرزمینی (مکانیک خاکی، زمین شناسی و آب شناسی) با مقادیر تخمین شده آن ها در مرحله طراحی و یا کمبود

¹ Shanghai

² Guangzhou

³ Kaohsiung

⁴ Langstaff

⁵ Cologne

⁶ Cairo

کنترل فرآیند حفاری و عکس‌العمل نامناسب بوده است. بنابراین، فرآیند تونلسازی نیازمند یک سیستم کنترل قوی برای عکس‌العمل به‌موقع در شرایط احتمالی خطر می‌باشد. کنترل فرآیند ساخت براساس پایش مداوم نشست‌های سطحی ساختمان‌ها، شرایط مکانیک خاکی، تغییرشکل‌های زیرزمینی، عامل‌های عملیاتی دستگاه حفاری و تحلیل مناسب از داده اندازه‌گیری و کاربرد آن برای اقدام به‌موقع در موارد موردنیاز، ضروری می‌باشد. تصمیم‌نهایی درباره اقدام به‌موقع در شرایط غیرعادی در طول ساخت به وسیله مهندسين و تجربه‌های موجود از پروژه‌های قبلی گرفته می‌شود.

شبیه‌سازی عددی پیچیده می‌تواند در فاز طراحی برای به‌دست‌آوردن پیش‌بینی منطقی و کلی‌نگر از تأثیرات سطحی و زیرزمینی کوتاه مدت، متوسط و بلند مدت ناشی از تونلسازی استفاده شود. همه‌ی پیش‌بینی‌ها در مرحله طراحی براساس اطلاعات محدود از بررسی‌های مکانیک خاکی، آب‌شناسی و زمین‌شناسی می‌باشد. تعداد گمانه‌ها برای به‌دست‌آوردن داده‌های لازم محدود است. براساس نوع طرح و اطلاعات زمین‌شناسی موجود، گمانه‌ها در هر ۵۰ تا ۳۰۰ متر در طول مسیر تونل جای می‌گیرند. در حالی که نیم‌رخ کامل حاصل برون‌یابی مابین مناطق اکتشاف شده می‌باشد. در نتیجه تغییرات خاص و عدم قطعیت از شرایط خاک مستقیماً به پیش‌بینی مدل‌های شبیه‌سازی براساس این داده‌ها منتقل می‌شود. اگر شرایط موجود در زیرزمین از پیش‌بینی به دست آمده از فاز طراحی متفاوت باشد، به‌هنگام‌رسانی از مدل شبیه‌سازی به منظور تبدیل آن به ابزار مفید پیش‌بینی و امکان عکس‌العمل مناسب، به عنوان فرآیند سازگار با عامل‌های عملیاتی لازم است [۲].

استفاده از روش‌های عددی مخصوصاً روش‌های المان‌محدود^۱ و تفاضل‌محدود^۲ برای شبیه‌سازی فرآیند تونلسازی تعدادی مزایا در مقایسه با راه‌حل‌های تجربی یا تحلیلی دارد. افزایش پیوسته در توانایی فن‌آوری کامپیوتری پیشرفته و امکان پیش‌بینی قابل توجه در سازوکار سازه‌ها، منجر به استفاده از مدل‌های توسعه یافته در زمینه شبیه‌سازی کامپیوتری از سال ۱۹۸۰ شده است. بنابراین، روش‌های

¹ Finite Element Method

² Finite Difference Method

کامپیوتری که برای حفظ فرآیند راهبردی حین ساخت در تونلسازی ماشینی توانایی کافی داشته باشند، لازم و ضروری می‌باشد.

در طراحی مهندسی امروزه استفاده از فنون آماری برای تقریب کدهای کامپیوتری سنگین رایج می‌باشد. این تقریب‌های آماری یا متامدل‌ها برای جایگزینی تحلیل کامپیوتری سنگین واقعی، تسهیل چندانکه، بهینه‌سازی چند منظوره و اکتشاف مفهومی به کار می‌روند. طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ، روش‌های تاگوچی^۱، شبکه‌های عصبی، یادگیری مقایسه‌ای و کریچینگ (درون یابی) از فنونی هستند که برای این منظور استفاده می‌شوند.

تحقیقات اکثر مهندسان حاکی از اجرای کدهای کامپیوتری پیچیده است که این کدها شامل تهیه یک بردار از متغیرهای طراحی (ورودی‌ها) و محاسبه بردار پاسخ (خروجی‌ها) است. علی‌رغم پیشرفت‌های پویا در زمینه کامپیوتری، هزینه اجرای (زمان و امکانات) بسیاری از کدها مهم است. ارزیابی منفرد از واکاوی‌های تفاضل محدود یا المان محدود می‌تواند دقیقه‌ها تا ساعت‌ها و یا بیشتر طول بکشد. دیدگاه کلی متامدلسازی، ساخت تقریب‌هایی از کدهای تحلیل که برای اجرا خیلی کارآمد باشند و در ضمن به عنوان تابع مرتبط‌کننده مابین ورودی و خروجی مدل عمل کنند. این تقریب‌ها سپس می‌توانند جایگزین کد تحلیلی موجود شوند، درحالی‌که موارد زیر را تامین می‌کنند:

- آگاهی بهتر از رابطه بین ورودی و خروجی مدل؛
- یکپارچگی راحت‌تر حوزه وابسته به کدهای محاسباتی؛
- ابزارهای واکاوی سریع برای بهینه‌سازی و برون‌یابی فضای طراحی به وسیله استفاده از تقریب‌ها به جای کدهای محاسباتی سنگین.

¹ Taguchi

مدلسازی جایگزین شامل (۱) انتخاب یک طرح آزمایشی برای ساخت داده (۲) انتخاب یک مدل برای معرفی داده و (۳) برازش مدل با داده مشاهده شده است. برای هر کدام از این مراحل مطابق جدول ۱-۱ حق انتخاب های زیادی وجود دارد [۳].

جدول ۱-۱ - فنون متامدلسازی [۳]

طراحی آزمایش	انتخاب مدل	برازش مدل
کسری	چند جمله ای (خطی، درجه دوم)	خطی سازی کمترین مربعات
ترکیب مرکزی	تقسیم بندی (خطی، مکعبی)	خطی سازی کمترین مربعات
جعبه بهینکن	کاربرد روند تصادفی	وزنی
بهینه سازی D	هموارسازی کرنل	بهترین برآورد خطی نا اریب
بهینه سازی G	تابع اساسی دایروی	بهترین برآورد خطی
آرایه متعامد	شبکه	احتمال لگاریتمی
شش ضلعی	عصبی	بازپخش
ترکیبی	قانون درخت تصمیم گیری	انتروپی (نظریه - اطلاعات)
مکعب بزرگ لاتین		
انتخاب با دست		
انتخاب تصادفی		

۱-۲- تعریف مساله و ضرورت انجام تحقیق

همان طور که گفته شد تونلسازی ماشینی با ماشین حفاری تونل^۱ یک روش ساخت کاربردی در شرایط مختلف زمین است. یکی از مهم ترین اهداف تونلسازی ماشینی ایجاد کمترین تغییر شکل در شرایط زمین، طی عملیات حفاری و ساخت تونل می باشد. این تغییر شکل ها به مدل ساختاری و عامل های استفاده شده در طول فرآیند تونلسازی بستگی دارد. اگر مدل های شبیه سازی عددی به طور مستقیم برای حمایت

¹ TBM (Tunnel Boring Machine)

از عملیات تونلسازی در حین ساخت استفاده شود، پیش‌بینی بی‌درنگ لازم است که تنها با استفاده از متامدل‌های کامپیوتری (جایگزین) همراه امکان‌پذیر است.

باید توجه شود که عامل‌های معمولی خاک ممکن است با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌درستی تعیین نشود (ناشی از تاثیر صحت ابزارهای آزمایش، مهارت اپراتور و غیره). با این وجود، تحلیل برگشتی می‌تواند در هر موردی برای تشخیص مقادیر عدم قطعیت عامل‌ها براساس اندازه‌گیری محلی مانند جابه‌جایی مشاهده شده در طول ساخت به‌کار رود. فن تحلیل برگشتی به عنوان یک ابزار کاربردی مهندسی امروزه به طور گسترده در مسایل مهندسی استفاده می‌شود که آن برای تشخیص عامل‌های خاک در آزمایشگاه یا آزمایش‌های برجا، سیستم‌های نگهداری حفاری، حفاری تونل در سنگ و ساخت سد در خاک‌های نرم استفاده شده است. میسر و چانز به این نتیجه رسیدند که تحلیل برگشتی یک ابزار امیدبخش برای بدست آوردن اطلاعات از مواد و سیمای زمین‌شناسی در پروژه‌های مکانیک خاکی مختلف است [۴]. به طور خلاصه، می‌توان نتیجه گرفت که در مورد شبیه‌سازی تونل به‌دست آوردن مقادیر همه عامل‌های ساختاری مدل مشکل است و آن به آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی زمان‌بر و پرهزینه نیازمند است. چراکه بسیاری از عامل‌ها مستقیماً از داده‌های آزمایش به دست نمی‌آیند.

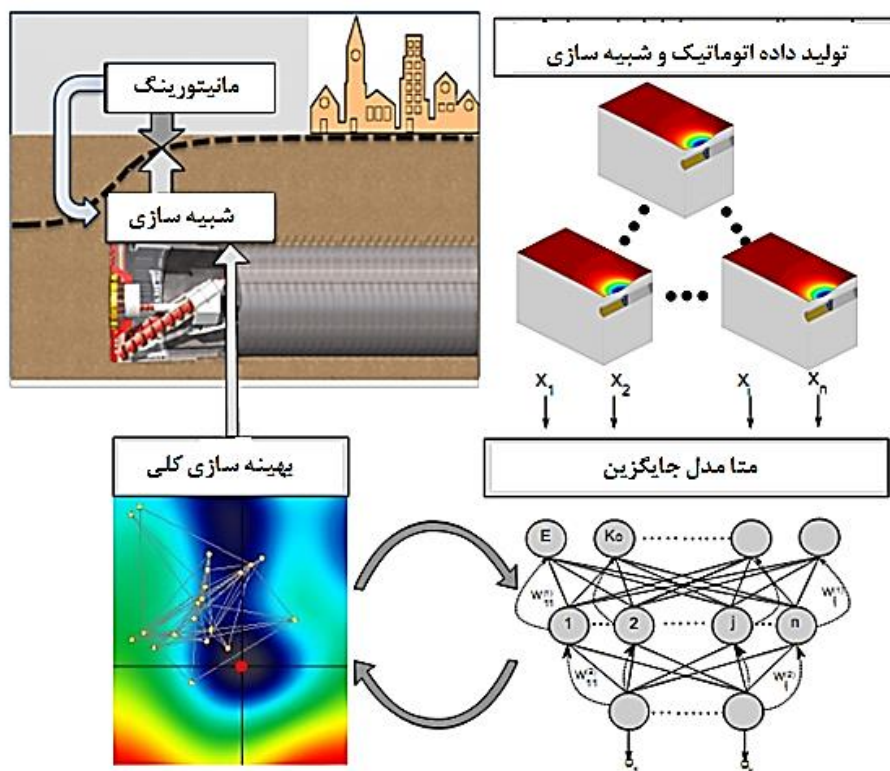
ساخت مدل‌های شبیه‌سازی که همه اجزای منفرد و اندرکنش‌های مابین آن‌ها را در نظر می‌گیرد با هزینه‌های کامپیوتری بالا امکان‌پذیر می‌شوند. در بعضی مدل‌های پیچیده، محاسبه پیشروی تونل شامل اندرکنش بین سازه‌های موجود و ساختار تونل تقریباً ۲ روز طول می‌کشد. اگر مدل شبیه‌سازی برای فاز طراحی به منظور پیش‌بینی تاثیرات ناشی از تونلسازی استفاده شود، این تلاش کامپیوتری مقرون به‌صرفه است. با وجود این، شرایط موجود در فرآیند ساخت تونل اغلب متفاوت از تخمین‌ها در فاز طراحی می‌باشد. لذا به‌روزرسانی مدل‌های شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی‌های آن‌ها ضروری است. بنابراین، اگر شبیه‌سازی در حالت بی‌درنگ باشد حل‌های تناوبی لازم و ضروری می‌باشد. یکی از راه‌حل‌ها در این مورد کاربرد متامدل‌های کامپیوتری ارزان است. در سال‌های اخیر به علت نیاز شدید به محاسبه کامپیوتری سریع،

قوی و سازگار با همه مراحل مدلسازی، شبیه‌سازی براساس متامدل‌ها گسترش پیدا کرده است. از متامدل‌ها برای معرفی وابستگی بین مراحل مختلف شبیه‌سازی، یادگیری روابط چندلایه بین عامل‌های مختلف و رسم آن‌ها برای دادن یک خروجی استفاده شده است [۵، ۶].

در طول فاز طراحی از پروژه ساخت تونل، داده‌های ژئوتکنیکی تنها از طریق گمانه‌ها با تعداد محدود به دست می‌آید. این اطلاعات جمع‌آوری شده اغلب به عنوان منبع تعیین عامل‌ها در مدل‌های واکاوی عددی استفاده می‌شود. در نتیجه به دلیل کمبود اطلاعات از خصوصیات زمین، عامل‌های مواد که در واکاوی عددی در فاز طراحی به طور دقیق موقعیت‌های برجا را که ساخت تونل با آن مواجه خواهد شد را منعکس نمی‌کند. در حالی که برخلاف مرحله طراحی، اطلاعات فراوان از ایزاربنندی پیوسته در طول ساخت تونل در دسترس قرار می‌گیرد که از آن‌ها می‌توان برای به‌روز رسانی مدل کامپیوتری در طول ساخت تونل استفاده کرد. برای به‌روز رسانی مدل، شناسایی عامل‌های مدل با توجه به اندازه‌گیری‌های موجود، تعداد زیادی رویه در دسترس است [۷]. در مسایل ژئوتکنیکی پیچیده، الگوریتم‌های بهینه‌سازی جامع به دلیل توانایی آن‌ها در پیدا کردن حالت بهینه کلی ترجیح داده می‌شود. با وجود این، این الگوریتم‌ها نیازمند تعداد زیادی تحقیق که نتیجه آن انجام مدل‌های عددی پیچیده به تعداد زیاد و در نتیجه صرف زمان زیاد است. به‌منظور انجام واکاوی برگشتی به هنگام، زمان محاسبات باید در بازه چند دقیقه باشد. در نتیجه استفاده از متامدل‌ها به جای مدل‌های عددی پیچیده توصیه می‌شود. شکل (۲-۷) توصیفی از مراحل ساخت متامدل در تونلسازی ماشینی را به صورت تصویری نشان می‌دهد.

حفر تونل‌های مترو به دلیل نزدیکی به سطح زمین و قرارگیری در رسوبات شهری پدیده نشست را به همراه دارد. بعد از حفر تونل بخشی از محیط (خاک) حذف شده و باعث ایجاد دگرگونی در وضعیت تنش منطقه می‌شود که این امر پدیده نشست را به دنبال دارد. با توجه به عبور تونل‌های مترو از مجاورت ساختمان‌ها، بناهای تاریخی و غیره بررسی و برآورد دقیق از میزان نشست جهت تعیین میزان فشار

سینه‌کار، فشار تزریق، طراحی سیستم نگهداری و غیره امری ضروری بوده که توجه کارشناسان را به این مساله معطوف می‌کند.



شکل ۱-۱- توصیفی از متامدل براساس پوشش و شبیه‌سازی عددی راهبردی [۸]

۳-۱- اهداف و نوآوری

ارزیابی قابلیت اطمینان در تونلسازی ماشینی نیازمند مدل‌های عددی منطقی با بررسی عدم قطعیت ژئوتکنیکی و عامل‌های عملیاتی تونلسازی می‌باشد. برای پیش‌بینی به موقع، مدل‌های جایگزین (متا مدل‌ها) عموماً ناگزیر به جایگزینی با مدل‌های سنگین و پیچیده عددی می‌باشند.

شبیه‌سازی عددی تونلسازی با داده‌هایی با عدم قطعیت‌های چندگانه به طور کلی زمان‌بر است که مستلزم تلاش محاسباتی درون واکاویهای تصادفی همراه با تعداد زیادی از مفاهیم و عامل‌ها می‌باشد. به منظور هدایت همراه با نگهداری در تونلسازی ماشینی، مدل‌های جایگزین برای توصیف وابستگی مابین

عامل‌های با عدم قطعیت ژئوتکنیکی و عملیاتی تونلسازی و پاسخ‌های ساختاری غیرقطعی متقابل، بسیار مناسب هستند.

به همین منظور در این تحقیق برای تخمین دقیق نشست ناشی از تونلسازی مترو در محیط‌های شهری، با مطالعه و انتخاب روش و نرم افزار مناسب برای شبیه‌سازی تونلسازی ماشینی و در ادامه تحلیل حساسیت و انتخاب عامل‌های موثر در پاسخ مورد هدف در شبیه‌سازی و انجام شبیه‌سازی در بازه این عامل‌های موثر به منظور تولید داده برای متامدل انجام خواهد گرفت. در ادامه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پیش‌بینی و مقایسه با مقدار نشست سطحی پایش شده انجام و در نهایت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، به‌روزرسانی عامل‌های ژئوتکنیکی و بهینه‌سازی عامل‌های عملیاتی ساخت تونل انجام خواهد شد.

باتوجه به این که تعداد محدودی کار تحقیقاتی در زمینه پیش‌بینی نشست با متامدل در تونلسازی ماشینی صورت گرفته است و در همه این تحقیقات از نرم افزارهای شبیه‌سازی المان محدود Ekate و Plaxis استفاده شده است. لذا از نرم افزار FLAC که در مدلسازی تونل‌ها کاربرد زیادی دارد، استفاده شود. در زمینه مدلسازی مراحل تونلسازی سعی بر آن است که مدلسازی شامل کلیه مراحل حفاری TBM شامل پیشروی دستگاه، نصب پوشش و سپر، در نظر گرفتن اضافه حفاری، فشار تزریق و سینه‌کار و وجود سازه‌های سطحی باشد.

پس به‌طور کلی با انجام این تحقیق در سه حوضه زیر پیشرفت‌هایی ایجاد می‌شود:

- ۱- توسعه بیشتر در زمینه شبیه‌سازی نرم افزاری تونلسازی ماشینی
- ۲- کاهش عدم قطعیت‌ها در برآورد عامل‌های اندازه‌گیری در مراحل تونلسازی
- ۳- توسعه محتوای کاربردی از مدل شبیه‌سازی به عنوان ابزاری برای انتخاب عامل‌های TBM، برای کنترل فرآیند نگهداری و تصمیم‌گیری در تونلسازی ماشینی

۴-۱- روش انجام تحقیق

به طور کلی تحقیق حاضر شامل مراحل زیر می‌باشد:

۱- مطالعه و انتخاب یکی از پروژه‌های در حال اجرا و یا اتمام یافته تونلسازی واقعی

۲- تهیه داده‌های ژئوتکنیکی برای مطالعه موردی انتخاب شده

۳- مدل‌سازی مراحل و اجزا مختلف تونلسازی ماشینی از نوع EPB^۱

۴- تحلیل حساسیت عامل‌های ژئوتکنیکی و عملیاتی و تولید داده متا مدل

۵- کاربرد شبکه عصبی به عنوان متا مدل

۶- پیش بینی نشست با متا مدل ساخته شده

۷- استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی برای به روز رسانی عامل‌ها

۵-۱- ساختار تحقیق

این تحقیق شامل پنج فصل می‌باشد. در فصل اول مقدمه‌ای از موضوع تحقیق، ضرورت انجام و مراحل آن ارائه می‌شود. در فصل دوم مفاهیم کلی و تمامی موضوعاتی که در انجام تحقیق استفاده شده است بحث شده است. فصل سوم شامل مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی تونلسازی ماشینی، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، استفاده از متامدل در تونلسازی ماشینی و کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی می‌باشد. در فصل چهارم دو مطالعه موردی تونل خط ۷ مترو تهران و تونل خط ۲ مترو تبریز بررسی می‌شود. در مطالعه موردی اول (تونل خط ۷ مترو تهران) از میان تعداد ۶ عامل انتخابی با انجام واکاوی حساسیت ۳ عامل به عنوان عامل‌های موثرتر در میزان نشست سطحی انتخاب و با انجام ۱۰۰ عدد شبیه‌سازی عددی، متا مدل شبکه عصبی ساخته شد و برای انجام واکاوی برگشتی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. با توجه به تاریخی بودن شهر تبریز و نیاز شدید به پیش‌بینی دقیق میزان نشست مکان‌های تاریخی و حساس در حین فرآیند تونلسازی زیرزمینی و جلوگیری از آسیب‌های

¹ Earth Pressure Balance

احتمالی، قسمتی از این پروژه برای بررسی انتخاب شد. کلیه مراحل شبیه‌سازی عددی، واکاوی حساسیت، ساخت متا مدل و واکاوی برگشتی با الگوریتم ژنتیک برای این مطالعه موردی در حجم بزرگتر انجام شده است و در آخر فصل نتایج حاصل از دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات مقایسه شده است. در انتها در فصل پنجم نتایج کلی این تحقیق به ترتیب ارائه و پیشنهاداتی برای تکمیل این تحقیق بیان شده است.

فصل دوم

مفاهیم کلی

۲-۱- متامدل برای تونلسازی ماشینی

متامدل‌ها ابتدا به عنوان مدل‌های جایگزین برای فرآیندهای شبیه‌سازی سنگین به منظور بهبود بازده محاسباتی توسعه یافتند و با پیشرفت سریع روش‌های کامپیوتری و تکنولوژی در سال‌های اخیر، برای کاربردهای مختلفی استفاده شده‌اند. به عنوان مثال، آن‌ها برای پیش‌بینی، واکاوی حساسیت، مشخص کردن الگو، بهینه‌سازی طراحی و غیره استفاده شده‌اند. در ۲۰ سال گذشته پیشرفت در فنون متامدلسازی روند صعودی داشته است. متامدل‌ها برای بیان وابستگی مابین ورودی و خروجی شبیه‌سازی، یادگیری روابط پیچیده بین عامل‌های مختلف و شکل‌دهی آن‌ها به صورت خروجی موردنظر استفاده شده‌اند.

اغلب روش‌های متفاوتی مانند مدل‌های خطی‌سازی، شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱، توابع اصلی شعاعی^۲، کریچینگ^۳ یا مدل‌های همبستگی خاص، سطوح پاسخ^۴، مدل‌های تئوری بازی و تجزیه متعامد^۵ برای این منظور می‌توانند استفاده شوند. مطابق این مدل‌ها شبکه عصبی مصنوعی فنی است که استفاده گسترده در کاربردهای مهندسی و مخصوصا مسایل ژئوتکنیکی دارد [۵، ۹، ۱۰].

شبکه‌های عصبی مصنوعی به طور موفقیت‌آمیزی با مدل‌های عددی ترکیب شده و برای پیش‌بینی تغییر شکل ناشی از تداخلات مکانیک خاکی استفاده شده‌اند. برای ایجاد متامدل، ابتدا لازم است که هدف از تحلیل (مانند نشست‌ها (شکل ۲-۱)، تنش‌ها، جابه‌جایی‌ها و غیره) و نیز عامل‌هایی که باید بررسی شوند، مشخص شود. مدل‌های شبیه‌سازی پیچیده معمولا دارای ۱۰ تا ۱۰۰ عامل هستند. ولی فقط تعداد محدودی از عامل‌ها در تحلیل‌های هدف، تاثیر بارزی دارند. بنابراین، به منظور ایجاد متامدل قوی و قابل اتکا، واکاوی حساسیت برای پیش‌انتخاب از عامل‌های مهم، لازم است. بعد از این که گروهی

¹ Artificial neuron network

² Radial basis functions

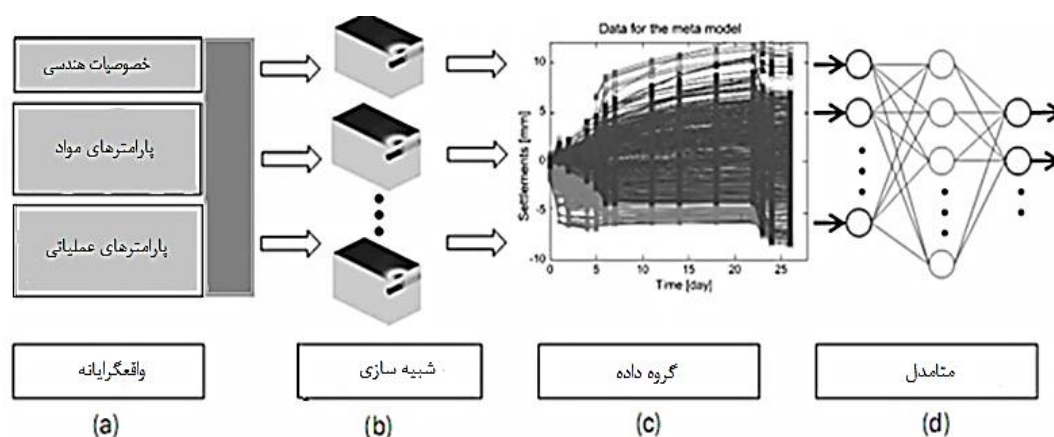
³ kriging

⁴ Response surface

⁵ Orthogonal decomposition

از عامل‌ها انتخاب شدند، بازه‌های عامل‌های مورد بررسی براساس داده پروژه مشخص می‌شود. عامل‌های ورودی بررسی و خروجی محاسبه‌شده، گروه داده ایجاد شده با متامدل را معرفی می‌کنند. شبکه‌های عصبی مصنوعی برای یافتن وابستگی مابین ورودی و خروجی شبیه‌سازی استفاده می‌شود [۲].

در مسایل مکانیک خاکی، مخصوصاً در تونلسازی ماشینی، اطلاعات معمولاً در فاز طراحی براساس برون‌یابی از تعداد محدودی از موقعیت‌ها ایجاد می‌شود. در نتیجه، در طول ساخت، شرایط مکانیک خاکی ممکن است از فرضیات اولیه در مرحله طراحی متفاوت باشد. این حقیقت منجر به علاقه به کاربرد ترفندهای معکوس شناسایی عامل و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مدلسازی مکانیک خاکی به منظور به‌هنگام کردن خصوصیات مواد و عامل‌های مدل در مراحل قطعی از ساخت می‌شود. از آنجایی که بعضی از واکاوی‌ها نیازمند تعداد زیادی از شبیه‌سازی‌ها هستند، سخت‌افزارهای کامپیوتری سریع همراه با فنون خودکار برای تحلیل معکوس فرآیندهای مکانیک خاک لازم است [۴، ۱۱، ۱۲].



شکل ۲-۱- متا مدل برای پیش بینی سریع نشست در تونلسازی ماشینی [۲]

۲-۲- شبیه‌سازی عددی

هدف از شبیه‌سازی تونلسازی ماشینی در نظر گرفتن تعداد زیادی از فرآیندهایی که در طول حفاری تونل اتفاق می‌افتد مانند به کار بردن فشار سینه کار، بیش حفاری سپر، فضای خالی پشت سپر، فرآیند

تزریق در فضای خالی، نصب پوشش بتنی چندتکه و است. به منظور یک تجزیه و تحلیل دقیق، باید یک مدل سه‌بعدی عددی استفاده شود که همه این فرآیندها را در نظر بگیرد.

روش‌های معمول و مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی تونل و فضاهاى زیرزمینی عبارت اند از :

- روش‌های پیوسته:
 - روش تفاضل محدود FDM
 - روش المان محدود FEM
 - روش المان مرزی BEM^1
- روش‌های ناپیوسته
 - روش المان مجزا DEM^2
 - تحلیل تغییر شکل ناپیوسته DDA^3
- روش‌های ترکیبی پیوسته/ ناپیوسته
 - ترکیب FEM/BEM
 - ترکیب DEM/BEM
 - ترکیب FEM/DEM
 - دیگر روش‌های ترکیبی

همه‌ی این روش‌ها در جهت بهبود قدرت محاسبات توسعه یافته‌اند. به عنوان مثال مش‌بندی مدل یک مهارت وقت‌گیر و خسته‌کننده است که امروزه با پیشرفت نرم افزارهای مربوطه حتی برای مدل‌های سه‌بعدی پیچیده به راحتی انجام می‌شود. همچنین در مدلسازی‌های تفاضل محدود و المان محدود، تعداد زیادی از مدل‌های رفتاری مواد شامل الاستیک خطی، مدل‌های الاستوپلاستیک (موهر – کلمب، هوک و

¹ Beam Element Method

² Dictinct Element Method

³ Discontinous Deformation Method

براون، مدل‌های مقاومتی دراگر پراگر و غیره) و مدل ویسکوپلاستیک را می‌توان استفاده کرد. اجزای مقاوم سازی مختلف مانند قاب فولادی، میل مهار، پوشش بتنی، شاتکریت و غیره با استفاده از المان‌های تیر و پوشش قابلیت مدلسازی در این روش‌های عددی را دارند. در برنامه‌های تفاضل محدود، مدلسازی ناپایداری فیزیکی مانند مدل‌های پلاستیک که به صورت محلی با توسعه مرزهای برشی در مواد ایجاد می‌شوند، ممکن می‌باشد [۱۳].

۲-۱-۲- معرفی نرم افزار

¹ FLAC یک برنامه سه‌بعدی صریح تفاضل محدود برای محاسبات مهندسی است. ^{3D} FLAC قابلیت تحلیل سه‌بعدی، شبیه‌سازی رفتار سه‌بعدی سازه‌های ساخته‌شده در خاک، سنگ و یا دیگر مواد را دارد که این مواد وقتی که به حد تسلیم برسند دچار جریان پلاستیک می‌شوند. مواد به وسیله المان‌های چندوجهی درون یک شبکه که توسط مدلساز برای شکل مدل موردنظر در نظر گرفته شده‌اند، تعریف می‌شوند. هر جز مطابق قانون تنش - کرنش غیرخطی در پاسخ به نیروها یا مهارکننده‌های مرزی رفتار می‌کند. طرح محاسبه لاگرانژی صریح و روش منطقه بندی گسسته‌سازی این اطمینان را می‌دهد که در ^{3D} FLAC فروپاشی پلاستیک و جریان به دقت مدل شوند. ^{3D} FLAC یک ابزار تحلیل ایده‌آل برای حل مسایل سه‌بعدی مهندسی ژئوتکنیک ارایه می‌دهد [۱۴].

تفاضل محدود از قدیمی‌ترین روش‌های عددی برای حل معادلات دیفرانسیل با مقادیر اولیه و شرایط مرزی می‌باشد. در روش تفاضل محدود هر مشتق در معادلات حاکم مستقیماً توسط یک عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان (تنش یا تغییر مکان در نقاط دلخواه از فضا) می‌باشد، جایگزین می‌شود. در ابتدای توسعه روش‌های عددی، روش‌هایی مانند المان محدود مرسوم بوده‌اند. این روش‌ها اغلب ماتریس المان‌ها را ترکیب کرده و یک ماتریس سختی سراسری بزرگ را می‌سازند. درحالی که در روش تفاضل

¹ Fast Lagrangian Analysis of Continua

محدود بطور معمول این عمل انجام نمی‌گیرد و قابلیت نسبی برای تولید مجدد معادله‌های تفاضل محدود در هر گام وجود دارد. از آنجا که لازم نیست یک ماتریس سراسری تشکیل شود، تجدید مختصات در وضعیت کرنش‌های بزرگ، مشکلی ایجاد نمی‌کند. تغییر مکان‌های جزئی گره‌ها به مختصات گره‌ها اضافه می‌شوند، به نحوی که شبکه با مصالح ارایه‌شده‌ی آن حرکت می‌کند و تغییر مکان می‌دهد. نام این عمل، رابطه‌بندی لاگرانژی است که در این روش به کار گرفته می‌شود. تصور بعضی بر آن است که روش تفاضل محدود به شبکه‌های المانی مستطیلی محدود می‌شود که در واقع چنین نیست. روش به دست آوردن معادلات تفاضلی المان‌هایی که دارای شکل دلخواه باشند، توسط ویلکنز^۱ ارایه شده است و بر این اساس می‌توان هر شکل دلخواهی برای المان‌ها تعریف کرد [۱۵].

نرم افزارهای $FLAC^{3D}$ و $FLAC^{2D}$ براساس روش تفاضل محدود کار می‌کنند که بر اساس یک طرح محاسباتی لاگرانژی استوار است. این نرم افزارها دارای ۱۱ مدل از پیش ساخته‌اند که از مدل فضای خالی برای نمایش حفاری‌ها در شبکه تا مدل تسلیم برشی و حجمی برای نمایش رفتار کرنش نرمی و نمایش گسیختگی برشی غیرقابل برگشت و غیر خطی استفاده می‌شود. در این نرم افزار مدلی برای ارتباط دادن سطح ناپیوستگی مشخص بین دو یا تعداد بیشتری از بخش‌های شبکه استفاده می‌شود. سازه‌های تونل، میل مهارها، شمع‌های صفحه‌ای و غیره که با خاک یا سنگ درونگیر خود اندرکنش دارند را می‌توان با $FLAC^{3D}$ مدل‌سازی کرد و سپس اثرات آن را بر روی پایداری فضا و سازه زیرزمینی یا سطحی بررسی نمود [۱۴].

در برخی هندسه‌ها و شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پیچیده محیط، نرم افزار $FLAC^{3D}$ با مشکلاتی مانند شکست شبکه، طولانی شدن زمان اجرای مدل مواجه می‌شد که این مشکل اخیراً توسط نرم‌افزارهای جانبی شرکت ITASCA حل شده است.

گریدل^۱ یک نرم افزار جانبی است که به مهندسين و محققين امکان ايجاد شبکه های حجيم به صورت خودکار، تعاملی و آسان برای استفاده در FLAC^{3D} و بسیاری دیگر از قالبهای مدلسازی مهندسی از جمله ABAQUS، ANSYS، NASTRAN، LS-DYNA، VRML و CSV را می دهد. گریدل یک مورد اضافه شده برای نرم افزار کد راینو سه بعدی^۲ است که از ابزارهای قدرتمند کد موجود در راینو استفاده می کند. با استفاده از ابزار راینو به راحتی می توان:

- با نقاط، ابرهای نقطه ای، منحنی ها، سطح ها، مش ها و مواد جامد ايجاد و کار کرد.
- پروفیل ها و مسیرهای پیچیده تونل را مدلسازی کرد.
- مراحل ساخت را تعريف کرد.
- هندسه های طرح را از قالبهای دیگر وارد کرد (به عنوان مثال، DXF، DWG و غیره).
- هندسه عنصر ساختاری (سیستم نگهدارنده) مانند آسترها، شمع ها، تقویت کننده های بتونی و پیچ سنگ را اضافه کرد.

با گریدل می توان به سرعت زمین شناسی و ساختارهای مهندسی بسیار پیچیده را مشبک کرد. ساختارهای طبیعی مانند گسل ها و اتصالات را ايجاد کرد [۱۶].

۲-۲-۲- انتخاب ابعاد مدل، شرایط مرزی و شرایط اولیه

الف) ابعاد مدل

اولین گام به منظور مدلسازی و اجرای برنامه در نرم افزار FLAC^{3D} ساخت هندسه مساله مورد نظر است. یک سری از مطالعات عاملی برای به دست آوردن کمترین مقدار بهینه از ابعاد مدل توسط روتریگرز^۳ انجام شده است. که در نهایت مقادیر زیر برای مدل سه بعدی توصیه شده است:

¹ Griddle

² CAD Rhinoceros 3D (Rhino)

³ Rotrigarz

- $(H+4D)$ برای ارتفاع شبکه

- $(H+3D)$ برای طول شبکه

- $3H$ برای عرض شبکه

که H عمق محور تونل و D قطر تونل می باشد [۱۷]. برای مطالعه موردی دوم به دلیل در اختیار داشتن کامپیوتر پرسرعت و عدم محدودیت زمانی با بررسی ابعاد مختلف پیشنهاد شده توسط محققین مختلف ابعاد بهینه انتخاب شد.

ب) تعریف مدل رفتاری

برنامه $FLAC^{3D}$ دارای یازده مدل رفتاری از پیش طراحی شده است که عبارتند از: مدل تهی، سه نوع مدل الاستیسیته (ایزوتروپ، ایزوتروپ متقاطع (انیزوتروپ) و الاستیک اورتوتروپ) و هفت مدل پلاستیسیته (دراگر، موهر-کلمب، کرنش سخت شونده و نرم شونده، درزه سراسری، کرنش نرم شونده و سخت شونده غیر خطی درزه سراسری، تسلیم دوگانه و مدل اصلاح شده Cam-Clay). هر مدل برای ارزیابی حالت خاصی از رفتار مصالح به کار می رود که معمولاً مرتبط با مصالح زمین شناسی هستند.

مدل رفتاری موهر-کلمب، برای موادی به کار می رود که تحت بارگذاری برشی تسلیم می شوند. این مدل پرکاربردترین مدل در مطالعات عمومی مهندسی است. این مدل می تواند در مواد دانه ای شن، سیمان، خاک، سنگ و بتن مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می توان از این مدل در تحلیل پایداری حفاریات زیرزمینی و پایداری شیب بهره جست. مدل موهر-کلمب و مدل دراگر-پراگر مدل های پلاستیکی هستند که از لحاظ محاسباتی کارآمدتر می باشند. این مدل های رفتاری نسبت به سایر مدل های پلاستیک، نیاز به حافظه و زمان کمتری به منظور انجام محاسبه دارند. در مطالعات موارد واقعی در این نرم افزار استفاده از مدل دراگر-پراگر توصیه نشده است [۱۴].

پ) شرایط مرزی اولیه

شرایط مرزی یک مدل عددی، شامل متغیرهای تنش و جابه‌جایی است. مرزها به دو صورت واقعی و مصنوعی می‌توانند باشند. مرزهای فیزیکی و موجود در طبیعت مانند سطح تونل یا سطح زمین را مرزهای واقعی می‌نامند که در لایه بندی مدل وجود دارند. مرزهای مصنوعی در واقع وجود خارجی ندارند، اما برای محدود کردن ناحیه انتخابی در نظر گرفته می‌شوند. شرایطی که برای هر دو نوع مرز پیشنهاد می‌شود مشابه هستند [۱۸].

مرزهای شبکه $FLAC^{3D}$ آزاد از تنش و بدون هیچ محدودیتی هستند. نیروها و تنش‌ها می‌توانند برای هر مرزی یا بخشی از مرز استفاده شوند. به عنوان مثال بارهای سطحی ناشی از وجود ساختمان و بار ترافیک در جهت عمود بر سطح بر مرز بالایی مدل در نظر گرفته می‌شود و بارهای فشار سینه کار و بار ناشی از تزریق به پشت پوشش بتنی در جهت عمود بر سینه کار و دیواره تونل وارد می‌شود.

در نرم افزار $FLAC^{3D}$ جابه‌جایی‌ها را نمی‌توان به طور مستقیم کنترل کرد. در حقیقت آن‌ها هیچ نقشی در محاسبات ندارند. برای اعمال جابجایی داده شده به یک مرز، لازم است که سرعت مرزی برای تعدادی مراحل تعیین شود. سطح بالایی مدل، که همان سطح زمین است به صورت آزاد در نظر گرفته می‌شود. بقیه مرزها به صورتی غلطکی بسته می‌شوند که در واقع مقدار سرعت در جهات اصلی مورد نظر ثابت در نظر گرفته شود و مقدار جابه‌جایی در این مرزها صفر باشد.

در اکثر پروژه‌های مهندسی معدن یا عمران، قبل از حفر و ایجاد سازه تنش‌های برجا در عمق زمین وجود دارند. با اعمال شرایط اولیه، تنش‌های برجای موجود در زمین قبل از حفاری شبیه‌سازی می‌شود. در لایه‌های یکنواخت با سطح آزاد، تنش‌های قائم معمولاً برابر با ρgh است که ρ چگالی مواد، g شتاب ثقل و h عمق نقطه مورد نظر می‌باشد. در محیط‌های خاکی دانه‌ای نسبت تنش‌ها براساس رابطه (۱-۲) محاسبه می‌شود :

$$k = 1 - \sin \emptyset \quad (2-1)$$

که در آن k نسبت تنش موثر افقی به تنش موثر عمودی و $\emptyset$ زاویه اصطکاک زهکشی شده است. این رابطه برای خاک‌های ریز ماسه‌ای نتایج خوبی به دست می‌دهد [۱۹].

یکی از ملزومات اصلی برای گرفتن نتایج دقیق در مدلسازی عددی به تعادل رسیدن تنش‌ها و جابه‌جایی در مدل قبل از شروع حفاری است. برای این منظور بعد از ایجاد هندسه و تخصیص مشخصات به مدل عددی، با در نظر گرفتن حداقل نیروی تعادل (معادل 10^{-5}) مدل در نرم افزار اجرا می‌شود.

۲-۲-۳- مدلسازی سپر

برای شبیه‌سازی سپر ماشین، روش‌های مختلفی توسط محققین استفاده شده است. از پرکاربردترین این روش‌ها در نظر گرفتن سپر به عنوان یک المان صفحه‌ای فولادی به شکل استوانه در اطراف تونل می‌باشد. در این روش به دلیل استفاده کردن از المان صفحه‌ای نیازی به تعبیه مشخصات مرزی رابط بین اجزا خاک و سپر نمی‌باشد [۲۰].

روش دیگر در نظر گرفتن سپر به صورت مرزی فرضی یا ساختگی می‌باشد. در این روش به ازای پیشروی سپر، تمام نقاط مربوط به آن در اطراف تونل به صورت هندسی شناسایی می‌شود و به ازای گام‌های حفاری تمامی این نقاط ثابت می‌گردند. در این روش از اعوجاج سپر در اثر بار روباره و هرگونه تغییر شکل آن جلوگیری می‌شود [۲۱].

۲-۲-۴- مدلسازی سیستم نگهدارنده بتنی

برای مدلسازی سیستم نگهدارنده بتنی چندتکه، اغلب دو روش استفاده از المان‌های صفحه‌ای یا استفاده از المان‌های آستر در مدلسازی $FLAC^{3D}$ مرسوم است که در روش استفاده از المان صفحه‌ای

امکان معرفی عامل‌های مرزی رابط بین خاک وجود ندارد ولی در روش لاینر می توان این عامل‌ها را نیز در نظر گرفت.

همچنین هر حلقه از پوشش بتنی را می‌توان به صورت یکپارچه در نظر گرفت یا درزه‌های پیوند دهنده بین تکه‌های حلقه را نیز در مدلسازی وارد کرد. روش دیگر مدلسازی حلقه به صورت کامل با در نظر گرفتن تاثیر وجود درزه‌ها در خصوصیات حلقه کامل می‌باشد که برای این کار روش‌های تحلیلی مختلفی برای محاسبه تاثیر وجود درزه، ارائه شده است [۲۱].

در این تحقیق از رابطه ارائه شده توسط مویر وود برای محاسبه ممان اینرسی موثر و تاثیر وجود درزه‌ها استفاده شده است که به صورت رابطه (۲-۲) می باشد:

$$J_e = J_i + J_g * \left(\frac{4}{n}\right)^2 \quad (2-2)$$

که در این رابطه J_e ممان اینرسی موثر، J_i ممان اینرسی درزه‌ها، J_g ممان اینرسی در قسمت پوشش بدون درزه‌ها و n تعداد درزه‌ها در حلقه پوشش است [۲۲].

۲-۲-۵- مدلسازی فشار سینه کار و فشار تزریق

فشار محبوس کننده به کاررفته در سطح سینه کار تونل نقش مهمی در پایداری تونل در فرآیند حفاری ایفا می‌کند به طوری که سینه کار تونل دچار ریزش یا نفوذ آب به داخل تونل نمی‌شود. معمولاً این فشار به صورتی فشار وارد به خارج تونل در سطح سینه کار و با استفاده از المان‌های تنش در نظر می‌گیرند که این فشار یا به صورت دایره کامل یا به صورت دوزنقه‌ای که متناسب با چگالی خاک حفاری از سقف تا کف تونل تغییر می‌کند در نظر گرفته می‌شود. یکی از مزایای تونلسازی ماشینی با دستگاه TBM، نصب سیستم نگهداری بتن پیش ساخته چندتکه است. در این روش یک فضای خالی مابین قطر خارجی پوشش تونل و مرز حفاری به وجود می‌آید. بعد از نصب تکه‌های

پوشش در پشت سپر، این فضای خالی حلقوی با تزریق ملات سیمانی پر می‌شود. مزایای تزریق پشت پوشش بتنی عبارت است از:

- کمینه کردن مقدار نشست سطحی، اگر این فضای خالی ایجاد شده به طور کامل و دقیق پر نشود حرکت خاک برای پر کردن این فضای خالی تا سطح زمین ادامه می‌یابد و باعث نشست سطحی می‌شود. براساس قطر حفاری و قطر خارجی سگمنت‌ها، حجم این فضای خالی مابین ۶-۸ درصد حجم حفاری است.

- تماس یکنواخت بین پوشش و زمین را تضمین می‌کند. زمین به پوشش بار وارد می‌کند و همچنین مقاومتی در مقابل چرخش ایجاد می‌کند، پرکردن مناسب فضای خالی انتهای سپر از بارگذاری نامناسب جلوگیری خواهد کرد.

- حلقه پوشش را در خلال پیشروی سپر در جای خود نگه می‌دارد. اگر پوشش توسط تزریق یک سیال احاطه شود، طبق قانون ارشمیدس می‌تواند به سمت بالا حرکت کند. این می‌تواند منجر به پله‌داری درزه‌های پیرامونی شده و از حالت صفحه‌ای خارج شده و آسیب کلی به پوشش وارد می‌کند.

- بار منتقل شده به پوشش توسط سیستم پشتیبان را تحمل می‌کند.

- آب بندی تونل را تکمیل می‌کند [۲۳].

بلوم و همکاران بسیاری از جزئیات فرآیند تونلسازی TBM با روش المان محدود سه‌بعدی را در نرم افزار ANSYS مدل‌سازی کردند. آن‌ها اثرات متقابل بین تونل و زمین، پوشش چندتکه، مواد پرکننده بین حلقه‌های قطعات، نیروی رانش، تغییر فاز دوغاب از مایع به جامد را در نظر گرفتند. آن‌ها همچنین اثرات فرآیند تزریق را در حال بارگیری قطعات بررسی کردند و اظهار داشتند که تبدیل فاز مایع به فاز جامد به سرعت اتفاق نمی‌افتد و بین این دو حالت یک منطقه تبدیل وجود دارد که به سرعت پیشروی TBM بستگی دارد. سرانجام، با استحکام دوغاب در مدت زمان مشخص، می‌توان اثر بارهای خارجی را بر تغییر شکل‌های پوشش کنترل کرد [۲۴].

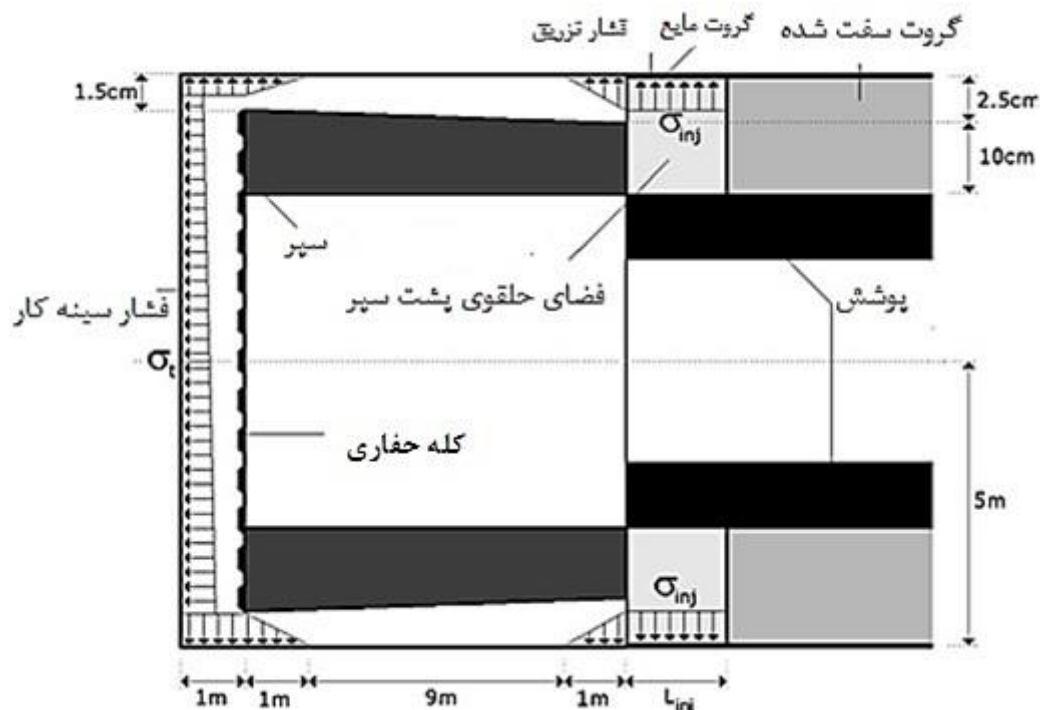
لامبروگی و همکاران (۲۰۱۲) دوغاب را به عنوان عنصر کشسان پیوسته خطی مدلسازی کردند. در این مدل فشار دوغاب به صورت فشار همسانگرد و یکنواخت اطراف تونل شبیه سازی شده است. سختی کم برای محل تزریق نزدیک سپر و افزایش سختی برای عناصر تزریق شده دور از سپر برای محاسبه خصوصیات مکانیکی سخت شدن دوغاب اعمال شده است.

با استفاده از قانون سخت شدن برای دوغاب (معادله (۲-۳))، که تابعی از تغییر مدول الاستیسیته با زمان است، میزان سخت شدن دوغاب در ۱۲ ساعت محاسبه و در مدل آن ها اعمال شده است.

$$E^T = \begin{cases} E_{ini} & T = 0 \\ E_g \left[1 - e^{-0.2\left(\frac{T}{T_0}\right)} \right] & T \geq T_0 \end{cases} \quad (2-3)$$

در اینجا E^T مدول الاستیسیته دوغاب در زمان T است، E_g مدول دوغاب کاملاً سخت شده است و E_{ini} مقدار اولیه مدول الاستیسیته است که باید تخمین زده شود. برای بدست آوردن تغییرات سخت شدن دوغاب با فاصله از سپر، برخی اطلاعات مانند نرخ پیشروی TBM لازم است [۱۷].

به منظور شبیه سازی تغییر فاز دوغاب از مایع به فاز جامد، مولون و همکاران، مطابق شکل (۲-۲)، دوغاب مایع برای طول L_{inj} پشت سپر و دوغاب جامد را برای بعد از این طول فرض کردند. آن ها رفتار مواد دوغاب را با عناصر حجمی به صورت کشسان کامل مدلسازی کردند [۲۵].



شکل ۲-۲- طرحی از TBM [۲۵]

همانطور که در مطالب گذشته بیان شد، محققان از روش‌های مختلفی برای بررسی روند سخت شدن دوغاب در تونلسازی TBM استفاده کرده‌اند و بسیاری از مدل‌سازان پدیده وابسته به زمان آن را نادیده گرفتند، بنابراین از مرحله اول تزریق، آن‌ها خواص دوغاب را به صورت ماده سخت شده در نظر گرفتند و یا حتی برخی از محققان، فقط فشار تزریق را به عنوان یک فشار دایره‌ای در اطراف تونل حفر شده بدون در نظر گرفتن مشخصات دوغاب، مدل‌سازی کرده‌اند [۲۶].

بنابراین، به طور کلی چند روش برای مدل‌سازی فرآیند تزریق پشت پوشش بتنی وجود دارد. در روش اول، دوغاب ابتدا به صورت مایع شبیه‌سازی می‌شود و با توجه به نرخ پیشرفت TBM و زمان سخت شدن دوغاب، مشخصات دوغاب از حالت مایع به جامد تغییر می‌یابد. به این ترتیب، خصوصیات وابسته به زمان دوغاب که شامل مدول الاستیسیته و ضریب پواسون در حالت جامد و مایع است، به مدل وارد می‌شود. در رویکرد دوم، مواد دوغاب از ابتدای تزریق با ویژگی‌های دوغاب مایع در چند مرحله ابتدایی حفاری در مدل وارد می‌شود و سپس با پیشروی TBM در مراحل بعدی به این مواد خصوصیات مواد جامد داده می‌شود و یا از ابتدای فرآیند تزریق به مواد تزریق خصوصیات مواد جامد را تخصیص می‌دهند.

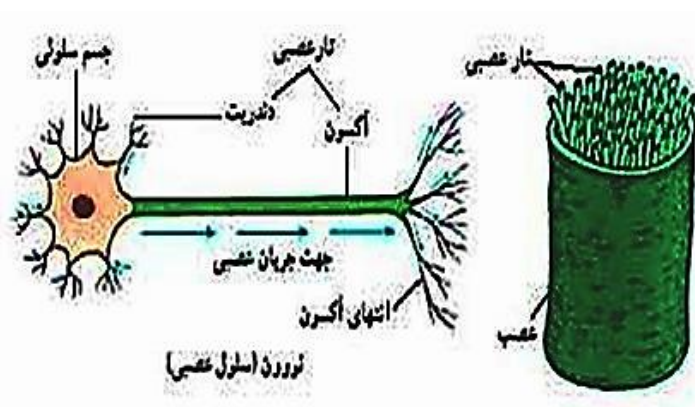
سرانجام در روشی دیگر، صرف نظر از سطح مورد نیاز برای تزریق در هندسه مدلسازی و خصوصیات مواد دوغاب، فقط فشار تزریق به انتهای سپر و پشت بخش‌های نصب شده اعمال می‌شود.

۲-۳- شبکه عصبی مصنوعی

۲-۳-۱- اصول شبکه عصبی

هنگامی که دانش عصب‌شناسی به آن درجه از پیشرفت رسید که دانشمندان بتوانند تا حدودی روش کارکرد مغز انسان و دیگر موجودات را درک کنند و از سوی دیگر کاربرد تخصصی ریاضیات در علوم مهندسی امری عادی و جاری شد، پیشروان این علم به این فکر افتادند که: "آیا می‌توان روش کار مغز را با ریاضیات تقریب زد؟" و برای یافتن پاسخ به شبیه‌سازی سلول‌های عصبی و مغز پرداختند و امروزه دیگر این دانش به بخش جدایی ناپذیر علوم گوناگون به‌ویژه مهندسی کامپیوتر تبدیل شده است.

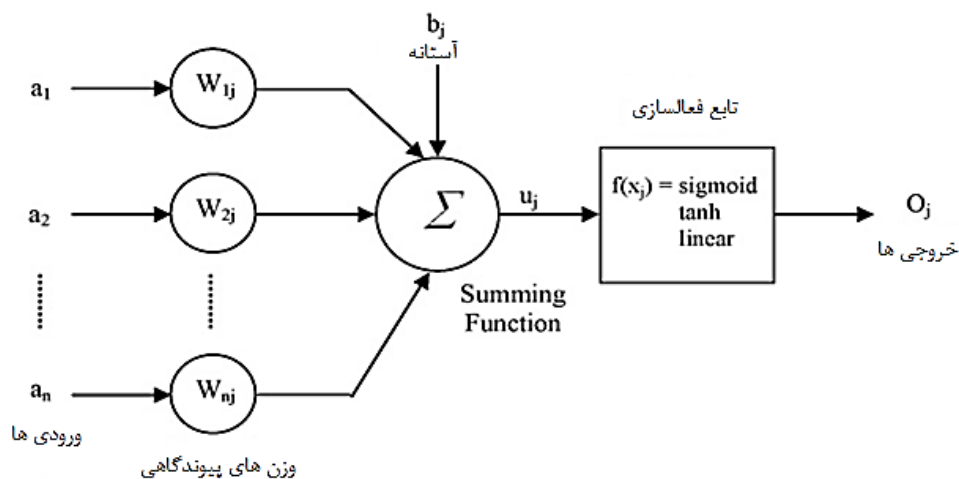
هر نورون طبیعی مطابق شکل (۲-۳) با قطری حدود ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون، دارای بدنه (که به‌عنوان تابع ریاضی مدل می‌شود)، دندریت‌ها (ورودی تابع) و آکسون (خروجی تابع) است. دندریت‌ها در مغز تا چند میلی‌متر و در نخاع تا چند سانتی‌متر طول دارند. روی آکسون قلافی از مایع میلین تولید می‌شود که پوشاننده و عایق کننده است. این عایق‌بندی برای جلوگیری از اتلاف نیروی الکتریکی و افزایش سرعت انتقال انجام گرفته است.



شکل ۲-۳- تصویر یک نورون عصبی [۲۷]

۲-۳-۲- سلول عصبی مصنوعی

سلول‌های عصبی کنونی، پیاده‌سازی برداشت سطحی از مغز هستند. در عمل نورون‌های طبیعی بسیار پیچیده‌تر از آن هستند که با یک یا چند رابطه یا عدد شبیه‌سازی شوند، اما خوشبختانه پیاده‌سازی سخت افزاری و نرم‌افزاری اعصاب هم به سرعت رو به تکامل دارد. شکل (۲-۴) یک شمای کلی از یک نورون ساده مصنوعی بنام پرسپترون^۱ را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۴- اجزای نورون مصنوعی [۲۷]

در این تصویر نورون‌های ورودی با بردار a و ضرایب وزنی با بردار W مشخص شده‌اند و تابع فعالیت بدنه سلول یک جمع‌کننده ساده بصورت زیر است:

$$\sum_{i=1}^n (a_i w_i) \quad (۲-۴)$$

در این حالت خاص ورودی‌های شبکه به صورت دوگانه (۰ یا ۱) هستند. سپس این مقادیر با یک مقدار آستانه سنجیده می‌شود و مقدار مناسب (۰ یا ۱) به خروجی فرستاده می‌شود [۲۷].

¹ Perceptron

۲-۳-۳- شبکه عصبی مصنوعی^۱

شبکه عصبی مصنوعی روشی بر پایه اتصال مجموعه‌ای از نورون‌های عصبی (واحدهای پردازشی) است. شبکه از تعداد دل‌خواهی سلول یا نورون تشکیل می‌شود که مجموعه ورودی را به خروجی ربط می‌دهند. شبکه‌های عصبی مصنوعی روشی برای یادگیری توابع گوناگون نظیر توابع با مقادیر حقیقی، توابع با مقادیر گسسته و توابع با مقادیر برداری می‌باشند. مهم‌ترین عواملی که گونه‌ها و کاربردهای شبکه عصبی را از یکدیگر متمایز می‌سازد عبارت‌اند از : نوع نورون به کارگرفته شده، چیدمان یا معماری شبکه و بازه ورودی / خروجی‌ها.

در معماری یک شبکه تعداد لایه‌ها و اتصالات بین آن‌ها مهم هستند. ورودی‌ترین لایه شبکه به نام (لایه ورودی) و خروجی‌ترین لایه شبکه با نام (لایه خروجی) و لایه یا لایه‌های میان این دو (لایه پنهان) نامیده می‌شود. در صورتی که خروجی نورون‌های هر لایه به همه نورون‌های لایه بعدی وارد شده باشد، اتصالات را کامل می‌نامند، اما اغلب خروجی‌ها بصورت تصادفی با توزیع نرمال در نظر گرفته می‌شود.

از توانایی‌های شبکه عصبی در حل مسایل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

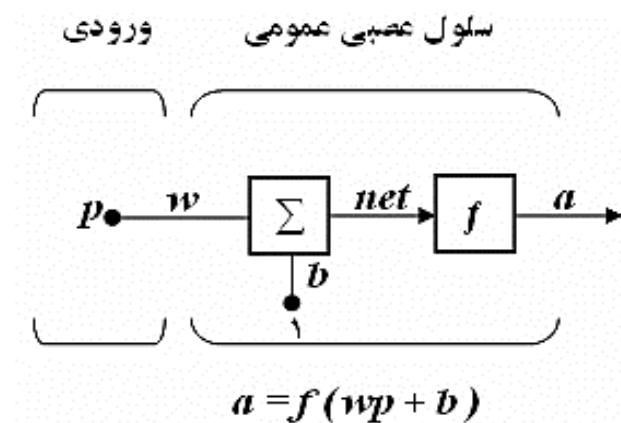
- محاسبه یک تابع معلوم
- تقریب یک تابع ناشناخته
- شناسایی الگو
- پردازش سیگنال
- یادگیری انجام موارد فوق

¹ Artificial Neural Network

مدلسازی با سیستم‌های غیرخطی، مقاوم بودن و تحمل آسیب‌ها، قابل یادگیر بودن (یعنی توانایی تنظیم وزن‌های شبکه)، قابلیت تعمیم، سرعت بالا به دلیل پردازش‌های موازی، قابلیت سازگاری با تغییرات سیستم و غیره از ویژگی‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی هستند [۲۷].

الف) نورون با یک ورودی اسکالر^۱

در شکل (۵-۲) نورون با یک ورودی نمایش داده شده‌است. این نورون ساده از دو عنصر کلیدی وزن W و تابع انتقال f تشکیل شده است.



شکل ۵-۲- شمای کلی یک شبکه عصبی مصنوعی [۲۸]

ورودی p به نورون اعمال شده از طریق ضرب در وزن w ، وزن‌دار می‌شود و حاصل به تابع انتقال f به عنوان ورودی اعمال شده و خروجی نهایی حاصل می‌گردد. با اضافه کردن پیشقدر^۲ به ساختار نورون شکل قبل نورونی پیشقردار به صورت نورون سمت راست ایجاد می‌شود.

ورودی پیشقدر یک مقدار ثابت است. مقدار پیشقدر با حاصل ضرب $w.p$ جمع شده و در واقع تابع را به سمت چپ و یا راست سوق می‌دهد. منظور تابع f تابع انتقال است.

^۱ Scalar

^۲ Bias

ایده اصلی شبکه عصبی این است که با تغییر مقادیر w و b ، شبکه یک رفتار یا تصمیم را اتخاذ کند. پیشقدر یک عامل قابل تنظیم و اختیاری نورون‌ها و نه یک ورودی می باشد [۲۹].

ب) شبکه‌های پرسپترون

یکی از ساده‌ترین انواع شبکه‌های عصبی، شبکه‌های پرسپترون تک لایه می‌باشد که وزن‌ها و پیشقدرهای آن می‌توانند برای تولید یک هدف مشخص متناظر با یک بردار ورودی آموزش داده شوند. قوانین یادگیری مورد استفاده در این راستا (قوانین آموزش پرسپترون) نامیده می‌شوند. شبکه‌های پرسپترون از آن جهت که توانایی خوبی برای تکامل به وسیله بردارهای ورودی دارند بسیار شایان توجه می‌باشند. این شبکه‌ها مخصوصاً در حل مسایل ساده طبقه‌بندی بسیار مناسب می‌باشند. این نوع شبکه عصبی در حل مسایل بسیار سریع و قابل اطمینان است. شبکه پرسپترون محدودیت‌هایی دارد. برای مثال از این شبکه‌ها فقط می‌توان برای طبقه‌بندی ورودی‌های تفکیک‌پذیر خطی استفاده کرد (اگر ورودی‌های به صورت خطی قابل تفکیک باشند حتماً پرسپترون با تعداد محدودی تکرار به جواب خواهد رسید). ورودی‌ها در صورتی قابل تفکیک خطی هستند که بتوان آن‌ها را با یک خط راست از هم جدا نمود. اگر ورودی‌ها تفکیک‌پذیر خطی نباشند فرآیند یادگیری هرگز همگرا نخواهد شد [۳۰].

ج) شبکه‌های پیشخور^۱

شبکه‌های پیشخور اغلب یک یا چند لایه مخفی از نورون‌های غیرخطی می‌باشند و از یک لایه پایانی خطی استفاده می‌کنند. شبکه‌های چند لایه از نورون‌ها با یک تابع انتقال غیرخطی به شبکه اجازه می‌دهد که توانایی یادگیری رابطه خطی و غیرخطی را بین ورودی‌ها و خروجی‌ها داشته باشد. لایه خروجی خطی به شبکه این امکان را می‌دهد که خروجی خارج از محدوده $+1$ و -1 داشته باشد. البته اگر به خروجی مثلاً در محدوده 0 و 1 نیاز باشد می‌توان از تابع لگاریتمی در لایه خطی استفاده کرد [۳۱].

¹ Feed Forward

(د) پس انتشار شبکه عصبی

انتشار رو به عقب خطاها که به اختصار پس انتشار^۱ نامیده می‌شود، الگوریتمی برای یادگیری نظارتی شبکه عصبی با استفاده از گرادیان کاهشی است. در این روش، برای یک شبکه عصبی مصنوعی و تابع خطای مشخص، گرادیان تابع خطا نسبت به وزن‌های شبکه عصبی محاسبه می‌شود. الگوریتم پس انتشار تعمیمی از قانون دلتا برای پرسپترون‌ها به شبکه‌های عصبی پیشخور چندلایه است. واژه پس‌رو یا رو به عقب که بخشی از اصطلاح پس انتشار است، در واقع از این موضوع می‌آید که محاسبه گرادیان به صورت رو به عقب در شبکه انجام می‌شود و گرادیان لایه خروجی وزن‌ها در ابتدا و گرادیان لایه ورودی در آخر انجام می‌شود؛ بدین صورت که از محاسبات مشتق جزئی گرادیان یک لایه برای گرادیان لایه قبلی استفاده می‌شود. این حرکت رو به عقب اطلاعات خطا، منجر به محاسبه کارآمد گرادیان در هر لایه نسبت به حالتی می‌شود که در آن گرادیان لایه‌ها به صورت جداگانه به دست می‌آید. یک شبکه پس‌انتشار دارای پیشقدر، یک لایه با تابع سینوسی و یک لایه خروجی خطی توانایی تخمین زدن هر تابعی با نقاط ناپیوستگی محدود را دارا است. شبکه پس‌انتشار استاندارد، یک الگوریتم با شیب نزولی می‌باشد که در آن وزن‌های شبکه در جهت خلاف تابع کارایی^۲ حرکت می‌کنند. لغت پس‌انتشار به رفتار شبکه در محاسبه شیب در شبکه‌های غیرخطی چند لایه اشاره دارد.

پس انتشار در دهه ۱۹۷۰ به عنوان یک روش بهینه‌سازی عمومی برای انجام مشتق‌گیری خودکار توابع تو در توی مختلط معرفی شد. با این حال، در سال ۱۹۸۶ با انتشار مقاله‌ای از روملهارت^۳ با عنوان «نمایش‌های یادگیری با خطاهای پس انتشار» اهمیت این الگوریتم توسط جامعه یادگیری ماشین مورد توجه قرار گرفت.

¹ Backpropagation

² Performance function

³ Rumelhart

پژوهشگران از مدت‌ها قبل علاقه‌مند بودند راهی برای آموزش شبکه‌های عصبی چندلایه پیدا کنند تا بتواند به طور خودکار «نمایش‌های داخلی» مناسب را به دست آورند (یعنی ویژگی‌هایی که یادگیری را آسان‌تر و دقیق‌تر می‌کنند). این ویژگی‌ها را می‌توان به عنوان ورودی یک گره خاص در نظر گرفت که آن گره را فعال می‌کند (یعنی باعث می‌شود که مقدار مثبت آن نزدیک به ۱ باشد). از آنجا که فعال شدن یک گره به وزن‌ها و پیش‌قدرهای وارد شونده آن بستگی دارد، پژوهشگران می‌گویند اگر وزن‌ها و پیش‌قدرها سبب شوند این گره هنگام حضور این ویژگی در ورودی خود فعال شود، گره ویژگی را آموخته است.

تا دهه ۱۹۸۰، ویژگی‌ها به صورت دستی در بسیاری از زمینه‌ها، به ویژه در بینایی کامپیوتر، تبدیل به استاندارد عملی شده بود، زیرا متخصصان از آزمایش‌ها دریافته بودند که ویژگی‌ها (به عنوان مثال خطوط، حلقه‌ها، لبه‌ها و حباب در بینایی کامپیوتر) یادگیری را ساده‌تر می‌کنند. با وجود این، ویژگی‌های موفق دستی به دانش و تمرین زیادی نیاز داشت و مهم‌تر از آن، از آنجا که خودکار نبود، معمولاً بسیار کند عمل می‌کرد. پس انتشار یکی از نخستین روش‌هایی بود که نشان داد شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند نمایش داخلی مناسب را یاد بگیرند (یعنی لایه‌های پنهان آن‌ها، ویژگی‌های نابديهی و مبهم را یاد بگیرند). متخصصانی که شبکه‌های پیش‌خور چندلایه را با استفاده از پس انتشار آموزش دادند، دریافتند که بسیاری از گره‌ها ویژگی‌ها را شبیه به آنچه توسط متخصصان انسانی طراحی شده است، یاد گرفته‌اند. حتی مهم‌تر از آن، به دلیل کارایی الگوریتم و این واقعیت که متخصصان دیگر نیازی به یافتن ویژگی‌های مناسب نداشتند، پس انتشار این امکان را داد که شبکه‌های عصبی مصنوعی در زمینه‌های بسیار وسیع‌تری که قبل‌تر گرفتار محدودیت‌های زمانی و هزینه‌ای بودند، به کار گرفته شوند.

عموماً برای فرآیند آموزش چهار مرحله وجود دارد:

۱- مهیا کردن داده‌های آموزش

۲- ایجاد شبکه

۳- آموزش شبکه

۴- اعتبارسنجی شبکه با داده‌های جدید

شبکه‌های چند لایه اغلب از تابع لگاریتمی استفاده می‌کنند. این تابع به ازای ورودی $(-\infty, +\infty)$ ورودی بین ۰ و ۱ تولید می‌کنند. گاهی اوقات تابع انتقال تانژانتی در شبکه‌های چند لایه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بعضی موارد نیز از تابع انتقال خطی استفاده می‌شود [۳۲].

۲-۴- واکاوی حساسیت

تحلیل حساسیت به مطالعه تاثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری گفته می‌شود. به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری به صورت سازمان یافته است که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد. فنون تحلیل حساسیت نقش مهمی در مدلسازی توسعه یافته در دو دهه اخیر دارد. بنابراین در مدل‌های ریاضی پیچیده که به عنوان جایگزین مسایل پیچیده فیزیکی، مهندسی، اجتماعی، یا مسایل اقتصادی شده‌اند، ابزارهای تحلیل حساسیت برای واسنجی مدل و تعیین عامل‌های ورودی کلیدی و کنترل‌کننده پاسخ‌های طرح، بسیار مهم هستند.

از جنبه‌های ساخت متامدل قابل اعتماد در فرآیند تونلسازی، سروکار داشتن با پیچیدگی شرایط زمین شناسی، فرآیند ساخت و اندرکنش با سازه‌های موجود است. این پیچیدگی سیستم مستقیماً به مدل عددی منتقل می‌شود. جدول (۱-۲) فهرستی از عامل‌های مدل برای خاک، تزریق، پوشش و TBM می‌باشد. در این جدول نشان داده شده است که برای تونلسازی در خاک همسان حدوداً ۴۰ عامل لازم است، که خاک به تنهایی با ۸ الی ۱۰ عامل توصیف شده است. شرایط واقعی محل با توپوگرافی پیچیده با چندین لایه خاک و تغییرات در فرآیند ساخت مشخص می‌شود. بنابراین، برای موارد تونلسازی واقعی مدل با بیش از ۱۰۰ عامل توصیف می‌شود.

جدول ۱-۲- عامل های مدل برای تونلسازی [۱]

خاک	تزریق	TBM / پوشش / ساختمان	عملیات
چگالی خاک مدل موهر کولمب مدول شکل پذیری زاویه اصطکاک چسبندگی مدل رس و ماسه شیب بارگذاری/باربرداری شیب منحنی نرخ فاصله گذاری شیب سطح تسلیم شیب بحرانی آزمایش سه محوره خصوصیات آب شناسی چگالی نفوذپذیری آب نرخ ورود آب عامل اشباع	دانشیته تزریق مدول شکل پذیری (۲۸ روز) نسبت پواسون (۲۸ روز) نرخ مدول شکل پذیری خصوصیات آب شناسی زمان گیرش تخلخل نفوذپذیری اولیه نفوذپذیری ۲۸ روزه	TBM چگالی فولاد مدول شکل پذیری فولاد نسبت پواسون قطر TBM فضای TBM مخروطی طول TBM بار ماشین پوشش/ساختمان ها چگالی بتن مدول شکل پذیری نسبت پواسون عامل های هندسی	نرخ پیشروی زمان توقف کار بار دنباله / خاک اصطکاک TBM فشار نگهداری گرادیان نگهداری فشار تزریق گرادیان تزریق ارتفاع سطح آب زیرزمینی

بنابراین قبل از ساخت متامدل یک تحلیل حساسیت برای تعیین گروه عامل های مهم و حساس در خروجی هدف از مدل باید انجام گیرد. حساسیت ورودی ها شناسایی شده به بازه عامل های انتخاب شده و هدف از تخمین بستگی دارد. در مورد پروژه تونلسازی، در گزارش های مکانیک خاکی یک بازه قابل قبول از عامل ها که خصوصیات مواد، شرایط آب و خاک، توپوگرافی و غیره را توصیف می کنند وجود دارد که برای تحلیل های حساسیت می توانند استفاده شوند. نتایج این تحلیل ها سپس برای ساخت متامدل براساس عامل های مهم استفاده می شود. روش های واکاوی حساسیت به دو دسته کلی، روش محلی و روش جامع تقسیم بندی می شوند. در روش تحلیل حساسیت محلی معمولاً عامل های مدل را به عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته و هدف از آن ارزیابی تاثیر عدم قطعیت یک عامل ورودی بر عملکرد مدل است. به عبارتی در این روش چگونگی تغییر عملکرد مدل با دور شدن آن از مقادیر بهینه یا مرجع عامل ها بررسی

می‌گردد[۳۳]. روش تحلیل حساسیت جامع، هم عامل‌های مدل و هم اندرکنش این عامل‌ها را با سایر عوامل ورودی مدل در فرآیند شبیه‌سازی در نظر می‌گیرد[۳۴]. از دیدگاه نحوه تفسیر نتایج، روش‌های تحلیل حساسیت جامع به دو دسته کیفی و کمی تقسیم می‌شوند. در روش‌های کیفی یا تصویری، ارزیابی با بررسی بصری پیش‌بینی مدل یا ابزارهای تصویرسازی مخصوص مانند نمودارهای پراکنده یا نقطه‌ای، توزیع پسین عامل‌های ورودی انجام می‌شود. اما در روش‌های کمی هر یک از مولفه‌های ورودی با یک ارزیابی کمی و قابل تکرار از تاثیرات نسبی که معمولاً با شاخص‌های حساسیت اندازه‌گیری می‌شود، مرتبط می‌گردد. از روش‌های تحلیل حساسیت کیفی، روش تاثیر مقدماتی و از روش تحلیل کمی، روش واریانسی را می‌توان نام برد.

۲-۴-۱- واکاوی حساسیت تاثیر مقدماتی Morris

یکی از روش‌های واکاوی حساسیت جامع با تحلیل کیفی، روش تاثیر مقدماتی Morris است. در این روش، ورودی‌ها از لحاظ حساسیت در سه گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: ورودی‌هایی با تاثیرات قابل چشم‌پوشی، ورودی‌ها با تاثیرات خطی بزرگ بدون اندرکنش و ورودی‌هایی با تاثیرات غیرخطی و یا اندرکنش زیاد. استراتژی آزمایش به دو صورت یکی در زمان^۱ و همه در زمان^۲ می‌باشد. در روش همه در زمان (AAT)، بررسی تغییرات در خروجی مدل در حالی انجام می‌گیرد که همه متغیرهای ورودی تغییر می‌کنند و در روش یکی در زمان (OAT) فضای ورودی برای هر متغیر گسسته شده و خروجی مدل برای تغییر هر یک از این عامل‌های ورودی در حالی که بقیه ثابت هستند، بررسی می‌شود[۳۵]. در روش واکاوی حساسیت Morris امکان استفاده از هر دو نوع استراتژی برای انجام آزمایش وجود دارد. برای یک مدل با k عامل ورودی مستقل $X_i (i=1, \dots, k)$ ، با استفاده از روش نمونه‌برداری فرامکعب لاتین، نمونه‌ها در هر واحد مکعب k بعدی با p سطح انتخاب ایجاد می‌شوند. به عبارت دیگر، فضای ورودی به

¹ One At a Time (OAT)

² All At a Time (AAT)

p سطح تقسیم‌بندی می‌شود. برای هر مقدار X تاثیر مقدماتی برای i امین فاکتور ورودی در زامین تکرار به صورت رابطه (۲-۵) محاسبه می‌شود:

$$EE_i^j = \frac{Y(X_1; X_2, \dots, X_j + \Delta, \dots, X_k) - Y(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_k)}{\Delta} \quad (2-5)$$

که p تعداد فواصل Xi و Δ برابر $\left\{ \frac{1}{p-1}, \dots, 1 - \frac{1}{p-1} \right\}$ است [۳۶]. میزان تاثیردهی یک ورودی به خروجی، μ (میانگین) و σ (انحراف استاندارد) است که مطابق رابطه‌های (۲-۶) و (۲-۷) محاسبه می‌شوند.

$$\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n EE_i^j \quad (2-6)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (EE_i^j - \mu_i)^2} \quad (2-7)$$

μ تاثیر همه جانبه عامل ورودی در پاسخ سیستم را تخمین می‌زند. σ تاثیر درجه بالای عامل ورودی یا همان اندرکنش بین عامل‌های ورودی را نشان می‌دهد. کامپولونگو^۱ در سال ۲۰۰۷ پیشنهاد کرد که به جای μ از μ* استفاده شود که تخمین میانگین توزیع از مقادیر مطلق تاثیرات مقدماتی است. استفاده از μ* باعث کاهش خطا در محاسبات تاثیرات مقدماتی می‌شود.

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |EE_i^j| \quad (2-8)$$

¹ Campolongo

که در این رابطه r تعداد طرح‌های استراتژی آزمایش OAT، عدد صحیحی مابین ۴ تا ۱۰ است. بنابراین کل نقاط نمونه برابر با $r \times (k+1)$ خواهد بود [۳۶].

۲-۴-۲- نمونه‌برداری تصادفی

روش‌های نمونه‌گیری نقش خوبی در تحلیل حساسیت مسایلی با تعداد زیادی عامل ورودی دارند. این روش‌ها براساس تقسیم مقدار بازه ورودی‌ها در سطوح مختلف است که اجازه اکتشاف رفتار مدل و شناسایی ورودی‌هایی موثر با تعداد کمی از فراخوان‌های مدل را می‌دهد.

نحوه انتخاب نمونه از فضای توزیع متغیرها به دو دسته احتمالی و غیراحتمالی تقسیم می‌شود. در روش احتمالی انتخاب نمونه از فضای توزیع به صورت تصادفی انجام می‌شود. روش فرامکعب لاتین^۱ نوعی نمونه‌برداری مونت کارلو است که به منظور بازآفرینی توزیع احتمال متغیر ورودی با استفاده از سعی و خطای کمتر و کارایی بیشتر در مقایسه با روش مونت کارلو توسعه یافته است [۳۷]. بدین منظور، دسته‌بندی توزیع احتمال تجمعی ورودی بر روی مقیاس صفر تا یک به فواصل مساوی تقسیم‌بندی می‌شود. سپس، از هر فاصله یا دسته توزیع احتمال تجمعی یک نمونه برداشت می‌شود. در نمونه‌برداری از یک توزیع چند متغیره به روش فرامکعب لاتین، نمونه‌ها از توزیع چند متغیره به نحوی انتخاب می‌شوند که برای هر متغیر حداکثر حاشیه طبقه بندی ایجاد شود. لذا روش فرامکعب لاتین یک روش نمونه‌برداری تصادفی دسته‌بندی شده است که راهی موثر برای نمونه‌برداری از فضای توزیع چند متغیره را فراهم می‌آورد [۳۸].

فرامکعب لاتین (LHS)، یک روش نمونه‌برداری تصادفی طبقه بندی شده است که در آن، نمونه مورد نظر به تعداد n از متغیرهای چندگانه به نحوی انتخاب می‌شوند که نمونه مرتبط با هر یک از متغیرها، از حداکثر طبقه بندی برخوردار باشد. در واقع حداکثر طبقه‌بندی زمانی اتفاق می‌افتد که تعداد طبقه‌ها

¹ Latin Hypercube

برابر با تعداد نمونه‌ها (n) در نظر گرفته شده و احتمال قرار گرفتن نمونه درون هر لایه یا طبقه برابر با معکوس تعداد نمونه کل ($1/n$) باشد. برای استفاده از این روش، ابتدا باید توزیع‌های حاشیه‌ای $X_K, \dots, X_2, X_1$ به n فاصله هم احتمال تقسیم شده، سپس از هر فاصله، نمونه‌ای به تصادف انتخاب شود. الگوریتم زیر مراحل تعیین نمونه با روش فرامکعب لاتین را نشان می‌دهد.

۱- $j=1$ در نظر گرفته شود.

۲- نمونه‌ای به صورت تصادفی از توزیع $U[0,1]$ انتخاب و u_{ij} نام‌گذاری شود. سپس مقدار W_{ij} مطابق رابطه (۲-۹) محاسبه شود.

$$w_{ij} = (u_{ij} + (i - 1))/n \quad (۲-۹)$$

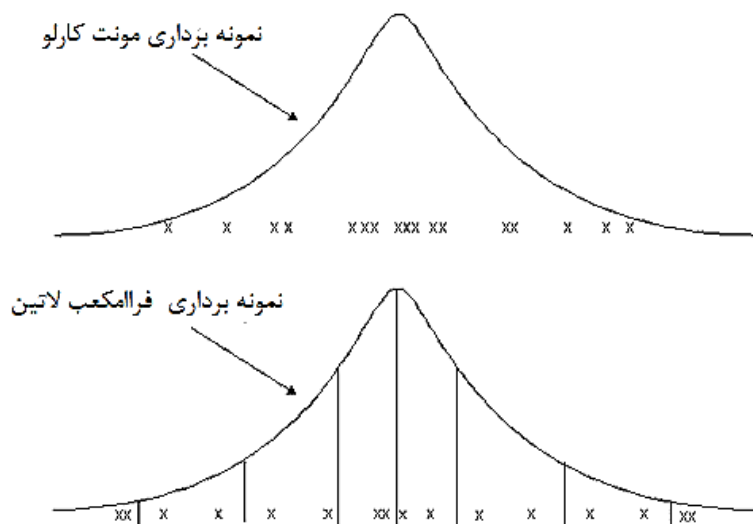
۳- i امین عضو نمونه برای متغیر z ام به صورت $x_{ij} = F_j^{-1}(w_{ij})$ حاصل می‌شود.

۴- $i=j+1$ قرار داده شود و الگوریتم به مرحله ۲ برگردد.

با تکرار این الگوریتم تا مرحله $i, j=k$ امین عضو نمونه، $i=1, \dots, n$ ، از هر یک از متغیرها حاصل می‌شود. سپس با تشکیل k تایی به صورت تصادفی، یک نمونه فرامکعب به تعداد n از k متغیر به دست می‌آید [۳۹].

معمولاً توزیع عامل‌های ژئوتکنیکی به صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود [۱]، که در این تحقیق

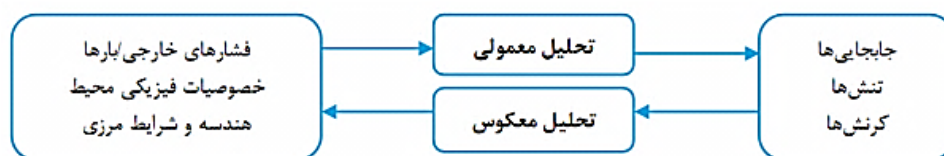
نیز، توزیع عامل‌های ژئوتکنیکی و عملیاتی به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. شکل (۲-۶) مقایسه‌ای از روش نمونه برداری مونت کارلو و فرامکعب لاتین را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶- مقایسه تصویری روش نمونه برداری مونت کارلو و روش فرا مکعب لاتین

۲-۵- واکاوی برگشتی

در تحلیل برگشتی برای مسایل مهندسی خاک و سنگ، شرایط نیرو و بارهای خارجی و خواص مکانیکی، با توجه به تغییر مکان، تنش و کرنش در طی مراحل اجرای پروژه و پس از آن تعیین می‌شود. موارد مهمی که در تحلیل برگشتی مورد بررسی قرار می‌گیرند، تعیین تنش‌های اولیه و خواص رفتاری سنگ و خاک مورد حفاری با توجه به داده‌های حاصل از رفتارنگاری با ابزار دقیق است. رابطه بین تحلیل برگشتی و روش تحلیل عادی را می‌توان در شکل (۲-۸) مشاهده نمود.



شکل ۲-۸- رابطه‌ی بین روش تحلیل عادی و تحلیل برگشتی

در تحلیل برگشتی برخلاف تحلیل عادی، مقادیر به دست آمده یکسان نیستند، به دلیل این که مدل مورد نظر را با توجه به داده پایش، فرض می‌کنند و این امر باعث می‌شود که عامل‌های بدست آمده یکسان نباشند.

کاربرد تحلیل برگشتی در مهندسی مکانیک خاک روز به روز گسترش بیشتری پیدا می کند و به عنوان یک وسیله مناسب برای تحلیل اطلاعات برجا مورد استفاده قرار می گیرد. باید توجه کرد که تحلیل برگشتی یک تکنیک جدید نیست و برای مدت های طولانی در مهندسی مکانیک خاک مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از این تحلیل مقادیر مناسب و ارزشمندی را برای ثوابت مواد و عامل های بارگذاری بدست می دهند. اما اکثرا محاسبه دقیق این عامل ها امکان پذیر نیست و این بخاطر انواع خطاهایی است که در مسایل مهندسی مکانیک خاک وجود دارد. برای غلبه بر این مشکلات باید از یک روش آماری که قادر به در نظر گرفتن این پراکندگی ها است، استفاده شود. مناسب ترین روش برای ارائه نتایج نهایی ارائه متغیرها بصورت متوسط عددی و دامنه آن ها است.

به طور کلی پیشرفت های اخیر در روش های تحلیلی عددی، رابط های سیستم های کامپیوتری با کارایی بالا و فنون خودکار مداوم اندازه گیری محیطی، عامل های پشتیبان اجرای موفق تحلیل بازگشتی در چهارچوب روش مشاهده ای هستند. هرچند، استقبال از تحلیل برگشتی به آن میزان که پیش بینی شده بود نیست. دلایلی برای این مساله وجود دارد:

- مهندسین معدودی هستند که می توانند تحقیقات برجا و اجرای تحلیل برگشتی در کامپیوتر را با هم انجام دهند.
- تحلیل برگشتی در قراردادهای کارهای ساخت تونل جایگاهی ندارد.
- روش های عملی برای کاربرد نتایج تحلیل برگشتی در پشتیبانی طراحی و ساخت تونل هنوز به میزان لازم که مورد موافقت صنایع قرار بگیرد، گسترش نیافته است.

از آنجا که تحلیل برگشتی یک ابزار مهندسی است که می تواند بین اندازه گیری های محیطی، طراحی و ساخت ارتباط برقرار کند، تلاش های آینده برای استفاده بهینه از فن آوری های پیشرفته و برای افزایش میزان درک مفهومی روش تحلیل بازگشتی در کاربردهای فعلی ضروری است. تحلیل برگشتی کلید دسترسی به تونلسازی علمی است و در سال های آینده نیز خواهد بود. از آنجایی که در تحلیل برگشتی

نتایج منحصر بفردی را نمی توان بدست آورد و همواره با محدوده‌ای از نتایج روبه رو هستیم. بنابراین برای به دست آوردن نتایج نزدیک به واقعیت نیاز به توجه بیشتری در مدلسازی است. مدلسازی تا حد ممکن باید دقیق باشد تا رفتار واقعی سنگ و خاک را منعکس کند [۴۰].

۲-۵-۱- شناسایی عامل‌ها

در مسایل ژئوتکنیکی و به خصوص در تونلسازی ماشینی، اطلاعات در فاز طراحی با اکتشاف تعداد محدودی از موقعیت‌ها جمع‌آوری می‌شود. در نتیجه، در طول ساخت، شرایط ژئوتکنیکی ممکن است که با فرضیات اولیه متفاوت باشد. با آگاهی از این واقعیت، میل به کاربرد استراتژی شناسایی عامل معکوس و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مدلسازی ژئوتکنیکی افزایش می‌یابد. مرحله واکاوی برگشتی شامل فرآیندی است که در آن عامل‌های مختلف و فرضیه‌های یک مساله دنباله‌دار، که می‌تواند به صورت عددی بیان شود، تغییر داده می‌شود تا نتایج تجزیه و تحلیل تا حد ممکن با عملکرد پیش بینی شده مطابقت داشته باشد. به طور کلی برای حل مسایل بهینه‌سازی، از تکنیک‌های محلی و کلی استفاده می‌شود.

- روش‌های بهینه‌سازی محلی: این روش‌ها شامل تخمین یک عامل منفرد با در نظر گرفتن قوانین تعیین شده است. این روش‌ها تنها با استفاده از اطلاعات مربوط به مقدار تابع هدف (روش‌های مستقیم) یا با درج اطلاعات مشتق شده (روش‌های مبتنی بر شیب)، جستجو را در فضای عامل انجام می‌دهند.

- روش‌های بهینه‌سازی کلی: این شیوه یافتن بهترین گروه از عامل‌ها برای بهینه‌کردن تابع هدف است. روش‌های کلی شامل جمعیتی از راه حل‌ها با استفاده از هر دو قوانین تعیینی و تصادفی است. ابتدا، رویه‌های کلی به طور گسترده فضای عامل را جستجو می‌کنند و متعاقباً به تدریج در منطقه زیرین که دربردارنده‌ی تابع هدف است، همگرا می‌شوند. بعضی از الگوریتم‌های روش‌های کلی از روش‌های برنامه نویسی پویا، روش‌های شاخه‌ای و مقید، روش‌های بازپردازی و الگوریتم‌های تکامل (ژنتیک) استفاده

می‌کنند. اصطلاح الگوریتم تکاملی یک نام عمومی است که برای هر الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت استفاده می‌شود و از یک سیستم ماشینی برای بهبود راه‌حل‌های اولیه استفاده می‌کند که شامل حل‌های آزمایشی در مساله بهینه‌سازی، برای یافتن افراد از بین جمعیت کلی هستند. در مسایل بهینه‌سازی در مهندسی ژئوتکنیک، الگوریتم‌های تکاملی اغلب به دلیل کاربرد در انواع مختلف زمینه‌ها، کارایی، اجرای ساده و افزایش توانایی‌های محاسباتی در سال‌های اخیر استفاده می‌شوند [۱]. در این جا دو مورد از الگوریتم‌های تکاملی به طور خلاصه معرفی می‌شود.

الف- الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ در سال ۱۹۹۵ برای اولین بار توسط کندی و ابرهارت ارائه گردید. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات اشاره به یک روش نسبتاً جدید جستجوی اکتشافی دارد و مکانیزم آن توسط رفتار گروهی پرندگان که در جستجوی مواد غذایی می‌باشند، الهام گرفته شده است. هر یک از اعضای جمعیت به عنوان یک ذره شناخته می‌شود، که نشان‌دهنده یک راه حل ممکن برای مساله بهینه‌سازی می‌باشد. اساس این الگوریتم بر تکرار جستجو در محیط مساله توسط جمعیت تصادفی می‌باشد که در هر تکرار، تابع شایستگی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس بهترین موقعیت هر پرنده و بهترین موقعیت تمام پرندگان در آن نسل در دو حافظه (بهترین موقعیت محلی، بهترین موقعیت سراسری) قرار می‌گیرند.

روش PSO یک روش سراسری بهینه‌سازی است که با استفاده از آن می‌توان با مسایلی که جواب آن‌ها یک نقطه یا سطح در فضای n بعدی می‌باشد، برخورد نمود. در این چنین فضایی، فرضیاتی مطرح می‌شود و یک سرعت ابتدایی به آن‌ها اختصاص داده می‌شود، همچنین کانال‌های ارتباطی بین ذرات در نظر گرفته می‌شود. سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند، و نتایج حاصل بر مبنای یک «ملاک شایستگی» پس از هر بازه زمانی محاسبه می‌شود. با گذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که دارای

¹ Particle Swarm Optimization

ملاک شایستگی بالاتری هستند و در گروه ارتباطی یکسانی قرار دارند، شتاب می‌گیرند. علی‌رغم اینکه هر روش در محدوده‌ای از مسایل به خوبی کار می‌کند، این روش در حل مسایل بهینه‌سازی پیوسته موفقیت بسیاری از خود نشان داده است.

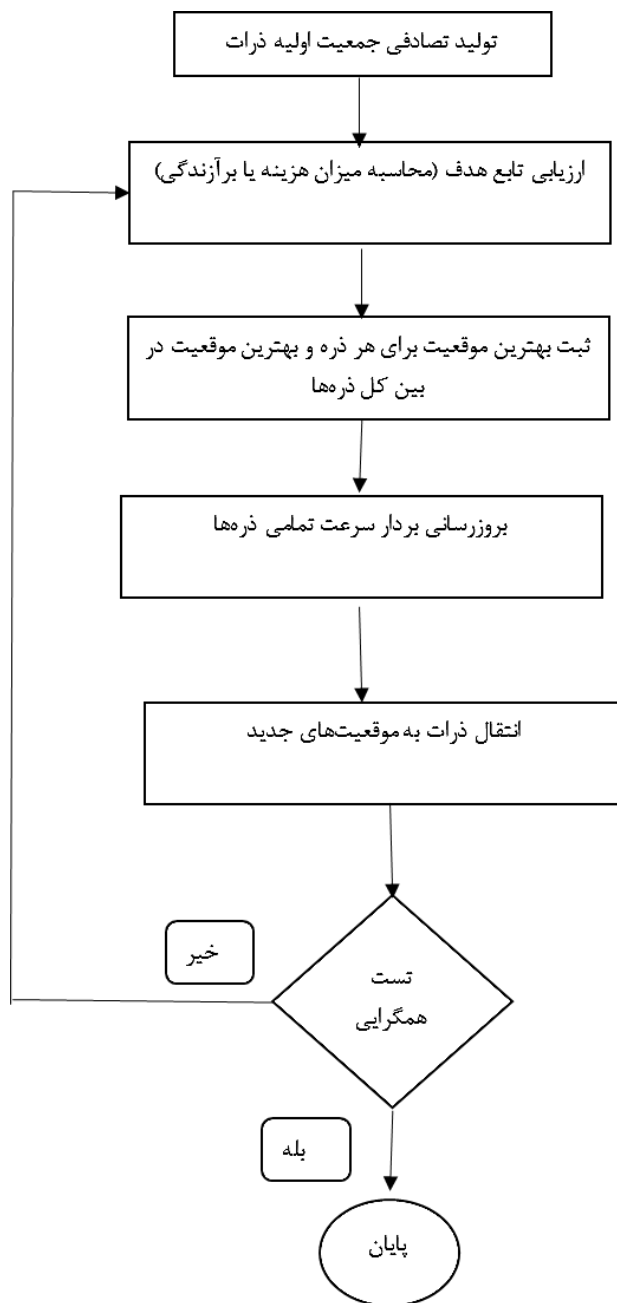
PSO از مزایای بسیاری برخوردار است از جمله اینکه یک الگوریتم سریع و آسان برای درک و اجرا و استفاده از حافظه کم برای محاسبه و داشتن عامل‌های کمی برای تنظیم است [۴۱].

الگوریتم با تولید یک جمعیت تصادفی آغاز می‌شود و سپس با به روزرسانی نسل‌های بعدی مقدار بهینه را جستجو می‌کند. اعضای جامعه (ذرات نامیده می‌شوند) ذرات بهینه فعلی را دنبال می‌کنند و در فضای مساله حرکت می‌کنند. هر ذره متعلق به ازدحام دو ویژگی را توصیف می‌کند: سرعت (v_{ij}) و موقعیت (p_{ij}). هدف از حرکت هر ذره در فضای مساله یافتن بهترین راه حل (عملکرد جسم) و دستیابی به بهترین موقعیت هر ذره است (p_{ij}^B). اگر ذره‌ای در مقایسه با تمامی ذرات ازدحام به بهترین حالت ممکن برسد به این حالت (p_{ij}^G) می‌گویند. کندی و اسپیرسک (۱۹۹۸) وزن اینرسی (w) را به عنوان قانون اساسی بروزرسانی برای کاهش سرعت ذرات هنگام جستجو در فضای بزرگ پیشنهاد کردند. بنابراین موقعیت و سرعت جدید ذرات در هر تکرار با استفاده از رابطه‌های (۲-۱۰) و (۲-۱۱) به روز رسانی می‌شوند:

$$v_{i,j+1} = w_{ij} + cl \cdot m_1(p_{ij}^B - p_{ij}) + sl \cdot m_2(p_{ij}^G - p_{ij}) \quad (2-10)$$

$$p_{i,j+1} = p_{ij} + v_{i,j+1} \quad (2-11)$$

که در آن m_1 و m_2 اعداد تصادفی هستند که به طور یکنواخت در بازه $[0, 1]$ توزیع می‌شوند cl عامل یادگیری شناختی و sl عامل یادگیری اجتماعی است. شکل (۲-۹) مراحل کلی و نحوه عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۹- الگوریتم ازدحام ذرات [۴۱]

ب) الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک فن جستجویی در علم رایانه برای یافتن راه‌حل تقریبی برای بهینه‌سازی و مسایل جستجو است. الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکامل است که از تکنیک‌های

زیست‌شناسی فراگشتی وراثت و جهش استفاده می‌کند. این الگوریتم برای اولین بار توسط جان هنری هالند معرفی شد [۴۲].

در واقع الگوریتم‌های ژنتیک از اصول انتخاب طبیعی داروین برای یافتن رابطه بهینه جهت پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌کنند. الگوریتم‌های ژنتیک اغلب گزینه خوبی برای تکنیک‌های پیش‌بینی بر مبنای رگرسیون هستند. در هوش مصنوعی الگوریتم ژنتیک یک فن برنامه‌نویسی است که از تکامل ژنتیکی به عنوان یک الگوی حل مساله استفاده می‌کند. مساله‌ای که باید حل شود دارای ورودی‌هایی می‌باشد که طی یک فرایند الگوبرداری شده از تکامل ژنتیکی به راه‌حل‌ها تبدیل می‌شود. سپس راه‌حل‌ها بعنوان گزینه‌ها توسط تابع ارزیاب¹ مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و چنانچه شرط خروج مساله فراهم شده باشد الگوریتم خاتمه می‌یابد. الگوریتم ژنتیک بطور کلی یک الگوریتم مبتنی بر تکرار است که اغلب بخش‌های آن به صورت فرایندهای تصادفی انتخاب می‌شوند [۴۲]. ساختار الگوریتم ژنتیک به شرح زیر است:

الف) کروموزوم: رشته یا دنباله‌ای از بیت‌ها که به عنوان شکل کد شده یک جواب ممکن (مناسب یا نامناسب) از مساله مورد نظر می‌باشد، چنانچه از کدگذاری دودویی استفاده شود، هر بیت، یکی از مقادیر صفر و یک را می‌پذیرد. هر کدام از بیت‌های کروموزوم مساله اخیر، یک جواب بالقوه برای متغیرهای مساله می‌باشد [۴۳]. اساس الگوریتم ژنتیک تبدیل هر مجموعه جواب به یک کدینگ است. این کدینگ را اصطلاحاً کروموزوم گویند. در واقع شکل رمز شده جواب محتمل مساله می‌باشد. در این مساله هر کروموزم یک جواب مساله است که می‌تواند موجه و یا غیر موجه می‌باشد.

ب) تابع هدف و برازندگی: تابعی است که مقدار متغیر مساله در آن قرار داده شده، بدین طریق، مطلوبیت هر جواب مشخص می‌گردد. در مسایل بهینه‌سازی تابع هدف به عنوان تابع برازندگی به کار

¹ Fitness Function

می‌رود. تابع هدف جهت تعیین این که افراد چگونه در محدوده مساله ایفای نقش می‌کنند، استفاده می‌شود و تابع برازندگی معمولاً برای تبدیل مقدار تابع هدف به یک مقدار برازندگی وابسته به آن استفاده می‌شود. به عبارت دیگر داریم:

$$F(n) = g(f(x)) \quad (۱۲-۲)$$

به طوری که f تابع هدف بوده و تابع g مقدار تابع هدف را به یک عدد غیر منفی تبدیل می‌کند و F مقدار برازندگی مربوط به آن می‌باشد. مناسب بودن یا نبودن جواب با مقداری که از تابع برازندگی به دست می‌آید سنجیده می‌شود. چون مساله از نوع بهینه‌سازی می‌باشد، تابع برازش با تابع هدف مساله یکسان می‌باشد. تابع هدف مساله، کمینه‌کردن تابع هزینه را مد نظر قرار می‌دهد.

ج) اندازه جمعیت و تعداد تولید: تعداد کروموزوم‌ها را اندازه جمعیت می‌گویند. یکی از مزیت‌های

الگوریتم‌های ژنی نسبت به روش‌های جستجوی سنتی این است که از جستجوی موازی استفاده می‌شود. با تعریف فوق، اندازه جمعیت، اندازه جستجوهای موازی است. در این تحقیق، اندازه جمعیت در آزمایش‌های مختلف بررسی شده و جمعیت از یک نسل به نسل دیگر به منظور یافتن جواب بهتر با استفاده از روش‌های تولید مثل بهبود یافته است. یکی از ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک این است که به جای تمرکز بر روی یک نقطه از فضای جستجو یا یک کروموزوم بر روی جمعیتی از کروموزوم کار می‌کند.

د) عملگرهای ژنتیک: برای پیدا کردن یک نقطه در فضای جستجو باید از عملگرهای ژنتیک

استفاده کرد. دو مورد از این عملگرها عبارتند از:

۱- عملگر تقاطعی^۱: عملگر اصلی جهت تولید کروموزوم های جدید در الگوریتم ژنتیک، عملگر

تقاطع می‌باشد. این عملگر مشابه همتای خودش در طبیعت، افراد جدیدی تولید می‌کند که اجزای (ژن های) آن از والدینش تشکیل می‌شود. انواع مختلف عملگرهای تقاطعی عبارتند از: تک نقطه ای، دو نقطه

¹ Cross over

ای، پخش کننده، میانجی و ابتکاری. برای تعیین عملگر تقاطع مناسب، روش‌های مختلفی همچون تک نقطه‌ای دو نقطه‌ای پخش کننده، میانجی و ابتکاری آزمایش شده است و روش ابتکاری پاسخ مناسب‌تری را ارایه کرده است. روش ابتکاری فرزندی را که خط تماس دو والد قرار گرفته است، در یک فاصله کوچک دور از والد با ارزش برازش بهتر و در مسیری متفاوت از والد با ارزش برازش بدتر برمی‌گرداند.

۲- عملگر جهش^۱: جهش یک فرایند تصادفی است که در آن محتوای یک ژن با ژن دیگر جهت تولید یک ساختار ژنتیک جدید جایگزین می‌شود.

ه) نسل: هر تکرار الگوریتم که منجر به ایجاد یک جمعیت جدید می‌گردد را یک نسل می‌گویند.

روند استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک به صورت زیر می‌باشد:

الف) معرفی جواب‌های مساله به عنوان کروموزوم

ب) معرفی تابع برازندگی

ج) جمع‌آوری اولین جمعیت

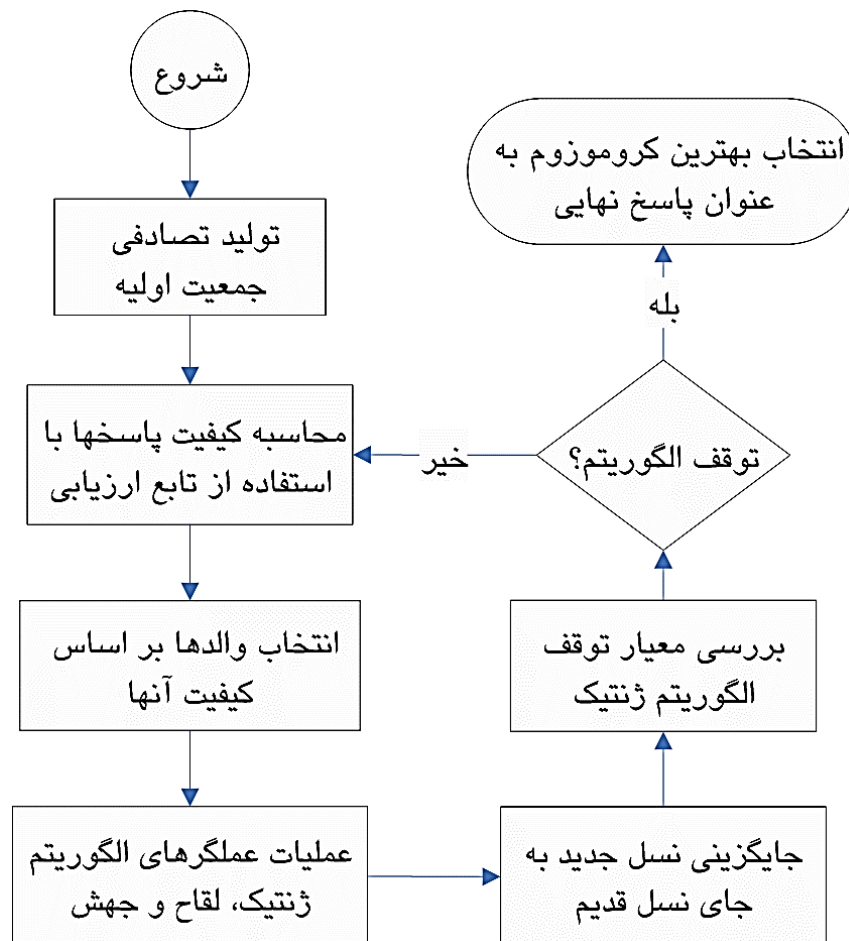
د) معرفی عملگرهای انتخاب

ه) معرفی عملگرهای تولید مثل

در الگوریتم‌های ژنتیک ابتدا به‌طور تصادفی چندین جواب برای مساله تولید می‌شود. این مجموعه جواب را جمعیت اولیه می‌نامند. هر جواب را یک کروموزوم می‌نامند. سپس با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک پس از انتخاب کروموزوم‌های بهتر، کروموزوم‌ها را باهم ترکیب کرده و جهشی در آن‌ها ایجاد می‌کنند. در نهایت نیز جمعیت فعلی را با جمعیت جدیدی که از ترکیب و جهش در کروموزوم‌ها

¹ Mutation

حاصل می‌شود، ترکیب می‌شود [۴۳]. نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک به صورت فلوچارت در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰- الگوریتم ژنتیک [۴۴]

۲-۶- جمع بندی

در این فصل کلیه مراحل و مفاهیمی که در ساختار رساله مورد استفاده قرار گرفته است به صورت تئوری معرفی شده است. در ابتدا هدف از ساخت متا مدل برای تونلسازی ماشینی و شبیه سازی عددی برای آن به اختصار بحث شده است و کلیه مراحل شبیه سازی عددی با استفاده از روش تفاضل محدود در نرم افزار FLAC سه بعدی توضیح داده شده است. در ادامه به بررسی روش تولید متامدل و مراحل ساخت شبکه عصبی و مفاهیم آن پرداخته شده است. واکاوی حساسیت و روش های متوال آن و روش

تأثیر مقدماتی Morris با جزئیات لازم بررسی شده است و در نهایت واکاوی برگشتی و روش‌های بهینه‌سازی (الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک) توضیح داده شده است.

فصل سوم

مروری به مطالعات گذشته

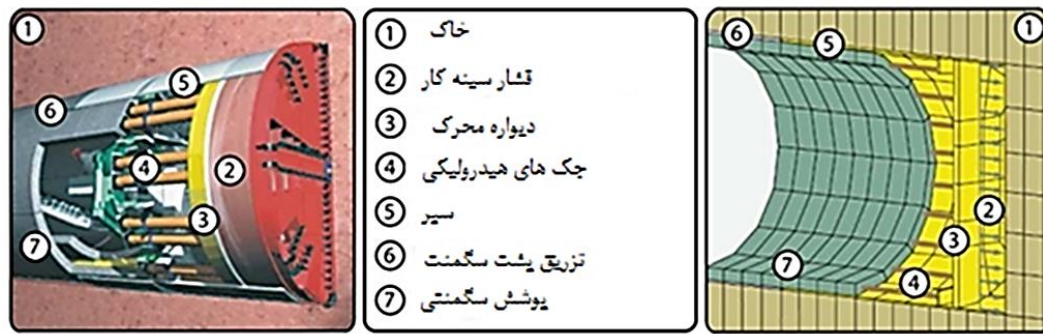
مهندسی تونلسازی یکی از پرکاربردترین سازوکارها در محیط‌های سنگی و خاکی است که در آن روش‌های عددی برای آنالیز تنش، حتی در کارهای عملی نیز پذیرفته شده است. این کاربرد روش عددی به علل مختلف به خصوصیات پیچیده مسایل تونلسازی بستگی دارد. یکی از مهم‌ترین آن‌ها تاثیر شدید حفاری و پروسه ساخت و جزییات عملکردی آن‌ها در توزیع تنش / کرنش سنگ احاطه‌کننده حفاریه و سیستم نگهدارنده آن است. روش‌های عددی یک شکلی از راه‌حل‌های تحلیلی یا روش‌های استاندارد آنالیز تقریب را معرفی می‌کنند. به طور معکوس، مراحل حفاری / ساخت می‌توانند در یک آنالیز عددی با دقت بالا شبیه سازی شوند که فقط با یک فرآیند کامپیوتری پیچیده و سنگین امکان پذیر است. همانطور که گفته شد به منظور استفاده از شبیه سازی عددی در فاز ساخت و در زمان کوتاه نیازمند استفاده از مدل‌های جایگزین یا متا مدل‌ها می‌باشد. در ساخت متامدل از روش‌های مختلفی استفاده شده است. لذا در این فصل مطالعات موردی انجام شده توسط محققین در زمینه مدلسازی عددی فرآیند تونلسازی ماشینی، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی موارد مختلف در زمینه تونلسازی و در نهایت تحقیقات انجام شده در زمینه پیش‌بینی نشست سطحی با استفاده از متا مدل معرفی و بحث شده است.

۲-۲- مطالعات موردی در زمینه شبیه‌سازی عددی در تونلسازی

تونلسازی ماشینی خود به‌تنهایی یک روش اقتصادی و انعطاف‌پذیر می‌باشد که یک فرآیند پویا را دنبال می‌کند، ابعاد سپرها به طور بارزی افزایش می‌یابد و بازه عملیاتی هر ماشین حفاری به طور گسترده‌ای در حال توسعه است. امروزه از رس‌ها تا خاک‌های دانه‌ای، توده سنگ‌های شکسته‌شده تا یکپارچه، از زمین خشک تا اشباع و از بازه کوه‌های آلپ با فشارهای روباره بسیار زیاد تا مناطق شهری حساس با روباره کم کاربرد ماشین‌های حفاری تونل برای هر نوع تغییر در شرایط ژئوتکنیکی گسترش یافته است.

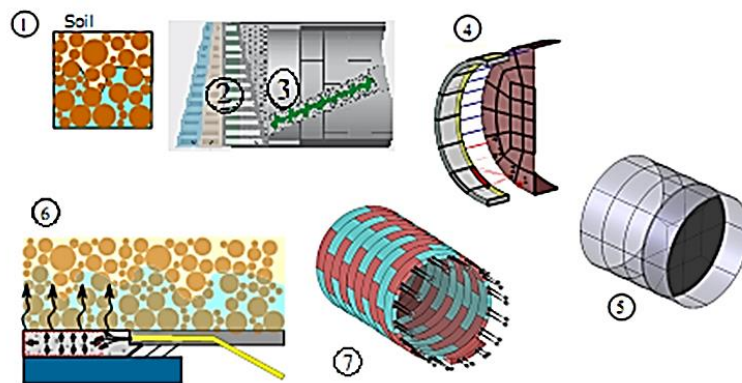
به منظور ایجاد نشست‌های کم و اطمینان از یک فرآیند ساخت مناسب و سالم، تونلسازی ماشینی جدید نیازمند مدل‌های عددی منطقی و قابل اعتماد در طول مراحل طراحی و ساخت می باشد. این مدل‌ها در شرایط محیط‌های سخت ژئوتکنیکی و همچنین شرایط مرزی خاص که پیشروی ماشین در این ساختارها مشکل است، بسیار حیاتی هستند. از ملزومات اولیه یک برنامه عددی قابل اعتماد، ارزیابی صحیح از اندرکنش مابین اجزا موجود در تونلسازی ماشینی، محیط اطراف، زمین و هر سازه‌ای که از قبل در محل موجود است، می باشد. حل این مسایل، نیازمند شکل‌گیری یک تحقیق اساسی در همه جنبه‌های فرآیند تونلسازی ماشینی برای مثال بررسی فشار نگهدارنده سینه کار در سپرهای EPB، سازوکار واقعی مایع تزریق در محیط اطراف تونل، تاثیرات اندازه‌گیری‌ها با توجه به کیفیت پیش‌بینی‌ها، حمایت بی‌درنگ فرآیند تونلسازی با کمک مدل‌های عددی پیوسته، بهینه‌سازی منطقی فرآیند با استحکام پوشش ناپیوسته و تاثیر تزریق بین زمین و پوشش می باشد [۴۵].

شکل (۱-۳) مراحل مختلف شبیه سازی عددی سه بعدی در تونلسازی ماشینی که شامل مدلسازی سپر، خاک اطراف تونل، فشار سینه کار، فشار تزریق و... را نشان می دهد.



(الف)

(ب)

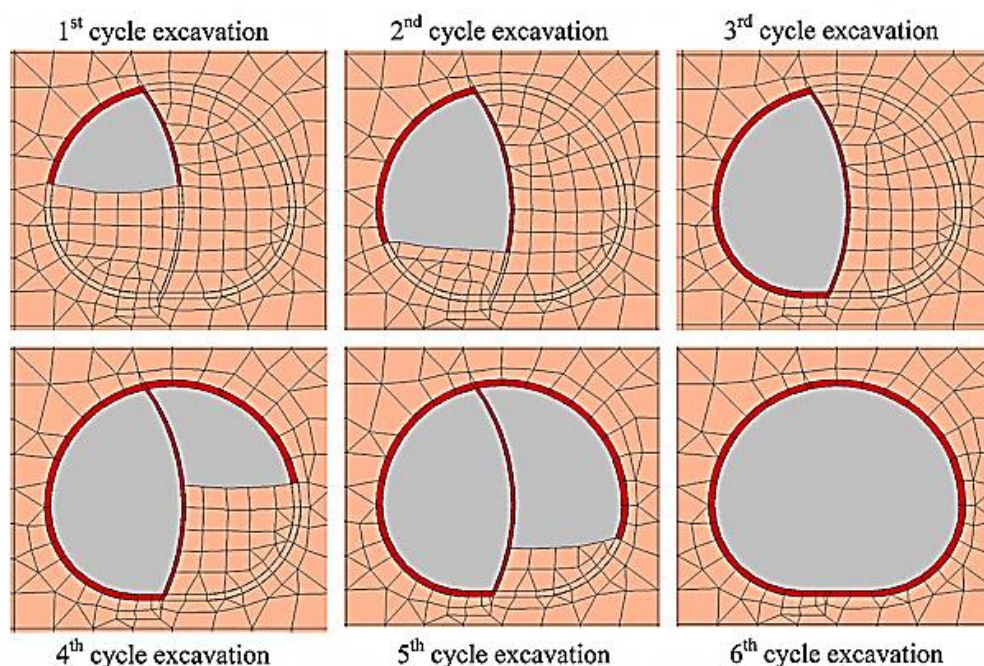


شکل ۳-۱- اجزای مدل شبیه سازی تونلسازی سپری : (الف) توصیف ماشین، (ب) مدل عددی [۴۵]

پیشروی تونل تغییری در شرایط مرزی در مناطق مختلف را ایجاد می کند که نیازمند یک دیدگاه سه بعدی به منظور شبیه سازی صحیح از فرآیند حفاری است. با وجود این تحلیل عددی سه بعدی اغلب نیازمند امکانات کامپیوتری وسیع در هر دو زمینه زمان و ذخیره سازی می باشد. بنابراین حفاری تونل اغلب به صورت دو بعدی مدل می شود.

وقتی که فرآیند تونلسازی به صورت یک مدل کرنش صفحه ای دو بعدی مدل شود، یک سری فرضیات ساده سازی شده باید ایجاد گردد. این فرضیات این امکان را ایجاد می کنند که جابه جایی قبلی زمین اطراف مرزهای تونل، مقدم بر نصب المان های ساختاری، در محاسبات آورده شوند. این فرآیند جابه جایی قبلی شرایط مرزی تونل، فرآیند شرایط مرزی جدید نامیده می شود. یک سری دیدگاه های تعادلی اجازه کنترل فرآیند تجدید شرایط مرزی را می دهد که شامل روش همگرایی - همجواری، روش نرم شوندگی پیش رونده، روش فشردگی، روش کنترل افت حجم، روش فشار تزریق می باشند [۲۱].

در اغلب مطالعات در زمینه حفاری تونل در مناطق شهری به کاربرد این روش‌ها در ارزیابی نشست سطحی تمرکز کرده‌اند. کاراگوش^۱ راه‌های مختلفی را برای تعیین شکل نشست در سطح زمین استفاده کرده است که در آن‌ها تأثیرات سه بعدی مساله به صورت دو بعدی مدل شده است. وی به این نتیجه رسید که روش همگرایی-همجواری به توافق بهتری با نتایج آزمایشگاهی می‌رسد [۴۶]. شکل (۲-۳) توالی حفاری به کار رفته در این مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که می‌توان دید این محقق روش چند مرحله‌ای خاصی برای حفر تمامی مقطع تونل انتخاب کرده‌اند.



شکل ۲-۳- توالی حفاری در مدل عددی المان محدود [۴۶]

مولر و ورمر^۲ براساس نشست توسعه یافته در سطح زمین و نیروهای ساختاری که در پوشش پیوسته ایجاد می‌شود، روش فشار تزریق را پیشنهاد کردند و مزیت‌های آن را با روش‌های همگرایی-همجواری و افت حجم مقایسه کردند [۴۷].

¹ Karakus

² Moller & Vermeer

اندرکنش بین محیط احاطه‌کننده با فضای بسته تونل‌ها با دیدگاه‌های مختلفی مانند آزمایش مدل فیزیکی، مشاهدات صحرایی، روش‌های تحلیلی- تجربی و مدلسازی‌های عددی مطالعه شده است. محققین بسیاری با تحلیل عددی اندرکنش، مسایل تونلسازی را بررسی کرده‌اند. اغلب این مطالعه‌ها به تاثیر شرایط زمین، اندازه‌ی تونل، عمق تونل، بارهای سطحی و موقعیت وابسته تونل در نشست سطحی تمرکز دارند [۴۸-۵۵، ۴۶، ۲۰].

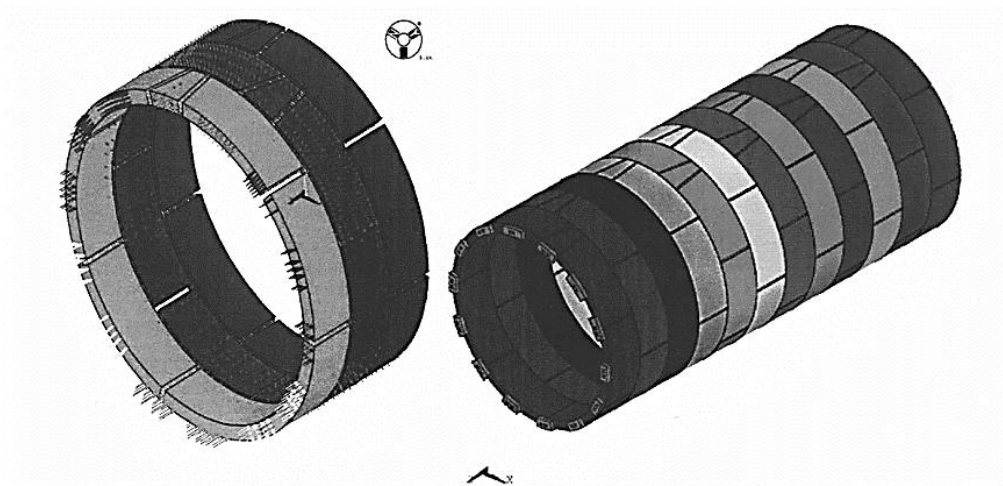
به منظور در نظر گرفتن جنبه‌های اصلی رفتار خاک، مانند تغییر در مدول‌های سختی مطابق تغییر تنش و مدول‌های مختلفی که در طول فازهای بارگذاری و باربرداری وجود دارد، به‌کاربردن ساختارهای پیچیده برای خاک مانند مدل الاستو پلاستیک با کرنش سخت‌شونده ضروری است.

میسین^۱ در تحقیق خود به بررسی تاثیر دو مدل رفتاری مختلف خاک بر روی نشست ناشی از تونل با استفاده از روش آزمایشگاهی و مدلسازی عددی پرداخته است. برای مدلسازی عددی از روش المان محدود و از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است [۵۶].

همچنین حجازی و همکارانش با استفاده از مدل دوبعدی المان محدود به بررسی تاثیر سه نوع مختلف مدل رفتاری خاک و عامل‌هایی مانند ارتفاع روباره در فرآیند تونلسازی پرداخته‌اند [۵۷].

بلوم و همکارانش یک تحلیل المان محدود سه‌بعدی از ساختار تونل با استفاده از نرم افزار Ansys پیشنهاد کردند. این مدل تاثیرات عکس‌العمل زمین، اندرکنش مابین تکه‌های پوشش (شکل ۳-۳)، مواد پرکننده مابین حلقه‌ها، نیروی جک‌ها، تغییر فاز ماده تزریق از یک مایع به جامد و تکه‌های نصب‌شده در یک حلقه را در نظر گرفته‌اند [۲۴].

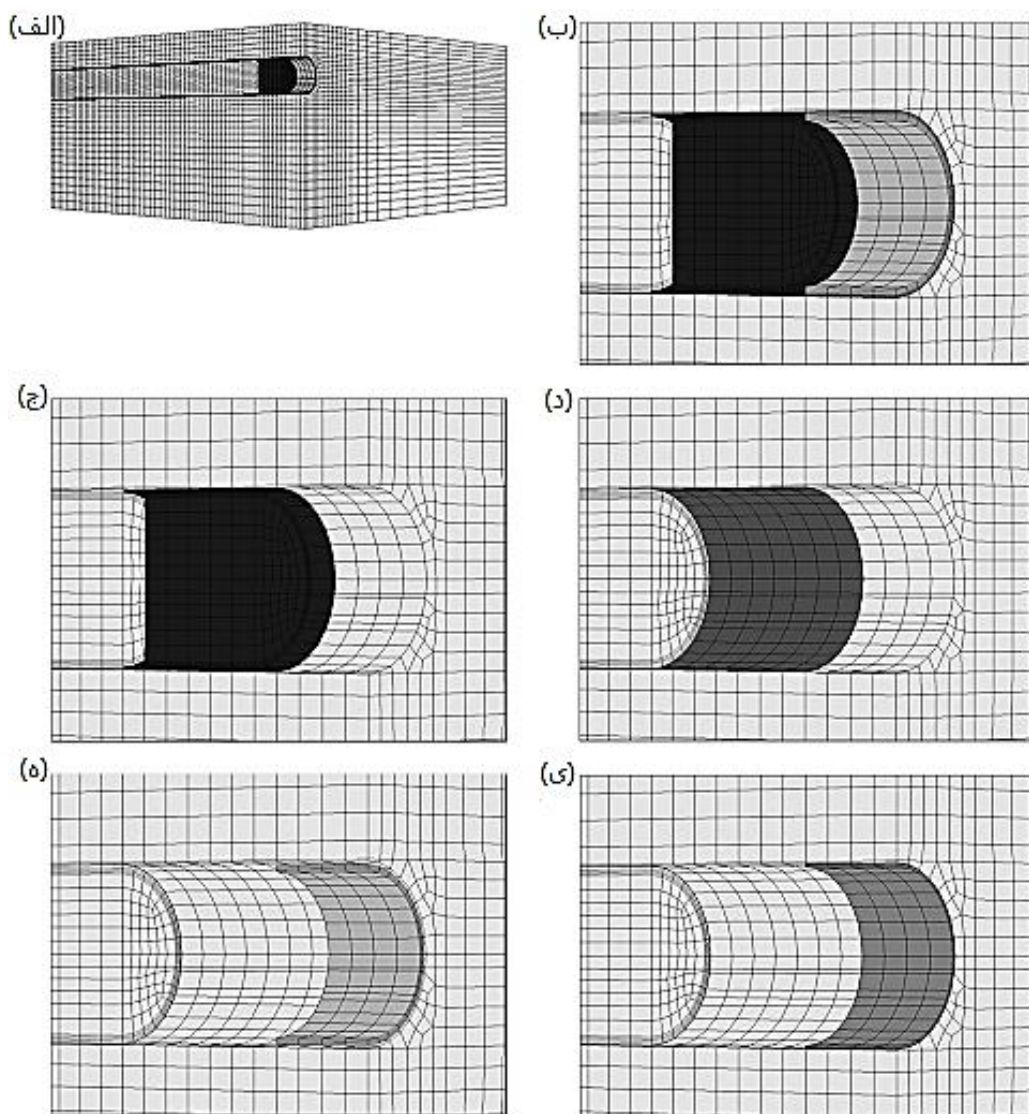
¹ Masin



شکل ۳-۲- مدل سه بعدی تونل با استفاده از نرم افزار Ansys [۲۴]

لامبورگی و همکارانش^۱ (۲۰۱۲) یک مدل سه بعدی با استفاده از کد تفاضل محدود $FLAC^{3D}$ برای حفاری ماشینی با استفاده از نوع فشار تعادلی زمین معرفی کرده اند. مطابق شکل (۳-۴) جنبه های اصلی حفاری ماشینی مانند سپر، پوشش بتنی، نگهداری سینه کار حفاری، بیش حفاری، تزریق پشت دنباله و فرآیند گیرش سیمان تزریق در این مدل مد نظر قرار گرفته است [۱۷].

¹ Lambrughi



شکل ۳-۳ - (الف) ساختار کلی مدل، (ب) دید نزدیک از قسمت مرکزی مدل، (ج) سپر TBM، (د) قسمت بیش حفاری، (ه) پوشش تونل و (و) تزریق [۱۷]

با وجود این، همانند مدل‌های معرفی شده به وسیله کسپر و مسچکه^۱ پوشش تونل با استفاده از

المان‌های پیوسته با چشم‌پوشی از ناپیوستگی‌های موجود در پوشش تونل مدل شده است [۵۸، ۹].

از دیگر واکاوی‌های عددی سه‌بعدی انجام شده برای فرآیند تونلسازی سپری، تحقیق انجام شده

توسط لی و رو^۲ است که در آن از یک مدل الاستو پلاستیک المان محدود برای شبیه‌سازی پیشروی سپر

تونل و نشست زمین وابسته به آن استفاده شده است [۱۸]. بعداً، این مدل برای شبیه‌سازی حفاری تونل

^۱ Casper & Meschke

^۲ Lee and Rowe

تاندیربی^۱ و توزیع نشست سه‌بعدی و جابه‌جایی‌های افقی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی که تطابق خوبی با داده اندازه‌گیری شده دارد، به کار برده شده است. مدل بسیار مناسب برای نشان دادن پیشروی و ساخت تونل، شامل مدلسازی حفاری با استفاده از فنون جدید به‌وسیله کومییا^۲ انجام شده است. این شبیه‌سازی سه‌بعدی المان محدود با استفاده از تحلیل توامان آب و خاک، آشفستگی خاک در مقابل سینه‌کار برش و پیشروی سپر با استفاده از نیروی محوری جک در ماشین تونلسازی سپری را معرفی کرده است [۵۹، ۶۰].

یک نمونه اولیه برای یک فرآیند جهت‌دار سه‌بعدی، مدل المان محدود برای شبیه‌سازی تونل‌های سپری در خاک نرم اشباع به‌وسیله لی و همکاران^۳ پیشنهاد شده است و به طور موفقیت‌آمیزی برای مطالعات عددی نظام‌مند اندرکنش‌های تونلسازی ماشینی استفاده شده است [۶۱]. پیشروی TBM در محیط متخلخل اشباع شده توسط اسووبا و همکارانش^۴ بررسی شده است. این مدل قادر به شبیه‌سازی صریح تحرک و پراکندگی توزیع فشار آب منفذی ناشی از حفاری خاک و اندازه‌گیری نگه‌دارنده به کار رفته، فشارهای تزریق و غیره می‌باشد [۶۲]. دیاس و همکاران^۵ کد تفاضل محدود $FLAC^{3D}$ را با روش صریح برای شبیه‌سازی فرآیند تونلسازی سپری دوغابی در مورد خط مترو کایرو^۶ به کار برده‌اند [۶۳].

چاکری و همکاران نتایج جالبی از تاثیرات خصوصیات مهمی مانند عمق تونل، فشار روباره، ابعاد تونل و فشار سینه کار را با استفاده از روش‌های تجربی، تئوری و عددی برای کنترل نشست سطحی ارایه کردند. آن‌ها نتایج به دست آمده را برای مترو خط ۷ تهران اعتبارسنجی کردند. اغلب عامل‌های درگیر در فرآیند تونلسازی ماشینی شامل فشار سینه‌کار، بار سطحی، تزریق و سپر در این مدل لحاظ شده است. برای مدلسازی عددی از روش تفاضل محدود و نرم افزار $FLAC$ سه‌بعدی استفاده شده است [۶۴].

¹ Thnder Bay

² Komiya

³ Lee et al

⁴ Svoba et al

⁵ Dias et al

⁶ Cairo

دیاس^۱ و همکاران یک مدل سه بعدی از تونل منفرد با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ تهیه کرده اند که در آن رفتار پوشش تونل و جابه جایی زمین اطراف مطالعه شده است. اغلب المان های حفاری ماشینی مانند شرایط اولیه در مرزهای مدل، سپر، فشار سینه کار، فشار حلقوی عمل کننده در سطح خاک در اتاقک پشت سینه کار، فشار تزریق همزمان عمل کننده در سطح خاک و سازه تونل بعد از دنباله سپر در نظر گرفته شده است [۶۵].

مینگ^۲ و همکارانش به منظور پیش بینی نشست بعد از ساخت تونل، روشی بر مبنای درجه آشفته گی خاک و با استفاده از شبیه سازی لایه ای ارایه دادند. براساس داده های تونل ساخته شده در خاک های نرم، مجموعه ای از واکاوی های سه بعدی، آشفته گی خاک بعد از ساخت را بررسی کردند. شبیه سازی عددی در روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار PLAXIS سه بعدی انجام شده است و عامل های خاک، سپر، لاینینگ تونل، سینه کار تونل و دنباله دستگاه حفاری در مدل عددی در نظر گرفته شده است [۶۶].

جالو^۳ و همکارانش (۲۰۱۹) برای بررسی میزان نشست طولانی مدت بعد از ساخت تونل، تاثیر میزان تراکم خاک در انواع خاک ها با رفتار خاک نرم و خاک سخت با مدل های کرنش کوچک در نظر گرفتند. همچنین در این تحقیق تاثیر خزش در میزان نشست طولانی مدت با استفاده از مدل خزش خاک نرم بررسی شده است. مدلسازی عددی در نرم افزار PLAXIS سه بعدی و با روش المان محدود انجام گرفته و اکثر اجزا تونلسازی ماشینی در مدل وارد شده است [۶۷].

۳-۳- نمونه هایی از کاربرد شبکه های عصبی در تونلسازی با TBM

در طول دهه ۱۹۷۰، استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی خیلی محدود بود. مدل های رایج قادر به کاربرد بسیاری از موارد پیشنهاد شده نبودند. تحقیقات با معرفی کار هاپفیلد^۴ آغاز شد. او رابطه بین سیستم های فیزیکی و شبکه عصبی بازگشتی را نشان داد. مدل پرسپترون به وسیله رومبلهارت^۵ پیشنهاد

¹ Dias

² Meng

³ Jallow

⁴ Hopfield

⁵ Rumelhart

شد. نورون‌ها در لایه‌هایی سازماندهی شده بودند که شامل داده ورودی، خروجی، لایه‌های مخفی می‌شدند. شکل‌دهی لایه‌های مخفی بسار مهم هستند چرا که عملیات ریاضی مورد نظر به طور عمده در آن‌ها شکل می‌گیرد. فلا^۱ و کارت^۲ اذعان کردند که شبکه‌های پرسپترون دولایه یک انعطاف‌پذیری بالا برای مدل کردن سیستم‌های پیچیده ایجاد می‌کنند [۶۸].

ساختار تونل با بازه وسیعی از عامل‌ها و همچنین حجم عظیمی از داده‌ها همراه است و تحلیل آن‌ها اغلب یک فرآیند پرزحمت می‌باشد که نیازمند تجربه زیاد است. یک راه‌حل، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در تحلیل داده می‌باشد. تحلیل داده‌های ایزاربندی تونل با استفاده از شبکه عصبی با تحلیل میزان نشست و عامل‌های وابسته به آن در ساختار شبکه عصبی مصنوعی و با استفاده از پرسپترون چندلایه در کارهای انجام شده توسط شی و همکارانش^۳ و سووانساوات و همکاران^۴ دیده می‌شوند [۶۹، ۷۰].

سووانساوات و انیستن^۵ بیان کردند که شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند بهترین راه برای تحلیل داده نشست حتی هنگام مواجه با مسایل پیچیده از قبیل روابط غیرخطی باشند. نتایج به‌دست آمده از شبکه‌های عصبی مصنوعی تطابق زیادی با تجربه‌های عملی دارند. به‌علت داشتن توانایی در ارتباط دادن داده با روابط ناشناخته گذشته، استفاده از آن‌ها برای محققانی که می‌خواهند اندازه‌گیری‌های نشست را به خصوصیات ساختاری مرتبط کنند بسیار جالب است. همچنین آن‌ها این شبکه را برای داده‌های تونل‌های مترو در بانکوک به‌کار بردند که در آن از روش تونلسازی تعادل فشار زمین استفاده شده است. آن‌ها گزارش کردند که چگونه شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تعیین ارتباط بین عامل‌های عملیاتی TBM، خصوصیات توده زمین و جابه‌جایی نشست استفاده می‌شود. این محققین تاکید کردند که یکی از

¹ Flood

² Kartan

³ Shi

⁴ Suwansawat

⁵ Einstein

بزرگترین دشواری‌ها در تحلیل‌ها به‌دست‌آوردن همه عامل‌هایی است که ممکن است با ابزار در ارتباط باشد. بنابراین انجام تحلیل‌های بیشتر برای شناخت محل انجام پروژه و به‌عنوان ابزار مناسبی برای مطالعه رفتار سپر تعادل زمین در تونل‌های کم‌عمق مهم است [۷۰، ۷۱].

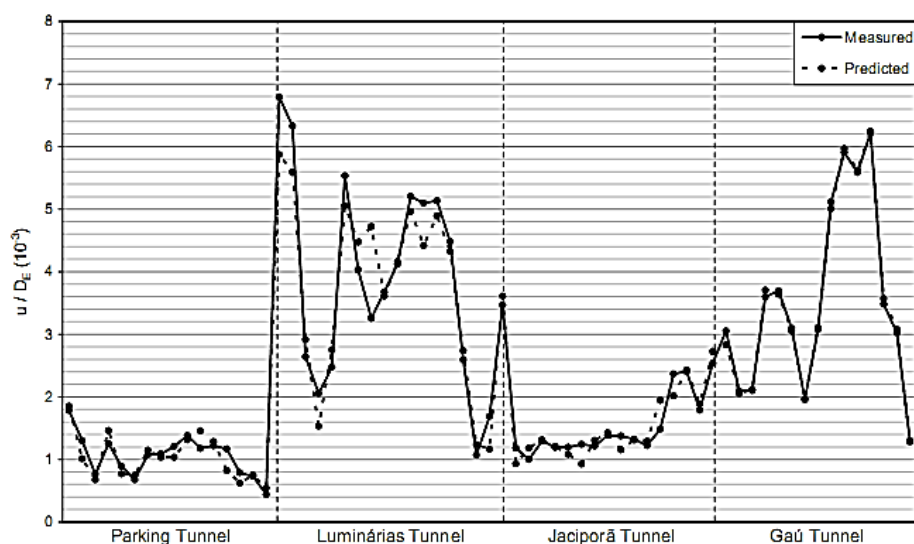
شی و همکارانش شبکه عصبی مصنوعی را با پرسپترون چندلایه برای مطالعه نشست در طول ساخت تونل‌های مترو برزیل استفاده کرده‌اند. هدف اصلی از این تحلیل، پیش‌بینی نشست در آخرین قسمت از حفاری با به‌دست‌آوردن مقادیر از بخش اولیه بوده است [۶۹].

آن^۱ یک مطالعه با استفاده از پرسپترون چندلایه برای تونل مترو در شانگهای را گزارش کرده است. پیش‌بینی توزیع نشست طولی براساس داده‌هایی از بخش‌های گذشته اساس کار او بوده است. عامل‌هایی مانند تعداد لایه‌های داخلی و تعداد نوروها در هر لایه در سیستم الگوریتم ژنتیک برای تعیین بهترین جانمایی استفاده شده است. نتایج بسیار خوبی حتی وقتی تبدیلات واضحی در شکل نشست بوده، به‌دست آمده است [۷۲].

سانتوس و سلستینو^۲ شبکه عصبی مصنوعی را برای بررسی نشست در تونل‌های نگهداری شده با شاتکریت در مترو سانپالو خط ۲ استفاده کرده‌اند. مطابق شکل (۳-۴) شبکه عصبی ابزار خوبی برای پیش‌بینی نشست در بالای تونل‌های حفاری شده با شرایط مشابه بوده است. همچنین تاثیر عامل‌های آموزشی در کیفیت نتایج نیز در این تحقیق بررسی شده است [۷۱].

¹ An

² Santos & Celestino



شکل ۳-۴- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با شبکه عصبی مصنوعی [۷۱]

به دلیل خطای بسیار کم شبکه‌های هوشمند و همچنین دشواری‌های موجود در محاسبه و تخمین نرخ بهره‌وری، نفوذ دستگاه TBM و غیره، استفاده از شبکه‌های هوشمند و به‌ویژه شبکه‌های عصبی رشد قابل توجهی در این زمینه داشته است. یآوری مطالعه‌ای را در رابطه با تخمین نرخ نفوذ دستگاه TBM با استفاده از شبکه‌های هوشمند عصبی و همچنین مقایسه آن با مدل‌های دیگر (به منظور نشان دادن توانایی شبکه عصبی) انجام داده است. عامل‌های ورودی به شبکه عصبی عبارت بود از : نوع سنگ، مقاومت فشاری تک محوره، درصد کوارتز، قطر دیسک، نیروی نفوذ هر دیسک. نتایج حاکی از توانایی زیاد شبکه عصبی در پیش بینی عامل‌های مختلف در این زمینه است. [۷۳].

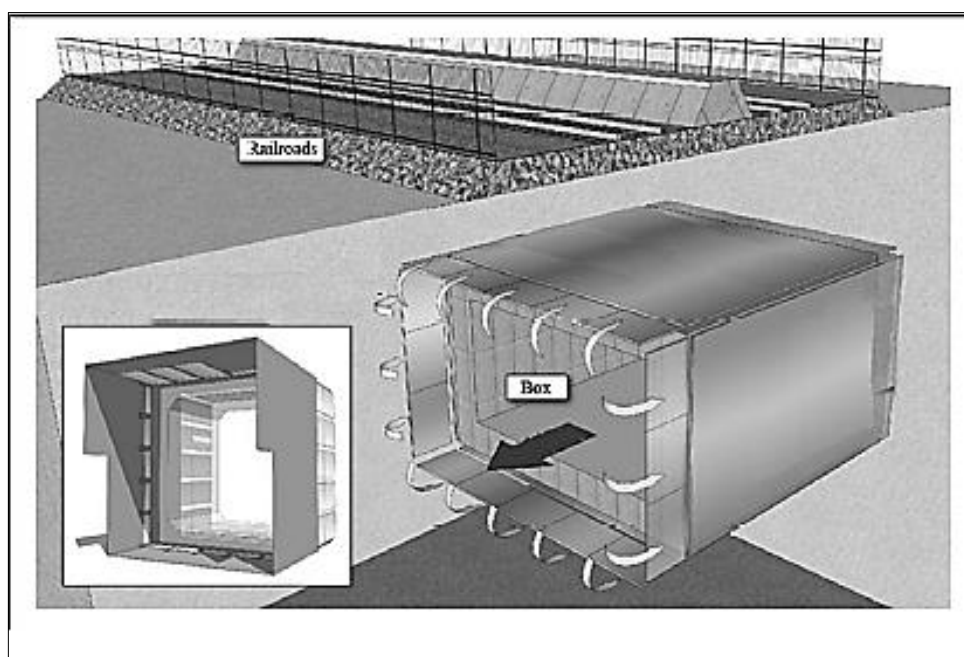
زو و وو^۱ استفاده از نوعی شبکه عصبی چند لایه پرسپترون را در تحلیل نتایج آزمایش‌های صحرایی شرح داده اند [۷۴]. گراول^۲ نیز با استفاده از شبکه عصبی، مقادیر تنش برشی موثر رس‌های سیلتی را بر اساس مقادیر رطوبت و تراکم نسبی پیش‌بینی کرده است [۷۵]. همچنین این روش برای پیش‌بینی رفتار تنش - کرنش ماسه‌ها، شن‌ها، رس‌ها، خاک‌های غیراشباع، ظرفیت باربری شمع‌ها، پتانسیل روانگرایی،

¹ Zho & Wu

² Agrawal

ضریب نفوذپذیری خاک‌های ریزدانه و نشست پی‌های سطحی بر روی خاک‌های دانه‌ای و نشست سدهای سنگریزه‌ای استفاده شده است [۷۶-۸۴].

پارک و همکاران^۱ به پیش بینی میزان نشست سطحی ناشی از نصب سازه جعبه‌ای (شکل ۳-۵) در فرآیند تونلسازی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. برای این منظور از مدل‌سازی عددی دو بعدی المان محدود برای شبیه‌سازی میزان نشست سطحی استفاده کردند [۸۵].



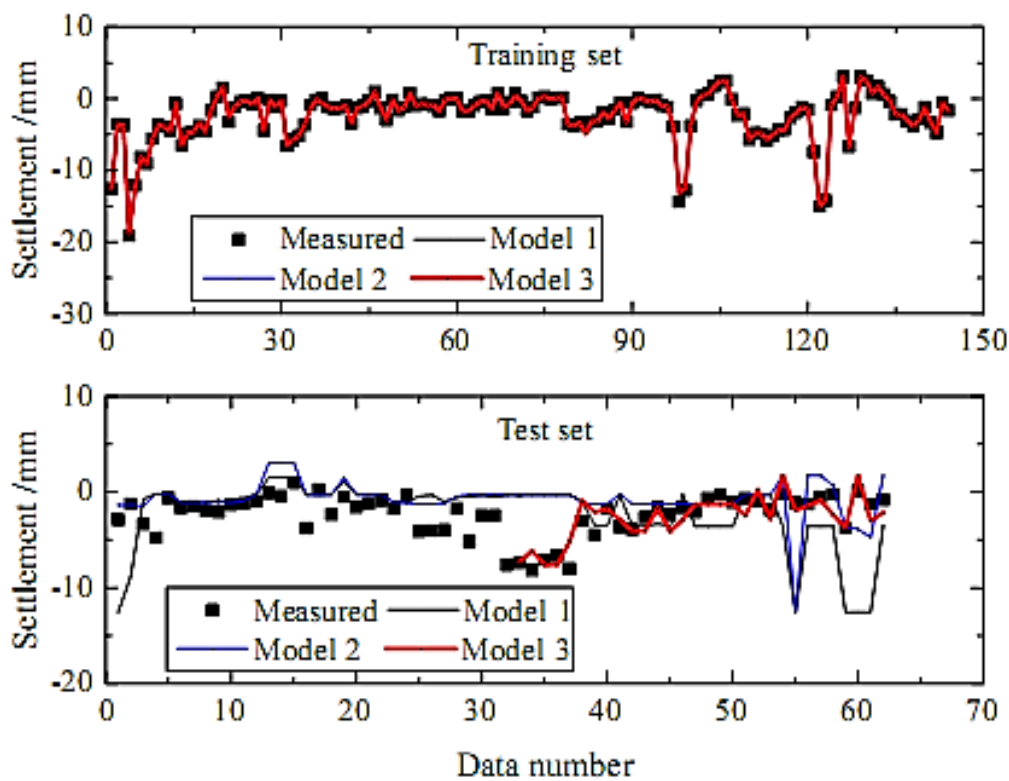
شکل ۳-۵- نصب سازه جعبه‌ای در زیر مسیر راه آهن [۸۵]

چن و همکاران^۲ به بررسی عملکرد سه نوع شبکه عصبی مصنوعی شامل شبکه پس‌انتشار، تابع اساسی دایروی و شبکه عصبی خطی عمومی در پیش بینی نشست سطحی ناشی از تونلسازی ماشینی EPB پرداختند (شکل ۳-۶). به همین منظور از اطلاعات پروژه خط ۴ مترو چانگشا^۳ به عنوان داده برای ساخت شبکه عصبی استفاده کردند [۸۶].

¹ Park et al

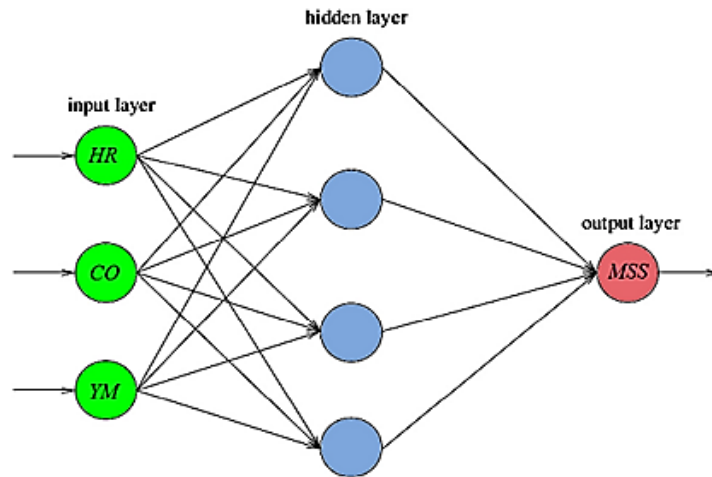
² Chen et al

³ Changsha



شکل ۳-۶- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از سه مدل شبکه عصبی [۸۶]

مقدسی و همکاران شبکه عصبی مصنوعی را با الگوریتم رقابتی امپریالیسم ترکیب کردند و از آن برای پیش‌بینی نشست سطحی بیشینه ناشی از تونلسازی استفاده کردند. برای این منظور در مجموع ۱۴۳ داده شامل نرخ تنش افقی به عمودی، چسبندگی و مدول الاستیسیته به عنوان داده ورودی و نشست سطحی بیشینه به عنوان داده خروجی برای خط ۲ مترو کرج جمع‌آوری و در شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳-۸). نتایج نشان داد که مدل ترکیبی پیشنهادی قابلیت و توانایی بهتری نسبت به شبکه عصبی تنها دارد [۸۷].



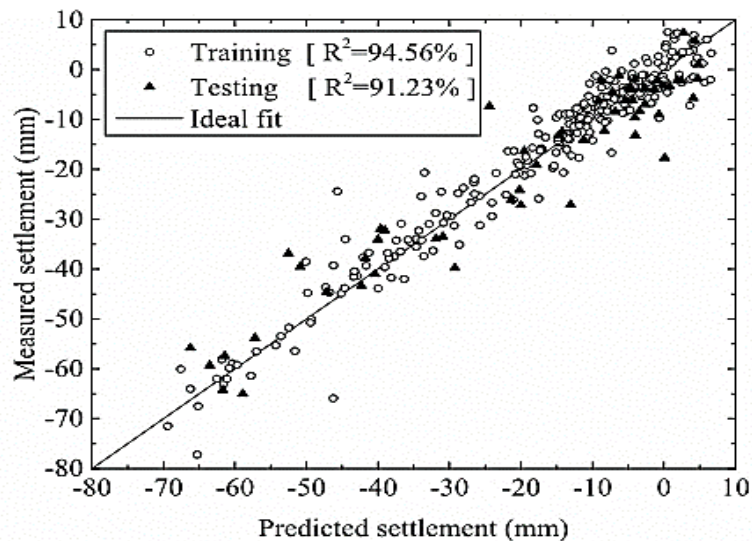
شکل ۳-۷- معماری شبکه عصبی [۸۷]

قیاسی و همکاران به پیش بینی نشست ناشی از تونلسازی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با توجه خاص به تغییرات خصوصیات مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک مقطع تونل پرداختند. در این تحقیق خصوصیات خاک مانند چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب نفوذپذیری و تاثیرات آن‌ها در میزان نشست سطحی بررسی شده است. برای شبیه‌سازی از روش المان محدود و نرم‌افزار ABAQUS دو بعدی استفاده شده است [۸۸].

زانگ^۱ به پیش بینی نشست‌های زمین ناشی از تونلسازی با توسعه مدل ANN جدید که توسط الگوریتم تکاملی متفاوت تغییر یافته است پرداختند. در این تحقیق ابتدا یک مدل شبکه عصبی ترکیبی برای ترکیب الگوریتم تکاملی مختلف در ANN ساخته شده است. سپس از مدل ترکیبی پیشنهادی برای پیش بینی نشست‌های ناشی از تونلسازی سپری استفاده شده است. همچنین اهمیت نسبی عامل‌های ورودی در نشست زمین با استفاده از مدل ترکیبی پیشنهادی بررسی شده است. مدل پیشنهادی برای داده‌های مترو خط ۹ گانگزو^۲ چین مورد استفاده قرار گرفته و مطابق شکل (۳-۸) نتایج خوبی به دست آمده است [۸۹].

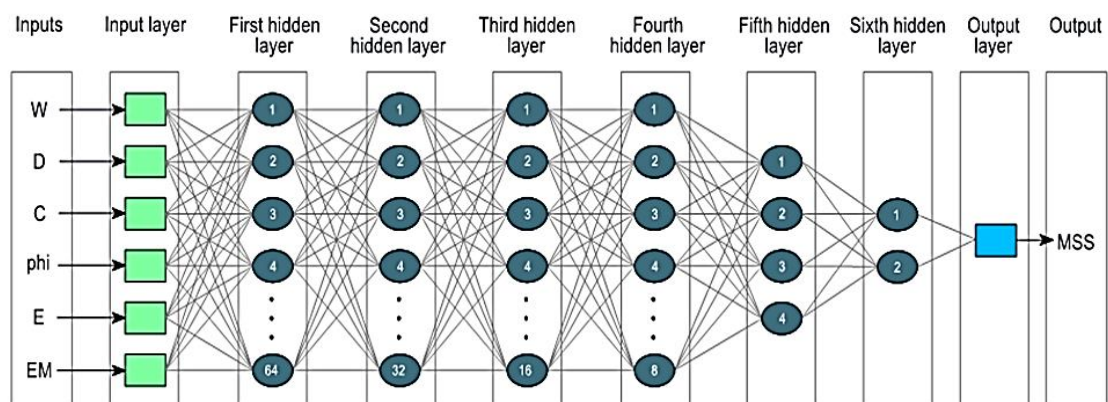
¹ Zhang

² Guangzhou



شکل ۳-۸- مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مرحله آموزش و تربیت شبکه [۸۹]

محمودزاده و همکاران با استفاده از اطلاعات واقعی از ۸ تونل مترو ایران به پیش‌بینی میزان نشست سطحی پرداختند. آن‌ها از ۷ روش هوش مصنوعی از جمله شبکه عصبی، ماشین بردار پشتیبانی، حافظه کوتاه مدت طولی، روش نزدیک‌ترین همسایه، رگرسیون گوسان، رگرسیون بردار ماشین و رگرسیون خطی برای این پیش‌بینی استفاده کردند. مطابق شکل (۳-۹) در این تحقیق تاثیر عامل‌های عرض تونل (W)، عمق تونل (D)، روش حفاری (EM)، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی (Φ) و مدول الاستیسیته (E) در میزان نشست سطحی بیشینه بررسی شده است [۹۰].



شکل ۳-۹- معماری شبکه حافظه کوتاه مدت طولی [۹۰]

۳-۴- مطالعات موردی متامدل‌ها در تونلسازی

مدل‌های کامپیوتری دقیق تونلسازی ماشینی شامل در نظر گرفتن همه اجزا منفرد، رفتار مواد و شبیه‌سازی مراحل ساخت است که نیاز به امکانات کامپیوتری زیادی دارند. حتی وقتی که محتوای برنامه‌های مدرن استفاده شوند، افزایش قابلیت و دقت به وسیله مدل‌های پیچیده سه‌بعدی با تلاش زیادی برای ساخت مدل و هزینه بالای کامپیوتری برای شبیه‌سازی واقعی میسر خواهد بود. اگر مدل‌های شبیه‌سازی عددی به طور مستقیم برای حمایت از فرآیند تونلسازی در حین ساخت استفاده شود، پیش‌بینی بی‌درنگ لازم است که با استفاده هم‌زمان و هم‌سو از متامدل‌های کامپیوتری (جایگزین) امکان پذیر است.

بنا به نیاز آشکار به محاسبه‌ی کامپیوتری سریع، قوی و سازگار با همه مراحل شبیه‌سازی، در ۲۰ سال اخیر شبیه‌سازی براساس متامدل‌ها برای شبیه‌سازی عددی مناسب استفاده شده است [۵، ۶]. متامدل‌ها برای معرفی وابستگی مابین شبیه‌سازی قسمت‌های داخلی و خارجی، یادگیری روابط چندلایه مابین عامل‌های مختلف و رسم آن‌ها برای دستیابی به یک خروجی استفاده شده است. روش‌های مختلفی مانند مدل‌های رگرسیون، شبکه‌های عصبی مصنوعی، توابع اصلی دایره‌ای، کریچینگ یا مدل‌های همبستگی خاص، سطوح پاسخ، مدل‌های تئوری بازی و تجزیه متعامد مناسب برای نمایش فشرده از مدل شبیه‌سازی ایجاد شده است [۹۱-۹۶].

این مدل‌ها برای ساده‌سازی و تفسیر شبیه‌سازی مدل‌ها، حساسیت هدف‌دار و تحلیل نتایج مانند بهینه‌سازی خروجی استفاده می‌شود. چنگ و کوری^۱، نقش فنون مختلف متامدل‌سازی را برای کاربرد در مسایل تونلسازی ماشینی (رگرسیون چند جمله‌ای درجه دوم، کوچکترین مربع حرکات، تجزیه متعامد مناسب با توابع اساسی دایره‌ای و نوع بسط داده شده از دیدگاه اخیر) به طور نظام‌مند ارزیابی کرده‌اند [۹۷].

به دلیل تفاوت اطلاعات در فاز طراحی و فاز ساخت، علاقه به کاربرد فنون معکوس شناسایی عامل و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مدل‌سازی ژئوتکنیکی به منظور اصلاح خصوصیات واقعی و عامل‌های مدل در مراحل ساخت بیشتر شده است. در دهه ۱۹۸۰، تحلیل برگشتی برای شناسایی عامل‌های ژئوتکنیکی از

¹ Cheng & Currie

توده سنگ مشاهده شده در اندازه گیری های برجا با ارجاع خاص به پروژه تونلسازی استفاده شده است [۹۸]. جینز و همکارانش^۱ (۱۹۹۶) راه حل احتمالاتی برای مساله تحلیل برگشتی با یک کاربرد در حفاری تونل در رس بیش تحکیم را پیشنهاد کرده اند که در آن از مدل المان محدود برای تحلیل پیش رو استفاده کرده اند [۹۹]. مییر و چانز^۲ (۲۰۱۵) یک مطالعه فشرده در کاربرد روش های متفاوت تحلیل برگشتی از عامل های ژئوتکنیکی را انجام داده اند [۴].

مسایل بهینه سازی می تواند با استفاده از هردو فن بهینه سازی کلی و موضعی حل شوند. تکنیک های بهینه سازی محلی، تحقیق مستقیم یا نزولی به طور عمده در مسایل ژئوتکنیکی برای یافتن مستقیم یا تکراری عامل های ورودی به منظور هم خوانی اندازه گیری ها با خروجی شبیه سازی استفاده شده است. با وجود این، معایب این روش ها این است که آن ها نیازمند توابع با شکل هموار خطا^۳ با کمترین مقدار هستند که برخی می توانند فقط برای تحلیل برگشتی تعداد محدودی از عامل ها (دو یا سه) با تاثیر مهم در مقادیر محاسبه شده استفاده شوند [۱۰۰]. برای غلبه بر این مشکل کالولو و فینو^۴ (۲۰۰۴) استفاده از تحلیل حساسیت را برای تشخیص یک گروه از این عامل های مهم پیشنهاد کردند [۱۲].

برای غلبه بر محدودیت های مذکور در روش های بهینه سازی محلی، در سال های اخیر الگوریتم های بهینه سازی کلی به طور گسترده در مهندسی ژئوتکنیک استفاده شده است. در میان بسیاری از روش های در دسترس برای بهینه سازی کلی، الگوریتم های فوق ابتکاری، الگوریتم ژنتیک و استراتژی تکاملی و هوش جمعی (توده ای) برای مسایل ژئوتکنیکی استفاده شده است.

سانگ^۵ و همکاران به منظور بهبود دقت و سرعت شناسایی خصوصیات سنگ محیط اطراف تونل، از واکاوی برگشتی داده جابه جایی و تنش ابرازبندی با یک الگوریتم ترکیبی استفاده کردند. ماشین یادگیری به همراه محاسبه تخمین تفاضلی برای این منظور به کار گرفته شده است. برای ساخت نمونه های آموزش و

¹ Gens

² Meier & Schanz

³ Smooth-shaped error

⁴ Calvello & Finno

⁵ Song et al

تربیت ماشین یادگیری از شبیه سازی عددی استفاده شده است. سپس، رابطه غیرخطی مابین عامل های سنگ و جابه جایی با شبیه سازی عددی ایجاد و سرانجام، عامل های ژئوفیزیکی به وسیله تخمین تفاضلی و در نظر گرفتن داده های ابزاربندی به دست آمده است. در این تحقیق تمامی مراحل فوق برای تونل بزرگراه شهر فوسونگ انجام شده است و نتایج خوبی از افزایش سرعت و دقت در واکاوی برگشتی ایجاد شده است [۱۰۱].

وو^۱ و همکاران یک الگوریتم بهینه سازی اصلاح شده برای واکاوی برگشتی خصوصیات توامان تنش – تراوش ارائه دادند. این نوع مسایل بیشتر در پروژه های تونل آبرسانی مطرح می باشد. برای واکاوی برگشتی از ابزار بهینه سازی لونبرگ مارکوردت^۲ با روش تفاضل متغیر استفاده شده است. روش فوق برای داده های تونل واقعی امتحان و تطابق خوبی بین نتایج و داده های واقعی به دست آمده است [۱۰۲].

به طور کلی شبیه سازی المان محدود در تونلسازی ماشینی با داده های غیرقطعی بسیار زمان بر می باشد. در مورد شبیه سازی هدایت TBM با در نظر گرفتن داده با عدم قطعیت، یک نتیجه سریع بی درنگ از شبیه سازی فرآیند نیاز است [۸]. در این مورد، مدل های عددی جایگزین (متا مدل) با کارایی بالا برای توصیف وابستگی مابین عدم قطعیت عامل های ژئوتکنیکی و فرآیند تونلسازی و تطابق پاسخ نامطمئن مانند نشست سطحی، لازم است. دیدگاه های مختلفی برای ساخت مدل های جایگزین توسعه یافته است. شبکه عصبی مصنوعی به طور گسترده در مهندسی استفاده شده است. کاربرد شبکه عصبی در متامدل به جای مدل های شبیه سازی تعیینی درون تحلیل های تصادفی در کارهای انجام شده توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است [۱۰۳-۱۰۵].

خالدی و همکارانش یک شبکه تجزیه متعامد- تابع اولیه دایره ای^۳ را به عنوان متامدل برای شبیه سازی تونلسازی ماشینی استفاده کرده اند. در این کار تحقیقاتی چهار دیدگاه برای متامدل شامل روش های پاسخ

¹ Wu et al

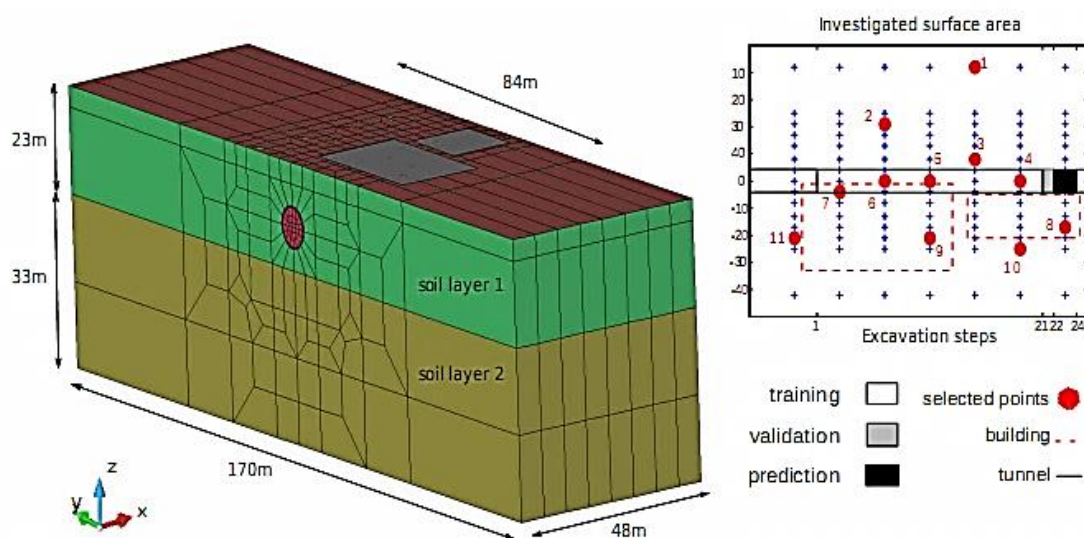
² Levenberg - Marquardt

³ POD-RBF

سطح، کمترین مربع حرکات، تجزیه متعامد- تابع اولیه دایره‌ای و تقریب همسایه با در نظر گرفتن روش‌های نمونه‌برداری و اندازه‌ی نمونه بررسی شده‌اند. هدف از این کار یافتن فن قابل اعتماد و قوی به منظور ساخت یک تابع سه‌بعدی تقریب برای شبیه‌سازی عددی می‌باشد. به همین منظور یک مطالعه عددی با نرم افزار Plaxis سه‌بعدی انجام شده است. بررسی‌های مقایسه‌ای در حوضه اندازه نمونه و روش نمونه‌برداری نشان داد که روش تجزیه متعامد- تابع اولیه‌ی دایره‌ای یک دیدگاه دقیق‌تر و قابل اعتمادتر در زمینه متامدل برای تونلسازی ماشینی در بین چهار روش مورد بررسی بوده است [۱۰۶].

کائو و همکارانش^۱ برای شبیه‌سازی بی‌درنگ با داده فاصله‌دار، دو استراتژی مدل‌سازی جایگزین تجزیه متعامد و شبکه عصبی را برای دستیابی به مدل شبیه‌سازی ساختاری مناسب ترکیب کرده‌اند. این متامدل در مدل شبیه‌سازی المان محدود برای تونلسازی سپری با در نظر گرفتن تمام اجزا موجود در فرآیند ساخت به کار برده شده است (شکل ۳-۱۰). در این تحقیق فن مدل‌سازی جایگزین براساس ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و تجزیه متعامد پیشنهاد شده است که قادر به تخمین بی‌درنگ در حین تونلسازی ماشینی می‌باشد. دیدگاه پیشنهاد شده یک کار توسعه یافته از طرح اولیه‌ای بوده است که محقق با استفاده از تابع اولیه دایره‌ای گسترده و تجزیه متعامد تکراری انجام داده است. اثبات شده است که این کاربرد بهبود یافته می‌تواند مدل جایگزین قدرتمندی باشد. اگرچه مدل دارای رابطه‌های پیچیده و فرایند تکرار زیادی است، ولی این مدل جایگزین یک پیش‌بینی در زمان منطقی در حوضه کاربردی تونلسازی ماشینی ایجاد می‌کند. در عمل، مدل جایگزین ترکیبی تجزیه متعامد- تابع دایره‌ای متعامد نتایج پیش‌بینی بهتری در زمینه کاربردی ارائه شده ایجاد کرده است. دیدگاه جدید در یک نرم‌افزار جمع‌آوری شده است که به صورت بی‌درنگ نشست ناشی از عامل‌های عملیاتی مختلف که توسط کاربر انتخاب می‌شود، را تهیه می‌کند. نرم‌افزار پیشرفته با ایجاد یک دیدگاه برای مهندسی تونل در حوزه ساخت، با انتخاب عامل‌های مناسب می‌تواند از ایجاد نشست‌های غیر مجاز در مراحل حفاری آینده ممانعت نماید [۶۸].

¹ Cao



شکل ۳-۱۰- شبیه‌سازی عددی از مقطع تونل و بررسی سطحی پروژه [۱۰۷]

فریتگ و همکارانش^۱ یک دیدگاه ترکیبی از شبکه عصبی و تجزیه متعامد برای متامدل را که قادر به پیش‌بینی نشست کامل در زمان - مکان باشد را ارائه دادند. این مدل جایگزین ترکیبی برای تحلیل‌های قابل اعتماد با عامل‌های مکانیک خاکی و عملیاتی تونلسازی نامطمئن به کار رفته است. شبکه‌های عصبی مصنوعی برای برون‌یابی نشست‌های سطحی در نقاط انتخاب شده به کار رفته است. در حالی که تجزیه متعامد برای ساخت حوضه‌های نشست سطحی متقابل برای عامل‌های مختلف عملیاتی تونل و مکانیک خاکی به کار رفته است. این کاربرد درون تحلیل‌های تکراری، تصادفی و تصادفی-تکراری قابل اعتماد با در نظر گرفتن عامل‌های ژئوتکنیکی و عملیاتی تونل شرح داده شده است. ثابت شده است که فرآیند پیشنهاد شده برای ساخت مدل‌های جایگزین به وسیله ترکیب دو فن موازی برای درون‌یابی و برون‌یابی متغیرهای موجود قادر به پیش‌بینی نشست در طول پیشروی تونل به طور کارآمد می‌باشد. بنابراین اساسی برای پیشرفت‌های آینده در تحلیل‌های قابل اعتماد بی‌درنگ در تونلسازی ماشینی، برای تصمیم‌گیری در هدایت و نگهداری، پیش‌بینی بازه فشارهای تزریق ممکن برای مراحل بیشتر تونلسازی را می‌سازد. وضعیت‌های محدود با پیچیدگی‌های بیشتر می‌تواند به وسیله محاسبه مدل‌های ریسک خسارت برای ساختمان‌های

¹ Freitag

موجود تخمین زده شوند. استراتژی ترکیبی همچنین به ما اجازه رسیدگی به داده پایش برای تطابق و به روزرسانی مدل های جایگزین را می دهد [۱۰۷].

نینیچ و مسچکه^۱ برای ساخت متامدل، از شبکه عصبی مصنوعی همراه با بهینه سازی ازدحام ذرات^۲ استفاده کرده اند. هدف از این کار به روزرسانی مدل مطابق داده پایش به دست آمده در طول ساخت و بهینه سازی عامل های ماشین به منظور نگه داشتن نشست سطحی در زیر بازه مورد قبول بوده است. این عملیات شامل دو مرحله می باشد: ۱- روش کارآمد برای به هنگام رسانی مدل کامپیوتری تونلسازی ماشینی مطابق داده پایش به دست آمده در طی مراحل ساخت و ۲- تحلیل برگشتی از عامل های عملیاتی بهینه مطابق با حدود تعیین شده برای نشست های هدف. برای این منظور متامدل ها پاسخی در زمانی حدود چند ثانیه برای نگهداری همراه هدایت در طول فرآیند ساخت با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری جهت دار المان محدود برای تونلسازی ماشینی ایجاد می کند. اگرچه این مدل المان محدود در مرحله طراحی برای آموزش متامدل براساس اطلاعات در دسترس از شرایط ژئوتکنیکی استفاده شده است. برای انتخاب مهم ترین عامل ها تحلیل حساسیت انجام شده است. در مرحله بعد برای ساخت متامدل بازخوانی شبکه عصبی مصنوعی به کار رفته است. در آخر با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات انتخاب عامل های بهینه ژئوتکنیکی و عملیاتی انجام شده است. روش عددی انتخاب شده نشان داد که پیش بینی مقدار زمانی- مکانی از نشست ها حتی برای شرایط ژئوتکنیکی پیچیده با دو لایه خاک، با قابلیت اعتماد بالا براساس شبیه سازی - شبکه عصبی مصنوعی ممکن است. از مزایای این روش انجام فرآیند شناسایی عامل در زمانی در حدود چند ثانیه با کامپیوتری استاندارد می باشد بنابراین برای تصمیم گیری در حین هدایت و ساخت تونل وسیله مناسبی می باشد. باید توجه شود که این روش پیشنهاد شده بر اساس عدم تغییر ناگهانی شرایط خاک هنگام پیشروی ماشین حفاری از یک مرحله به مرحله بعدی حفاری می باشد. بنابه زمان محاسباتی کم مورد نیاز برای تعیین عامل های عملیاتی، روش پیشنهادی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ها در عامل های خاک در

¹ Ninic & Meschke

² PSO

سینه‌کار تونل بسیار مناسب می باشد. این کار اجازه تهیه یک بازه مناسب از عامل‌های عملیاتی به‌جای مقدار تعیینی به‌دست‌آمده از روش‌های تعیینی را می‌دهد[۲].

زنگ و همکارانش یک رویکرد ترکیبی با استفاده از روش طراحی یکنواخت و تابع اساسی دایروی در شبکه عصبی برای توسعه رابطه مابین نشست و عوامل تأثیرگذار در آن ارائه کرده‌اند. این رابطه به عنوان ابزاری برای تنظیم عامل‌های دستگاه حفاری شامل فشار سینه‌کار و تزریق استفاده شده است. آن‌ها عملکرد این متا مدل را با روش ماشین بردار پشتیبان مقایسه کردند. همچنین در این تحقیق برای بهینه‌سازی عامل‌های ماشین بردار پشتیبان الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده از داده‌های خط ۳ مترو چانگشا که از زیر خط ۱ مترو عبور می‌کند استفاده شده است. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد خوب متامدل پیشنهادی در کنترل نشست و ایجاد ایمنی در فرآیند تونلسازی دارد[۱۰۸]. در جدول (۲-۲) خلاصه‌ای از مطالعات موردی در زمینه کاربرد متا مدل در تونلسازی ماشینی آورده شده است.

جدول ۲-۲- مطالعات موردی استفاده از متامدل در تونلسازی ماشینی

نام محقق و سال تحقیق	عنوان تحقیق	توضیحات
۱-خالدی و همکارانش (۲۰۱۴) [۱۰۶]	کاربرد فن متامدل‌سازی برای شبیه‌سازی در تونل‌سازی ماشینی	از متا مدل ترکیبی POD- RBF استفاده کردند. برای شبیه‌سازی از نرم افزار PLAX 3D و روش المان محدود استفاده کرده است. در این کار تحقیقاتی چهار دیدگاه برای متامدل شامل روش‌های پاسخ سطح، کم‌ترین مربع حرکات، POD- RBF و تقریب همسایه با در نظر گرفتن روش‌های نمونه‌برداری و اندازه نمونه بررسی شدند که روش POD-RBF یک دیدگاه دقیق‌تر و قابل اعتمادتر در زمینه متامدل برای تونلسازی ماشینی در بین چهار روش مورد بررسی به‌دست آمد.
۲-فریتگ و همکارانش (۲۰۱۵) [۱۰۷]	مدلسازی جایگزین برای پیش‌بینی بی‌درنگ از فرآیند تونلسازی مکانیزه با داده فاصله دار	از متامدل ترکیبی POD-RNN استفاده کردند که قادر به پیش‌بینی نشست زمانی و مکانی می‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده برای

پیش‌بینی به نتایج خوبی رسیده و برای پیش‌بینی نشست از طریق درون یابی و برون‌یابی بسیار کارآمد می‌باشد.		
از متامدل ترکیبی RNN و GPOD استفاده کردند. اثبات شده است که روش بهینه‌سازی استفاده شده در زمان منطقی نتیجه مطلوب می‌دهد. از ایرادهای این روش پیچیدگی فرمول‌ها و لزوم فرآیند تکرار زیاد می‌باشد..	مدل جایگزین RNN-GPOD ترکیبی برای پیش‌بینی بی‌درنگ نشست در تونلسازی ماشینی	۳- کائو و همکارانش (۲۰۱۶) [۶۸]
از متامدل ترکیبی PSO- ANN استفاده کردند . این تحقیق شامل دو مرحله می‌باشد: ۱- روش کارآمد برای به‌هنگام‌رسانی مدل کامپیوتری تونلسازی مکانیزه مطابق داده پایش به‌دست آمده در طی مراحل ساخت و ۲- تحلیل برگشتی از پارامترهای عملیاتی بهینه مطابق با حدود تعیین شده برای نشست‌های هدف که روش پیشنهادی در این تحقیق بنابه زمان محاسباتی کم موردنیاز برای تعیین پارامترهای عملیاتی و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در پارامترهای خاک در سینه‌کار تونل بسیار مناسب می‌باشد.	به‌هنگام‌رسانی مدل و هدایت بی‌درنگ ماشین حفاری تونل با استفاده از شبیه‌سازی براساس متامدل‌ها	۴- نینچ و مسچکه (۲۰۱۷) [۲]
از متامدل شبکه عصبی (تابع دایروی اساسی و طراحی یکنواخت) برای کنترل نشست با در نظر گرفتن عامل‌های فشار سینه‌کار و فشار تزریق استفاده کردند.	متا مدل مناسب برای کنترل ایمنی تونل مترو در حین ساخت تونل زیرگذر	۵- زنگ و همکارانش (۲۰۱۸) [۱۰۸]

۳-۵- جمع بندی

در این فصل تحقیقات و مطالعات علمی که در زمینه مطالب ارائه شده در رساله انجام شده است، به طور خلاصه معرفی و توضیح داده شده است. در ابتدا کارهای علمی که در زمینه مدلسازی عددی تونلسازی ماشینی توسط محققین مختلف انجام شده و همچنین روش استفاده برای مدلسازی و عامل‌های مدل شده بررسی شده است. کاربرد روش‌های هوشمند مانند شبکه عصبی و الگوریتم‌های بهینه سازی در تونلسازی ماشینی و به خصوص پیش‌بینی نشست سطحی حداکثر توسط محققین در بخش بعدی آمده است. استفاده

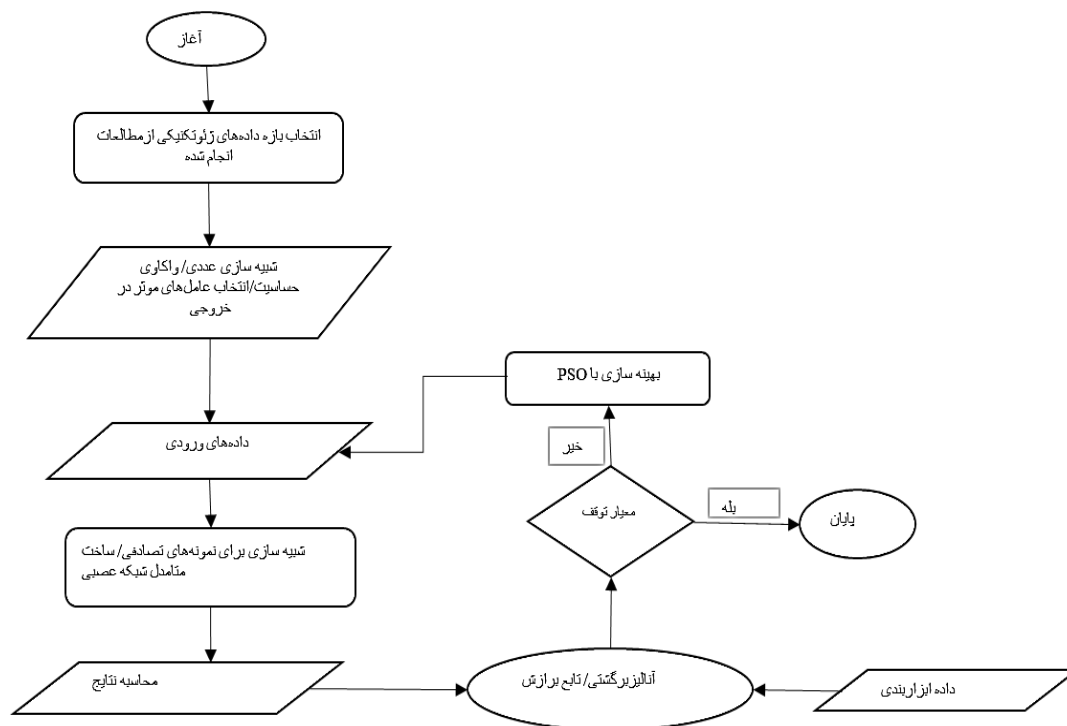
از متامدل با روش‌های مختلف توسط محققین و نوع استفاده آن‌ها با توضیحات مربوطه به عنوان بخش پایانی در فصل مربوطه گنجانده شده است.

فصل چهارم

پیش‌بینی نشست سطحی به روش متا مدل (مطالعات
موردی خط ۷ مترو تهران و خط ۲ مترو تبریز)

۴-۱- مطالعه موردی ۱: خط ۷ مترو تهران

در این قسمت از تحقیق از یک مثال ساده در حجم کوچک‌تر برای کاربرد متامدل مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی برای پیش‌بینی نشست سطحی حداکثر در پروژه خط ۷ مترو تهران در فرآیند تونلسازی ماشینی با ماشین حفاری EPB استفاده شده است. هدف از انجام آن کنترل تمامی کدهای آماده شده برای تولید داده تصادفی، واکاوی حساسیت، شبکه عصبی، الگوریتم بهینه‌سازی و تکرار اتوماتیک شبیه‌سازی‌ها می‌باشد. به منظور واکاوی حساسیت و شناسایی عامل‌های مهم و موثر در نتایج شبیه‌سازی (که در این تحقیق نشست سطحی حداکثر است) از روش واکاوی حساسیت جامع Morris استفاده شده است. تاکنون تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده برای ساخت متامدل در زمینه تونلسازی ماشینی به روش المان محدود و با استفاده از نرم افزارهای ekate و Plaxis می‌باشند [۲، ۱۰۶، ۱۰۷، ۱۰۹]. از این‌رو در تحقیق حاضر از روش تفاضل محدود و نرم‌افزار شناخته‌شده $FLAC^{3D}$ به منظور شبیه‌سازی عددی استفاده شد تا عملکرد این روش عددی در صحت پیش‌بینی مولفه‌ی پاسخ (نشست سطحی) و کاربرد متامدل بررسی شود. به طور کلی مراحل انجام این تحقیق به صورت الگوریتم زیر می‌باشد که در شکل (۴-۱) ارائه شده است:

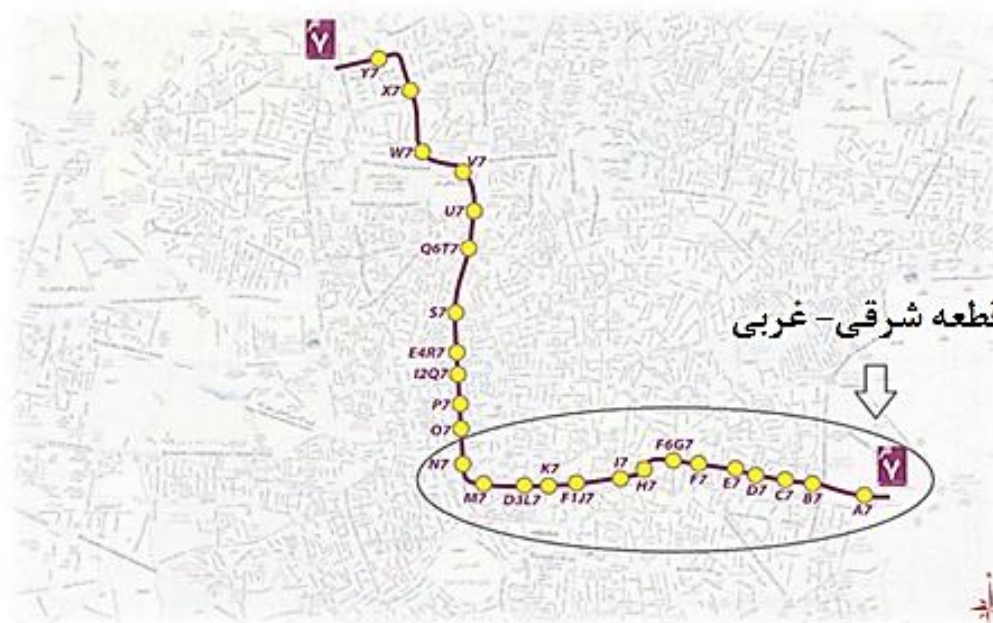


شکل ۴-۱- مراحل انجام تحقیق

۴-۱-۱- معرفی خصوصیات پروژه

خط ۷ متروی تهران از خطوط چندگانه طراحی شده برای تهران است که مطابق شکل (۴-۲) به دو قطعه‌ی شمالی- جنوبی و شرقی- غربی تقسیم شده است. تحقیق حاضر مربوط به بخش شرقی- غربی است. این مسیر از تونل در طولی به اندازه ۱۲ کیلومتر و با استفاده از دستگاه حفاری به روش تعادلی فشار زمین به قطر ۹/۱۶۴ متر حفاری شده است. پوشش نهایی تونل به صورت سگمنت‌هایی با ضخامت ۳۵ سانتی متر می‌باشد. رسوبات آبرفتی تهران در مسیر متروی خط ۷، بیش‌تر شامل ترکیبی از رسوبات ریزدانه، شن و ماسه و قلوه سنگ است. در مجموع از شرق به غرب رسوبات دانه‌ریزتر می‌شوند، به طوری که در قسمت‌های غربی مسیر تونل، لایه‌های ریزی توسعه‌ی بیش‌تری دارد. در طی مطالعات فاز اول، تعداد ۱۵ گمانه و چاهک اکتشافی بر روی بخش شرقی- غربی حفر شده است و در مرحله تکمیلی ۱۳ گمانه و ۵ چاهک بر روی مسیر تونل و ۳۳ گمانه و ۸ چاهک در محل ایستگاه‌ها اضافه شده است. براساس مطالعات آبشناسی، جهت جریان آب‌های زیرزمینی در محدوده‌ی مسیر تونل، از شمال

شرق به جنوب غرب است. با توجه به متوسط سطح آب اندازه‌گیری شده در گمانه‌ها، ۳۵ درصد مسیر تونل بالاتر از سطح ایستابی است و در حدود ۶۵ درصد از مسیر تونل در زیر سطح ایستابی قرار گرفته است [۱۱۰]. در این تحقیق کیلومتر ۱۰+۵۰۰ برای مدلسازی و پیش‌بینی نشست به روش متا مدل انتخاب شده است.



شکل ۴-۲- نقشه خط ۷ مترو تهران

۴-۱-۲- مدلسازی عددی

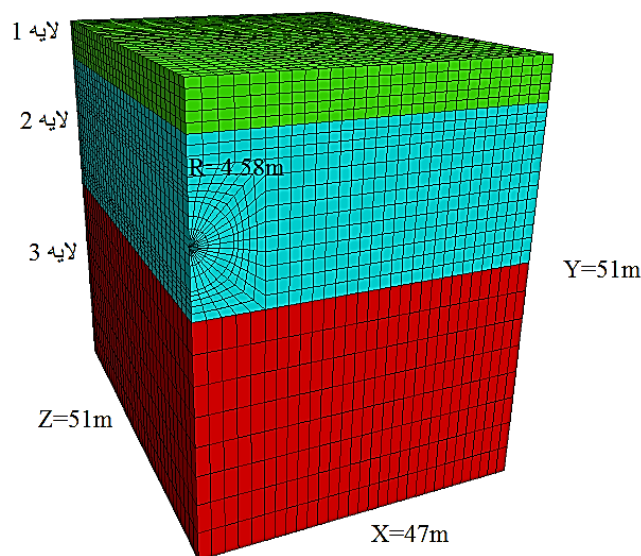
برای مدلسازی عددی در این تحقیق از روش تفاضل محدود با نرم افزار $FLAC^{3D}$ استفاده شده است. بعضی ساده‌سازی‌ها و فرضیات از جمله در نظر گرفتن خاک محدوده تونل به صورت همگن و همسان در مدل منظور شده است. برای خاک اطراف، مدل رفتاری موهر کلمب و برای سگمنت‌ها رفتار الاستیک در نظر گرفته شده است. مسیر تونل به صورت سه لایه و با خصوصیات ذکر شده در جدول (۴-۱) به مدل معرفی شده است.

جدول ۴- ۱- خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک [۱۱۲]

لایه ها	نوع خاک	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	ضخامت (متر)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۱	CL, ML	۰/۳۵	۳۵	۱/۷	۵	۳۱	۲۸
۲	SW-SC	۰/۳۱	۸۵	۱/۸۶	۱۹	۲۵	۳۵
۳	SL	۰/۳۲	۷۰	۱/۹	۲۷	۳۰	۲۸

برای مدلسازی عددی، ابتدا هندسه مدل تعریف شد و سپس خصوصیات مرزی و اولیه به مدل اعمال گردید. ابعاد مدل به صورت نشان داده شده در شکل (۳-۴) است که براساس ابعاد پیشنهادی روتریگرز می‌باشد، که این ابعاد به ترتیب برابر است با طول مدل بیش از مجموع روباره و سه برابر قطر تونل، ارتفاع مدل بیش از مجموع روباره و چهار برابر قطر تونل و عرض مدل بیش از سه برابر ارتفاع روباره است [۱۷].

نسبت تنش افقی به تنش قائم با استفاده از رابطه (۲-۱) محاسبه و در مدل اعمال شده است. به طور متوسط عمق روباره در این مسیر تونل ۱۱ متر می‌باشد. از آنجا که این قسمت از مسیر تونل در زیر اتوبان قرار دارند و وجود سازه سطحی گزارش نشده است، بار سطحی زنده به اندازه ۲۰ کیلو پاسکال به صورت بار گسترده در سطح مدل در نظر گرفته شده است. در این قسمت سطح آب زیرزمینی از کف تونل ۲ متر می‌باشد و آب زیرزمینی به صورت فشار آب منفذی در نظر گرفته شده است و فشار تزریق هم به صورت فشار دایره‌ای و یکنواخت در پشت سگمنت به دیواره تونل و متقابلاً به دیواره سگمنت‌ها وارد شده است.



شکل ۳-۴- ابعاد مدل سه بعدی، موقعیت تونل و ضخامت لایه های موجود

در مدلسازی به منظور حفر تونل، ابتدا حفاری تونل به اندازه ۱/۵ متر انجام شد و سپس با اعمال فشار سینه کار و همچنین اعمال شرایط سپر در متراژ ۱/۵ متری، نگهداری فضای حفر شده صورت گرفت. این روند تا متراژ ۹ (به اندازه طول سپر) ادامه یافت. پس از آن با پیشروی سپر و ورود به متراژ ۱۰/۵ پوشش بتنی و تزریق پشت پوشش بتنی در قسمت صفر تا ۱/۵ متری ابتدای تونل به مدل اعمال شده و این مراحل تا انتهای حفاری تونل تکرار گردیده است. بنابراین مراحل شبیه سازی بعد از رسیدن مدل به تعادل اولیه به صورت زیر است:

- حفر تونل به اندازه طول سگمنت (۱/۵ متر)
- اعمال فشار سینه کار در سطح حفاری
- به کار بردن المان های پوسته ای برای مدل کردن سپر
- برداشتن فشار سینه کار و حفاری جدید و ادامه مراحل بالا
- اعمال فشار تزریق بعد از ۹ متر حفاری (معادل طول سپر)
- حل مدل

- تکرار مراحل بالا تا اتمام حفاری

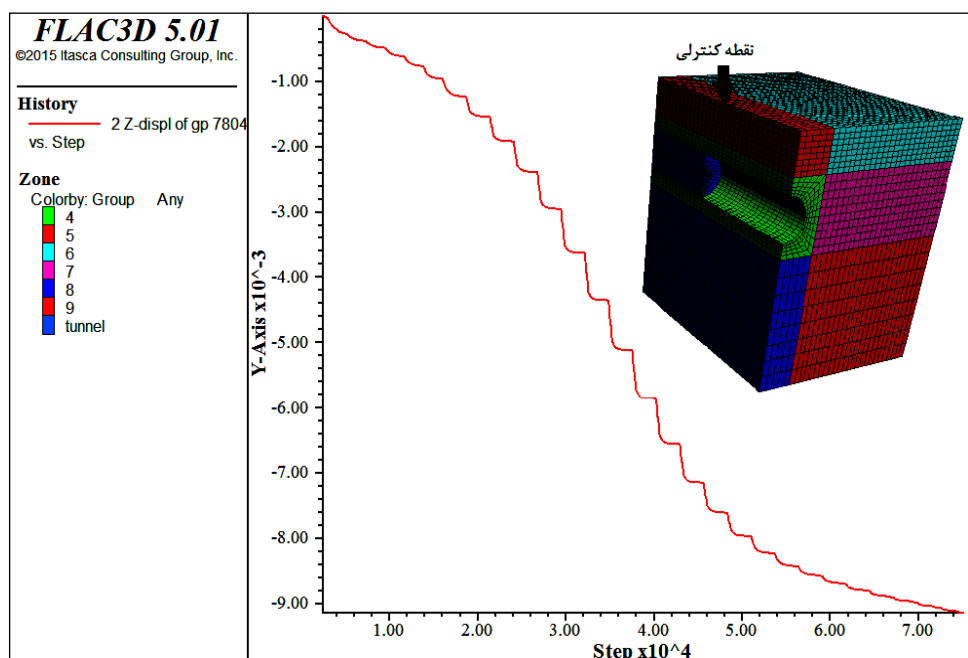
ویژگی‌های مکانیکی سپر و سگمنت در جدول ۴-۲ ذکر شده است.

جدول ۴-۲- خصوصیات مکانیکی سپر و سگمنت

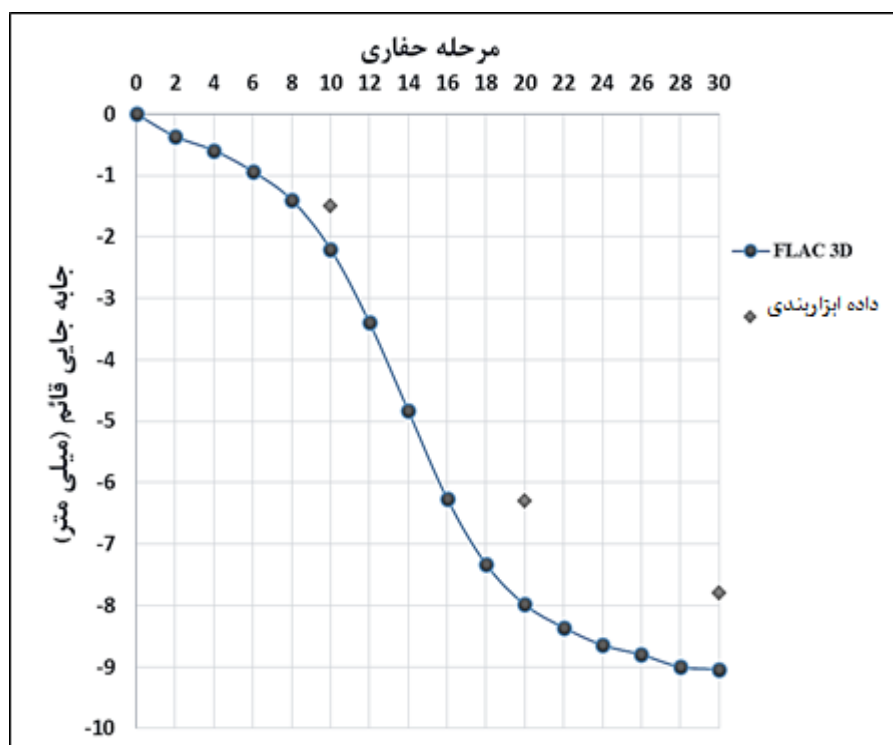
نسبت پواسون	مدول یانگ (گیگا پاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ضخامت (متر)
۰/۲	۲۱۰	۷۸۵۰	۰/۲۴۵
۰/۲	۳۰	۲۵۰۰	۰/۳۵
سپر			
سگمنت			

۴-۱-۳- ارزیابی نتایج مدلسازی عددی با استفاده از نقطه کنترلی

به منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت روند مدلسازی عددی سه‌بعدی از نتایج اِزاربندی و رفتارنگاری استفاده شده‌است. برای پایش نشست سطحی در مدلسازی، نقطه‌ای در سطح زمین به فاصله ۲۵ متری از جبهه‌کار تونل انتخاب شد. شکل (۴-۴) مقادیر تغییر شکل قائم محاسبه شده براساس عامل‌های به کار رفته (جدول ۴-۱) و موقعیت نقطه کنترلی را نشان می‌دهد. شکل (۴-۵) مربوط به میزان جابه جایی قائم نسبت به مراحل حفاری در نقطه کنترلی و میزان نشست سطحی حاصل از داده مانیتورینگ است.



شکل ۴-۴- جابه جایی قائم برای نقطه کنترلی و جایگاه نقطه کنترلی در مدل



شکل ۴-۵- نمودار جابه جایی قائم نسبت به مراحل حفاری در نقطه کنترلی و داده اِبرازیندی

برای پایش میزان نشست سطحی پین‌هایی به طول ۱/۲ متر در سطح زمین و در مسیر حفر تونل

نصب شده است. در شکل (۴-۶، الف) ساختار پین و شکل (ب) مراحل نصب آن و شکل (ج) نحوه قرائت

جابه‌جایی قائم نشان داده شده است. میزان جابه‌جایی در طول زمان با پیشروی تونل و در بازه‌های زمانی مشخص با استفاده از دوربین‌های نقشه برداری تعیین می‌شود. این پین‌ها در فواصل طولی ۱۰ متری در مسیر تونل و در جوانب آن به فواصل ۵ متری نصب شده‌اند. در مراحل حفاری ۱۶ تا ۲۲ مرحله، سپر از زیر نقطه کنترلی عبور می‌کند. میزان نشست تا رسیدن به یک مقدار حداکثر در حدود مرحله ۳۰ افزایش می‌یابد. در این تحقیق از سه مقدار نشست پین نصب شده در نقطه کنترلی در فواصل حفاری ده مرحله‌ای پیشروی دستگاه حفاری برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده است [۱۱۳].



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۴-۶- الف) ساختار پین‌های نشست سنجی ب) مراحل نصب پین ج) قرائت میزان جابه‌جایی قائم [۱۱۳]

میزان فشار سینه‌کار و فشار تزریق در این مقطع ۶۰ و ۱۱۰ کیلوپاسکال می‌باشد. باید در نظر داشت که اختلاف ما بین داده ابزاربندی و نتایج مدلسازی ناشی از عوامل مختلف مانند عدم قطعیت در داده‌های ژئوتکنیکی استفاده شده در مدل، دقت اندازه‌گیری و غیره می‌تواند باشد. با این وجود، نتایج داده‌های ابزاربندی و مدلسازی روند رفتاری یکسانی را نشان می‌دهند و در بازه نزدیک به هم هستند و اعتبار مدل عددی قابل قبول می‌باشد.

۴-۱-۴- واکاوی حساسیت و تعیین عامل‌های موثر

صحت یک متامدل بستگی به تعداد نقاط نمونه‌برداری و توزیع آن‌ها در فضای عامل ورودی دارد. به منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه محاسبات، باید تعدادی نمونه‌ی محدود تولید شود. بنابراین روش

نمونه‌برداری تصادفی برای یافتن بهترین نقاط درون دامنه طراحی استفاده شده است. ایده‌ی کلی استراتژی نمونه‌برداری تصادفی، تولید یک سری از نقاط است که به صورت یکنواخت در فضای عامل ورودی توزیع شده باشد. در این تحقیق از روش فرامکعب لاتین برای نمونه‌برداری استفاده شده است.

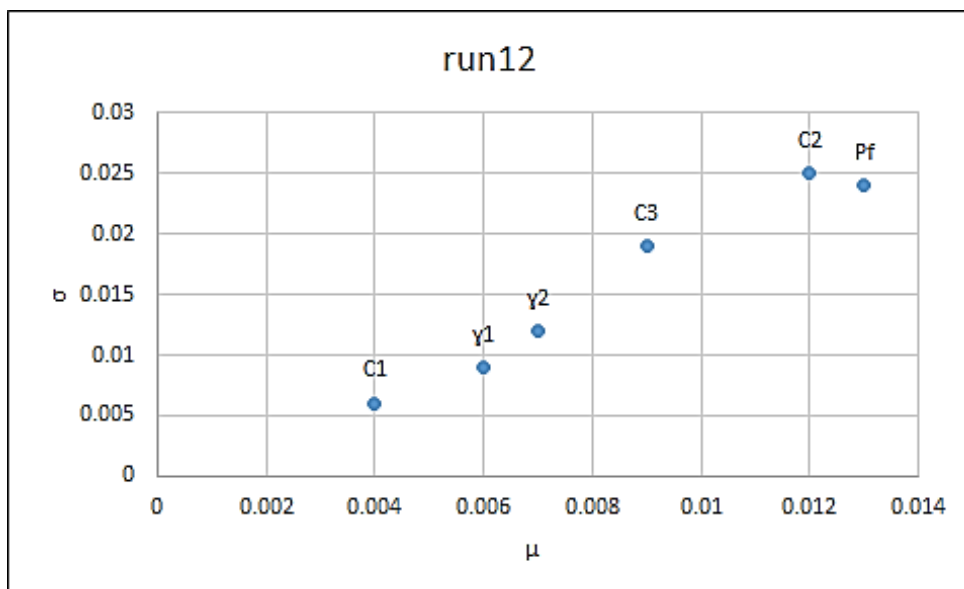
برای یک مساله غیرخطی پیچیده، شبیه‌سازی عددی دارای هزینه محاسباتی زیادی می‌باشد. بنابراین کاهش تعداد عامل‌های موثر با کاربرد واکاوی حساسیت یک راهبرد مفید و موثر برای کاهش هزینه و زمان مورد نیاز شبیه‌سازی‌ها می‌باشد. این واکاوی، اهمیت هر عامل ناشناخته را با در نظر گرفتن پاسخ مدل تخمین می‌زند و موجب کاهش تعداد عامل‌های موثر در تولید متامدل می‌گردد [۸]. از بین عامل‌های ژئوتکنیکی وزن مخصوص لایه‌های اول و دوم، چسبندگی لایه‌ی اول، دوم و سوم و از عامل‌های عملیاتی فشار سینه‌کار به دلخواه برای انجام واکاوی حساسیت انتخاب و بازه مقادیر ورودی آن‌ها در جدول ۳-۴ ارائه شده است. که این بازه‌ها کمینه و بیشینه مقادیر مربوط به عامل‌ها حاصل از نتایج آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی از نمونه‌های خاک برای عمق‌های مختلف مقطع موردنظر می‌باشد.

با توجه به مطالب ارائه شده در بخش (۲-۴-۱) برای ۶ عامل انتخاب شده، به ازای $r=7$ تعداد ۴۹ نمونه برای شبیه‌سازی در فرآیند واکاوی حساسیت انجام شده است. فشار تزریق در تمامی شبیه‌سازی‌های با نمونه تصادفی، ۵۰ کیلو پاسکال بیش‌تر از فشار سینه‌کار در نظر گرفته شده است [۱۷]. در طول ساخت تونل، نشست سطحی حداکثر یکی از مهم‌ترین پاسخ‌های مدل است که مقادیر آن در طول پیشروی تونل در مراحل مختلف نسبت به نقطه کنترلی برآورد شده است.

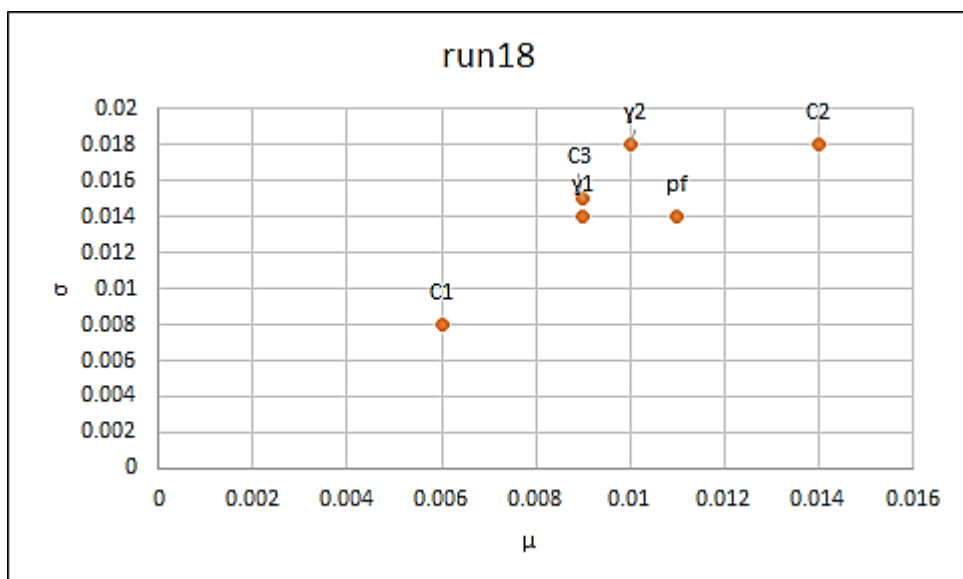
جدول ۴-۳- بازه عامل‌ها برای انجام واکاوی حساسیت [۱۱۲]

عامل‌ها	بازه داده ورودی	توصیف عامل در نمودارها
وزن مخصوص لایه اول (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱/۵-۱/۸	γ_1
وزن مخصوص لایه دوم (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱/۷-۱/۹۵	γ_2
چسبندگی لایه اول (کیلو پاسکال)	۱۵-۴۰	C_1
چسبندگی لایه دوم (کیلو پاسکال)	۰-۳۰	C_2
چسبندگی لایه سوم (کیلو پاسکال)	۱۵-۴۰	C_3
فشار سینه‌کار (کیلو پاسکال)	۱۰-۱۵۰	P_f

نتایج هر شبیه‌سازی با در نظر گرفتن جابه‌جایی قائم به عنوان نتیجه نهایی جمع‌آوری و عامل‌های مربوط به واکاوی (انحراف معیار و میانگین استاندارد) محاسبه گردید. تمامی مراحل فوق در نرم افزار MATLAB و با استفاده از جعبه ابزار SAFE انجام شده است [۱۱۴].

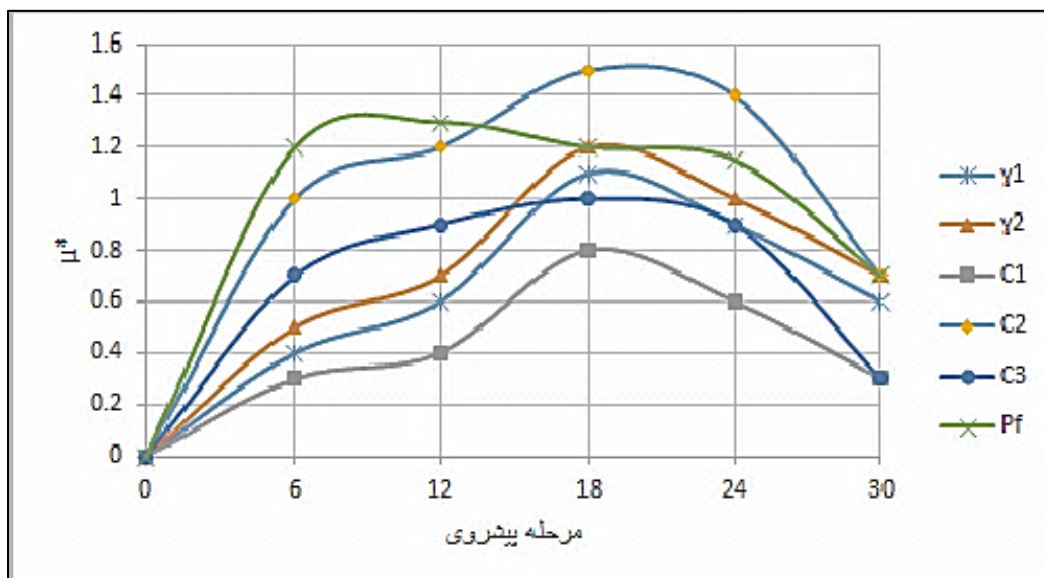


شکل ۴-۷- مقادیر میانگین و انحراف معیار برای ۶ عامل انتخابی بعد از ۱۲ مرحله حفاری در نقطه کنترلی



شکل ۴-۸- مقادیر میانگین و انحراف معیار برای ۶ عامل انتخابی بعد از ۱۸ مرحله حفاری در نقطه کنترلی

همان‌طور که در شکل‌های (۷-۴) و (۸-۴) مشاهده می‌شود عامل P_f و C_2 دارای بیشترین مقدار میانگین و انحراف معیار می‌باشد که نشان دهنده‌ی اندرکنش زیاد این دو عامل با بقیه عامل‌های موجود در کنار تاثیر زیاد آن‌ها می‌باشد. بنابراین از بین ۶ عامل، فشار سینه‌کار و چسبندگی لایه‌ی خاک دوم بیشترین تاثیر را بر روی میزان نشست در مراحل ۱۲ و ۱۸ پیشروی تونل دارد. اما از این نمودارها امکان انتخاب عامل موثر سوم وجود ندارد، هدف از این تحقیق بررسی تاثیر عامل‌های انتخابی در میزان نشست حداکثر می‌باشد. بنابراین معیار انتخاب، میزان نشست حداکثر بعد از ۳۰ مرحله حفاری است که با در نظرگرفتن این شرایط و مقدار میانگین مطلق، همان‌طور که از شکل (۹-۴) قابل مشاهده است، عامل‌های C_2 ، γ_2 و P_f که به ترتیب چسبندگی لایه دوم، وزن مخصوص لایه دوم و فشار سینه‌کار هستند، بیشترین مقدار میانگین مطلق را دارند و از این‌رو به عنوان عامل‌های حساس انتخاب می‌شوند. نتایج واکاوی حساسیت از عامل‌های انتخابی با واقعیت تطابق دارد چرا که خصوصیات لایه‌ای که تونل در آن حفر شده است (لایه دوم) نسبت به خصوصیات لایه‌های بالاتر، بیشترین تاثیر را در نشست سطحی حداکثر دارد.



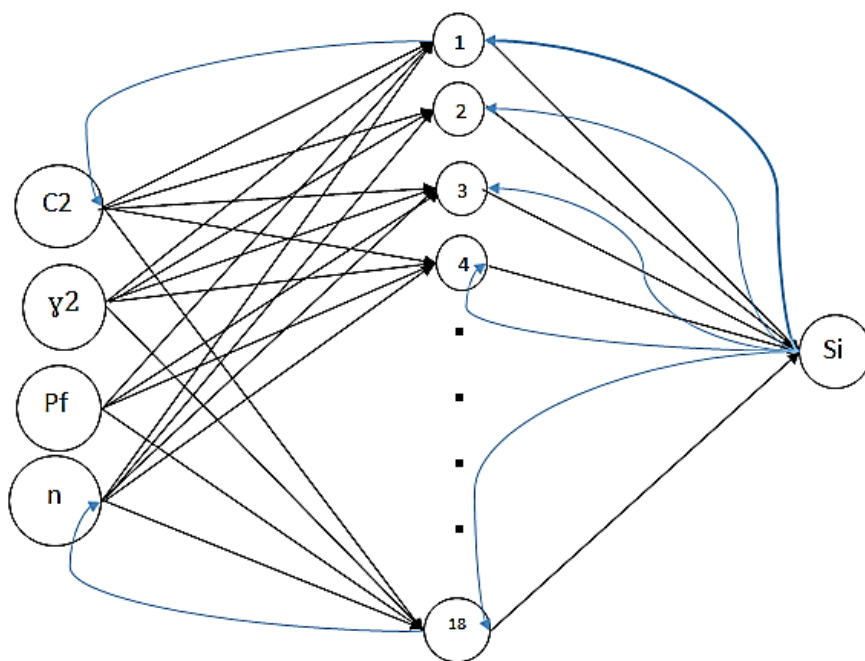
شکل ۴-۹- نمودار کلی میانگین مطلق ۶ عامل نسبت به مراحل حفاری

۴-۱-۵- تولید داده برای متا مدل و ساخت شبکه عصبی مصنوعی

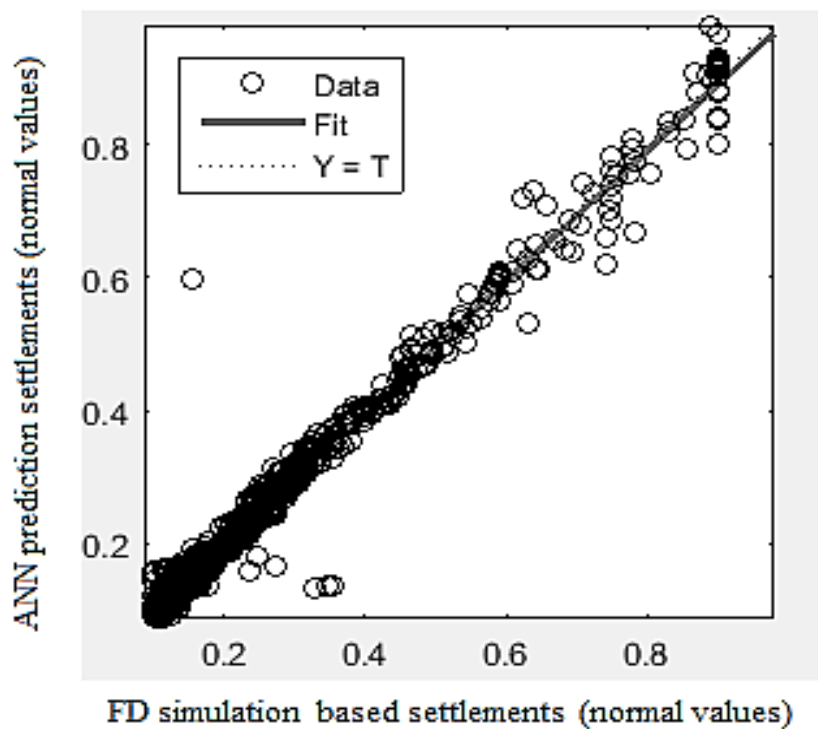
همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد، از بین ۶ عامل انتخاب شده برای واکاوی حساسیت، ۳ عامل وزن مخصوص و چسبندگی لایه دوم و فشار سینه کار به عنوان عامل‌های حساس انتخاب شد. به منظور ایجاد متا مدل ۱۰۰ نمونه با استفاده از روش تولید داده تصادفی فرامکعب لاتین (بخش ۲-۴-۲) از بازه این عامل‌ها تولید و سپس شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی برای آن‌ها انجام شده است. انجام شبیه‌سازی‌ها برای تولید داده‌های متا مدل با کامپیوتر ۲ هسته‌ای، ۲/۸ گیگا هرتز و حافظه ۴ گیگا بایت حدود ۲۰ روز طول کشید. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی برای هر ۱۰۰ نمونه، تعداد ۱۵۰۰ داده برای پیش‌بینی شبکه عصبی آماده شد. پس از چندین بار سعی و خطا بهترین معماری شبکه عصبی شامل ۴ نورون ورودی، یک لایه مخفی، ۱۸ نورون مخفی و یک خروجی انتخاب شد. شکل (۴-۱۰) ساختار شبکه عصبی به کار رفته برای ساخت متا مدل را نشان می‌دهد. در این تحقیق از روش شبکه عصبی پس انتشار، تابع سیگموند برای لایه مخفی و تابع خطی برای لایه خروجی استفاده شده است. برای تربیت شبکه عصبی از ۷۰ درصد داده‌ها و برای آزمایش و اعتبارسنجی هر کدام ۱۵ درصد داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به منظور جلوگیری از پدیده اشباع‌شدگی ضمن تربیت داده‌ها و به دست آوردن نتایج صحیح‌تر، مقادیر ورودی و خروجی داده‌ها با استفاده از رابطه (۴-۱) نرمالیزه شده است.

$$x^- = 0.9 - \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}} \times 0.8 \quad (4-1)$$

که در آن X_{min} و X_{max} بیشترین و کمترین مقدار در بازه‌ی عامل‌های ورودی و خروجی می‌باشند. نتایج خطی‌سازی و میزان خطا در هر سه نوع داده آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی برای شبکه عصبی در جدول (۴-۴) آورده شده است. مقایسه نتایج شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌سازی عددی در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰- ساختار شبکه عصبی پس انتشار به کار رفته برای متا مدل خط ۷ مترو تهران



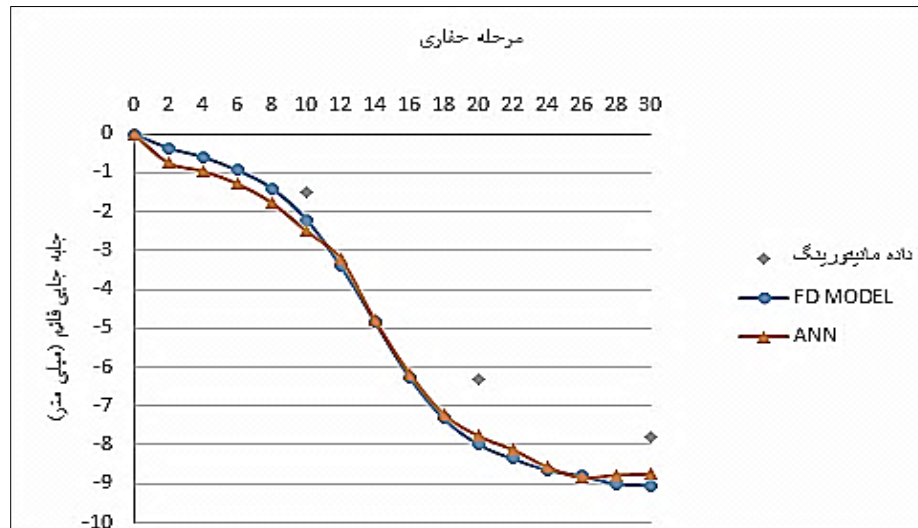
شکل ۴-۱۱- مقایسه نتایج نشست سطحی به دست آمده از مدلسازی عددی و شبکه عصبی مصنوعی

جدول ۴-۴- نتایج شبکه عصبی مصنوعی

مرحله	ضریب رگرسیون	میانگین مربع خطا	تعداد نمونه
آموزش	۰/۹۸۳۷	$۴/۹۳ \times 10^{-۴}$	۱۰۵۰
آزمایش	۰/۹۸۲۵	$۶/۲۶ \times 10^{-۴}$	۲۲۵
اعتبارسنجی	۰/۹۸۱۴	$۶/۶۱ \times 10^{-۴}$	۲۲۵

نتایج پیش‌بینی نشست با شبکه عصبی برای نقطه‌ی کنترلی و شبیه‌سازی اولیه با $FLAC^{3D}$ در شکل (۴-۱۲) ارائه است. با توجه به شکل می‌توان دریافت، نتایج به دست آمده با متامدل شبکه عصبی و تک شبیه‌سازی عددی تفاضل محدود تطابق نزدیکی دارند و در نتیجه شبکه عصبی قابلیت پیش‌بینی میزان نشست ناشی از حفاری مرحله به مرحله در فرآیند تونلسازی را دارد. نتایج چنین متامدلی می‌تواند در فرآیند تونلسازی و به منظور پیش‌بینی در زمان واقعی ساخت تونل مورد استفاده قرار گیرد. جدول (۴-۵) میزان هزینه محاسباتی لازم برای هر دو نوع شبیه‌سازی و همچنین تولید متامدل را نشان می‌دهد. همان طور که از جدول قابل مشاهده است با متامدل می‌توان در عرض چند ثانیه میزان نشست را پیش‌بینی کرد. بنابراین، با انتخاب بازه مناسبی از عامل‌های ورودی و ساخت متامدل قوی و قابل اعتماد در

صورت عدم تغییر ناگهانی خصوصیات لایه‌های خاک (به علت وجود گسل) می‌توان از این متامدل برای پیش‌بینی میزان نشست و استفاده از آن در تحلیل برگشتی و برآورد صحیح عامل‌های عملیاتی در حین فرآیند ساخت در زمان بسیار ناچیز استفاده نمود.



شکل ۴-۱۲- نتایج شبیه‌سازی با متامدل، مدلسازی $FLAC^{3D}$ و داده ابزاربندی در مقطع انتخاب شده

جدول ۴-۵- مقایسه زمان محاسبات برای روش‌های مختلف با استفاده از کامپیوتر ۲ هسته‌ای

نوع محاسبه	مدت زمان	واحد
شبیه‌سازی با نرم افزار $Flac^{3D}$	۴	ساعت
۱۰۰ عدد شبیه‌سازی برای ساخت متامدل	۴۰۰	ساعت
شبیه‌سازی با متامدل ANN	۰/۰۰۴	ساعت

۴-۱-۶- واکاوی برگشتی با ANN-PSO

در این بخش، از الگوریتم ترکیبی شبکه عصبی- تجمع ذرات برای تحلیل برگشتی استفاده شد [۲]. در این حالت از دو نوع عامل شامل عامل‌های ژئوتکنیکی و عامل عملیاتی (فشار سینه کار) برای ساخت متامدل استفاده شد. بنابراین در مرحله اول برای شناسایی عامل‌های ژئوتکنیکی، عامل عملیاتی TBM (فشار سینه کار) مطابق مقدار استفاده شده در پروژه در نظر گرفته شد و عامل‌های مواد خاک، چسبندگی لایه دوم و وزن مخصوص لایه دوم به روز شد تا با نشست‌های پیش‌بینی شده با اندازه‌گیری‌های برجا

برای خط ۷ مترو تهران مطابقت داشته باشد. به منظور کاربرد متامدل در تعیین بهینه عامل‌های عملیاتی، با معلوم بودن عامل‌های ژئوتکنیکی می‌توان با تغییر عامل‌های عملیاتی به میزان نشست مورد نظر دست یافت. بنابراین، از همان الگوریتم ANN-PSO برای جستجوی مقدار فشار سینه‌کار متناسب با کاهش میزان نشست سطح به مقدار دلخواه استفاده شده است. در این الگوریتم، عامل‌های مواد خاک عامل‌های ثابتی بودند که مقدار آن‌ها در اولین مرحله تحلیل برگشتی مشخص شد. تابع برازش الگوریتم بهینه‌سازی PSO در واقع کمترین مقدار خطا در پیش‌بینی شبکه عصبی مصنوعی در نظر گرفته شده است که توسط رابطه‌های (۲-۴) و (۳-۴) محاسبه می‌شود.

$$Error\ function = 1/2(\sum_{s=1}^m(out_s - tar_s)^2) \quad (4-2)$$

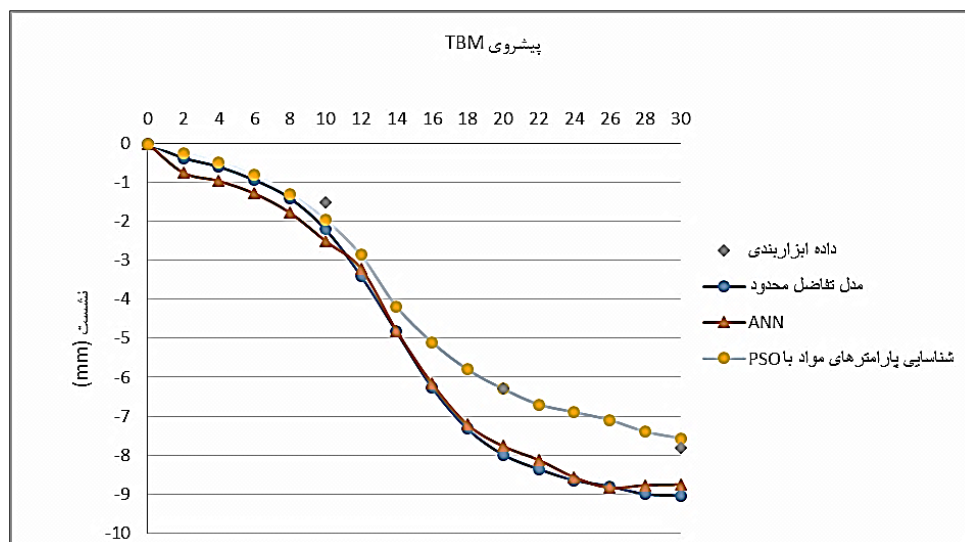
$$Fitness\ function = \frac{1}{\sum_0^{P_n} Error + T} \quad (4-3)$$

عامل tar و out به تربیت مقادیر هدف و خروجی شبکه عصبی برای گره‌های $k=1, \dots, m$ هستند. عامل T مقدار تلورانس انتخابی است که برای جلوگیری از یکتاشدگی در رابطه استفاده شده است و P_n تعداد ذرات در الگوریتم می‌باشد. بهترین جواب الگوریتم متعلق به بیشینه مقدار تابع برازش است. عامل‌های به کار رفته در الگوریتم PSO در جدول ۴-۶ آورده شده است. این مقادیر براساس روش آزمایش و خطا انتخاب شده است.

شکل (۴-۱۳) تغییرات ایجاد شده در نتایج شبیه‌سازی را بعد از به‌روز رسانی عامل‌های خاک (چسبندگی و وزن مخصوص لایه دوم) را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار مقدار پیش‌بینی نشست با مقدار اندازه‌گیری شده در محل مطابقت دارد. بعد از ۲۸ تکرار در الگوریتم PSO و با فشار سینه‌کار ۶۰ کیلو پاسکال، الگوریتم برای مقادیر چسبندگی ۲۸ کیلو پاسکال و وزن مخصوص ۱/۸۱ گرم بر سانتی متر مکعب همگرا می‌شود.

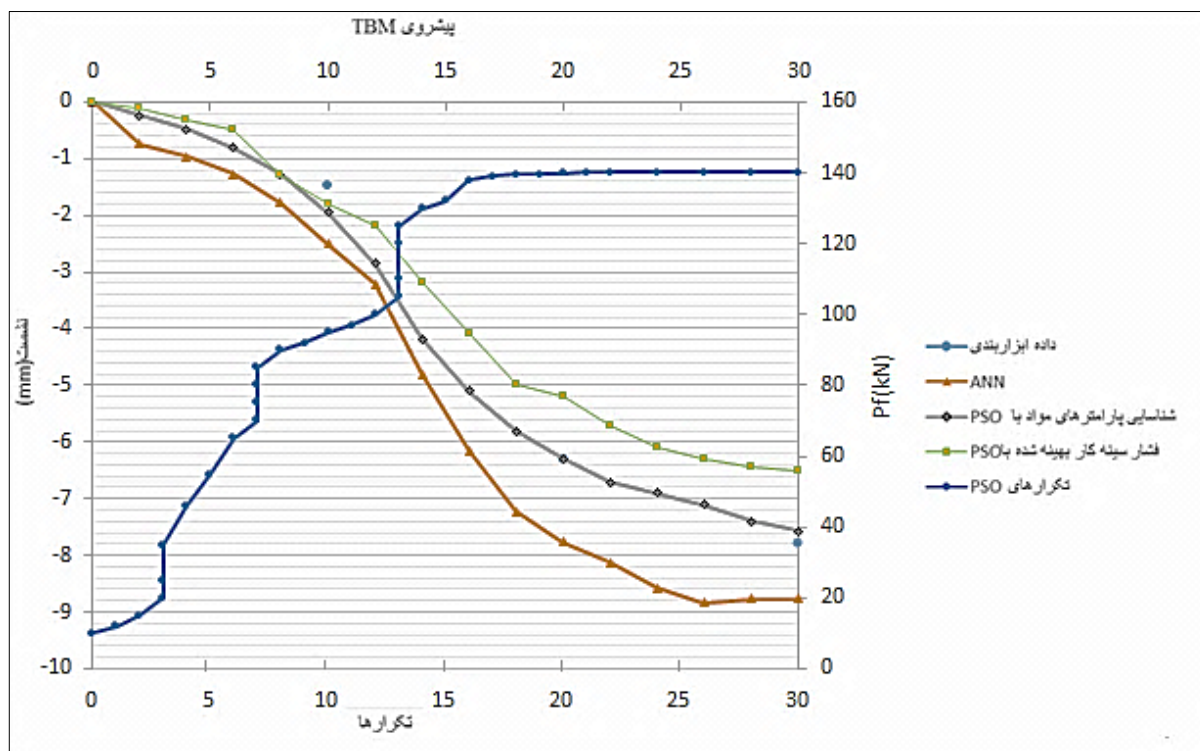
جدول ۴-۶- عامل های الگوریتم PSO

مقدار	عامل های PSO
۳۰	تعداد جمعیت
۰/۹	Cl
۱/۷	Sl
۱	W
۰/۹۹	میرایی W
۱۰۰	ماکزیمم مقدار تکرار



شکل ۴-۱۳- مقایسه پاسخ های مدل (مدل تفاضل محدود منفرد، پیش بینی ANN، الگوریتم ANN-PSO)

در مرحله بعد، با استفاده از عامل های خاک بهینه شده، فشار سینه کار برای نشست مورد نظر بهینه می شود. مطابق شکل (۴-۱۴) به منظور دستیابی به نشست حدود ۶/۵ میلی متر بعد از ۳۰ مرحله پیشروی TBM، مقدار فشار سینه کار حدود ۱۴۰ کیلو پاسکال به دست می آید. همچنین عملکرد الگوریتم PSO برای دستیابی به این عامل نامعلوم در شکل نشان داده شده است. استفاده از این الگوریتم اجازه ایجاد نشست کنترل شده برای مراحل حفاری را می دهد. فرآیند تحلیل برگشتی در مدت زمان چند دقیقه در یک کامپیوتر معمولی و با تخمین تابع هدف براساس ANN از پیش تربیت شده انجام شد.

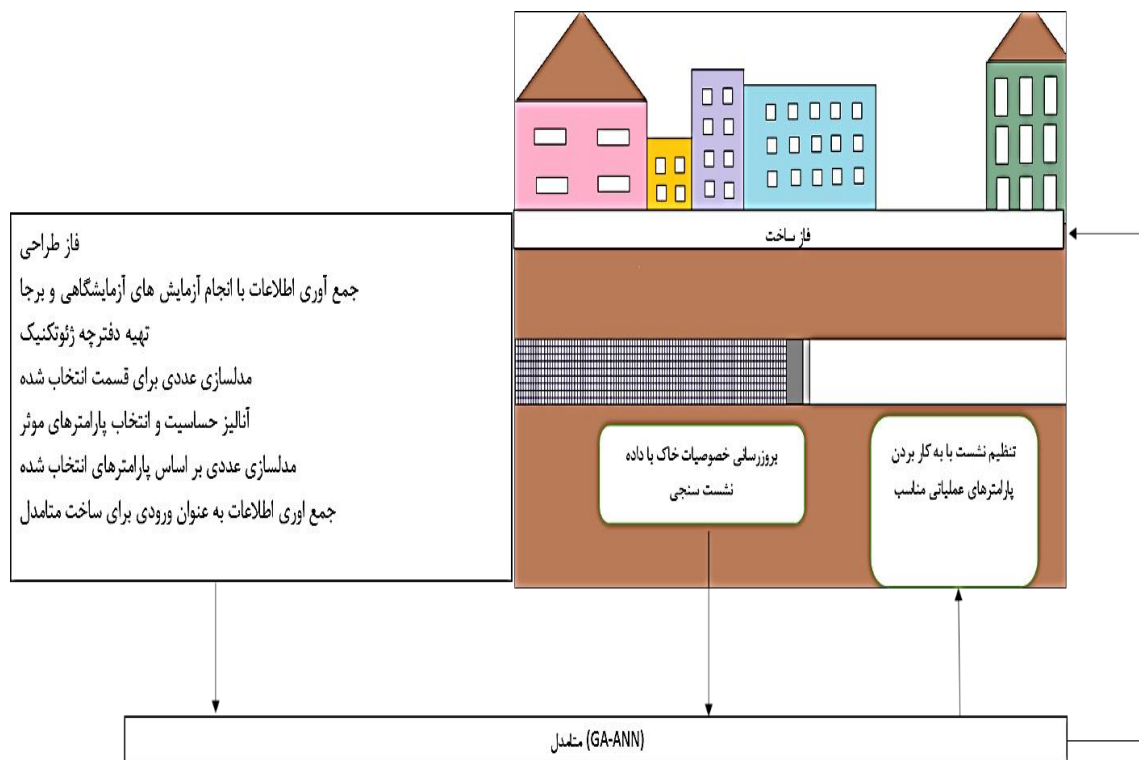


شکل ۴-۱۴- مقایسه نتایج (پیش بینی ANN، بهینه‌سازی عامل‌های خاک با PSO، بهینه‌سازی عامل عملیاتی با PSO و عملکرد PSO در شناسایی عامل‌ها)

۴-۲- مطالعه موردی دوم: خط ۲ مترو تبریز

در این بخش، با استفاده ترکیبی از شبیه‌سازی عددی با روش تفاضل محدود و روش‌های رایج هوش مصنوعی از جمله شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، پیش‌بینی حداکثر نشست سطحی و همچنین به روزرسانی عامل‌های ژئوتکنیکی خاک با استفاده از تحلیل برگشتی و داده‌های ابزاربندی انجام شده است. پس از شناسایی عامل‌های خاک، از این عامل‌ها برای در نظر گرفتن عامل‌های عملیاتی بهینه در حین ساخت استفاده شد. شکل (۴-۱۵) خلاصه‌ای از روند کار در این مطالعه را نشان می‌دهد.

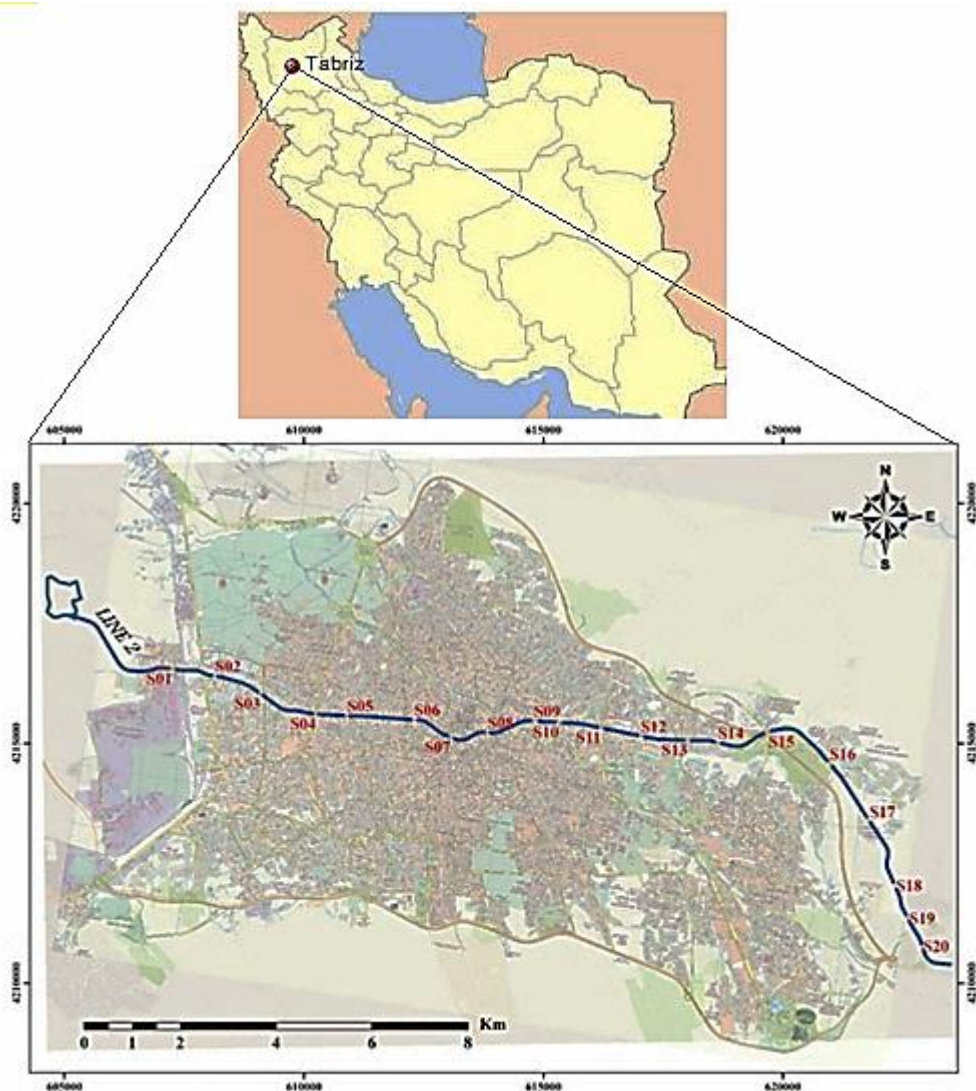
بر خلاف مطالعات انجام شده توسط محققان در این زمینه، این مطالعه در یک محیط خاک با لایه‌های بیشتر و در نتیجه عامل‌های شبیه‌سازی بیشتر انجام شده و متامدل مربوطه ساخته شده است. همچنین، عملکرد الگوریتم ژنتیک برای اولین بار در این زمینه مورد بررسی قرار گرفت و از یک کامپیوتر ۳۲ هسته‌ای برای سرعت بخشیدن به روند انجام ۲۵۰ شبیه‌سازی استفاده شد.



شکل ۴-۱۵- نمایی از مراحل انجام تحقیق شامل فرآیند واکاوی برگشتی و شناسایی عامل‌ها

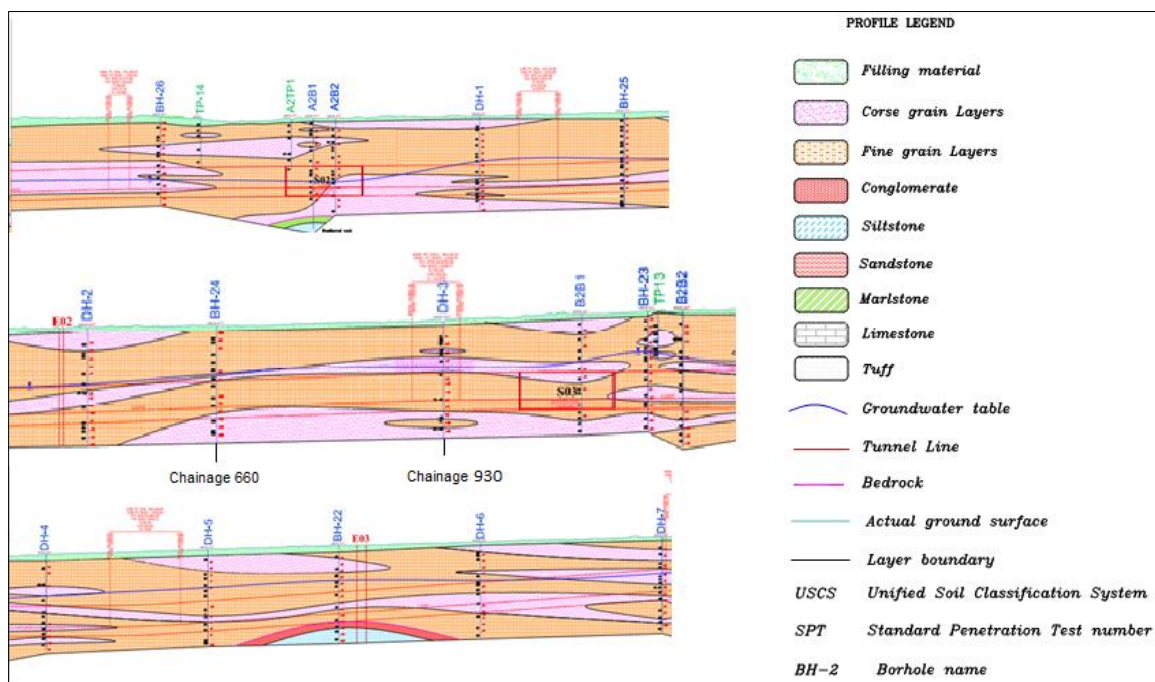
۴-۲-۱- معرفی خصوصیات پروژه

تبریز با بیش از ۳.۵۰۸.۵۰۰ نفر جمعیت یکی از بزرگترین شهرهای ایران است که موقعیت آن بر روی نقشه در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است. طبق طرح توسعه خطوط مترو تبریز، چهار خط مترو در آینده نزدیک ساخته خواهد شد که ساخت خط ۱ (به طول ۱۷ کیلومتر) و خط ۲ (به طول ۲۲ کیلومتر) از قبل آغاز شده است. خط ۲ مترو تبریز قسمت شرقی شهر (ایستگاه باغمیشه) را به قسمت غربی آن (ایستگاه راه آهن) می‌پیوندد. این خط شامل ۲۰ ایستگاه زیرزمینی است و از نقاط شلوغ شهر مانند مراکز تجاری و قدیمی عبور می‌کند. قطر حفاری تونل در این خط ۹/۵ متر طراحی شده است. کل مسیر تونل در این خط از زیر زمین عبور می‌کند و مواد خاک عمدتاً رسوبات آبرفتی است. نقشه مسیر مترو خط ۲ تبریز نیز در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است [۱۱۵].



شکل ۴-۱۶- موقعیت تبریز در نقشه ایران و نقشه خط ۲ مترو تبریز

مطالعات ژئوتکنیکی خط ۲ در دو مرحله انجام شده است. در فاز اول، ۱۵۵ گمانه ماشینی و ۲۲ حلقه چاه دستی حفر شده است. مطالعات اضافی فاز ژئوتکنیک ۴ سال پیش آغاز شده است که ۱۰ گمانه حفاری ماشینی و ۶ چاه دستی حفر شده است. منطقه مورد مطالعه در قسمت غربی شهر تبریز واقع شده است که تا عمق مورد مطالعه (حدود ۳۰ متر) از رسوبات آبرفتی دانه ریز در سطح، رسوبات شن و ماسه در اعماق تشکیل شده است (شکل ۴-۱۷). عمق آب زیرزمینی در این منطقه بین ۸ تا ۱۶ متر متغیر است و نوع سفره آب زیرزمینی آزاد است [۱۱۵].



شکل ۴-۱۷- مقطع زمین شناسی از خط ۲ مترو تبریز

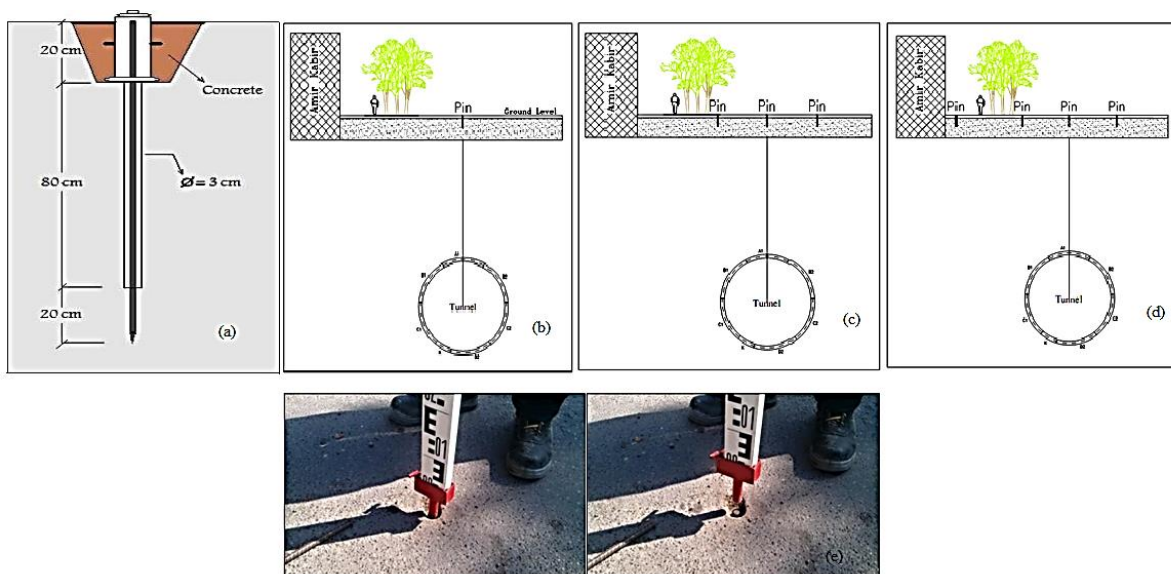
مجموعه ساختمان‌های بازارچه امیرکبیر در ضلع شمالی خیابان امیرکبیر قرار دارد. ساختمان‌ها از نوع تجاری و به صورت ساختمان‌های بنایی دو طبقه و با مالکیت شخصی است که فاصله آن‌ها تا محور تونل برابر با ۸ متر می‌باشد. در شکل پلان مجموعه نمایش داده شده است [۱۱۶].

۴-۲-۲- ابزاربندی برای نشست سطحی

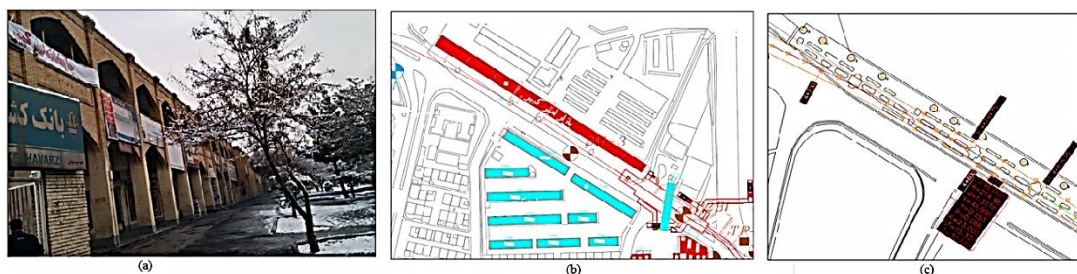
به منظور اندازه‌گیری جابجایی‌های قائم سطح زمین (نشست زمین) ناشی از حفر تونل، از روش‌های ترازیابی استفاده می‌شود. با ترازیابی می‌توان نشست و بالادگی سطح زمین را اندازه‌گیری نمود. این عملیات بدین صورت انجام می‌گیرد که با ایجاد نقاط مشخصه بر روی سطح زمین و قرائت مستمر آن‌ها پیش از رسیدن و پس از عبور تونل از این نقاط، مقدار جابه‌جایی عمودی آن‌ها و در نتیجه میزان نشست یا بالادگی در اثر حفر تونل مشخص می‌گردد. در این پروژه این کار با نصب پایه‌ها و قرائت مداوم آن‌ها قبل از رسیدن و پس از عبور از تونل انجام می‌شود. پین‌ها میزان جابجایی عمودی را تعیین می‌کنند و در نتیجه، میزان نشست یا تغییرات ارتفاع سطح ناشی از تونلسازی مشخص می‌شود. شکل (۴-۱۸) نمودار

شماتیک پین را نشان می‌دهد. حداقل دقت مورد نیاز برای علامت گذاری سطح با استفاده از دوربین تراز یاب ۰/۵ میلی‌متر است [۱۱۶].

در شکل (۴-۱۹) موقعیت پین‌های نصب شده در محدود بازار امیرکبیر در پلان مسیر نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در برخی مقاطع علاوه بر پین‌های نصب شده در راستای محور تونل، پین‌هایی نیز در طرفین پین مذکور و در فاصله حدود ۵ متری نصب شده است تا امکان اندازه‌گیری در مقاطع عرضی مربوطه فراهم گردد.



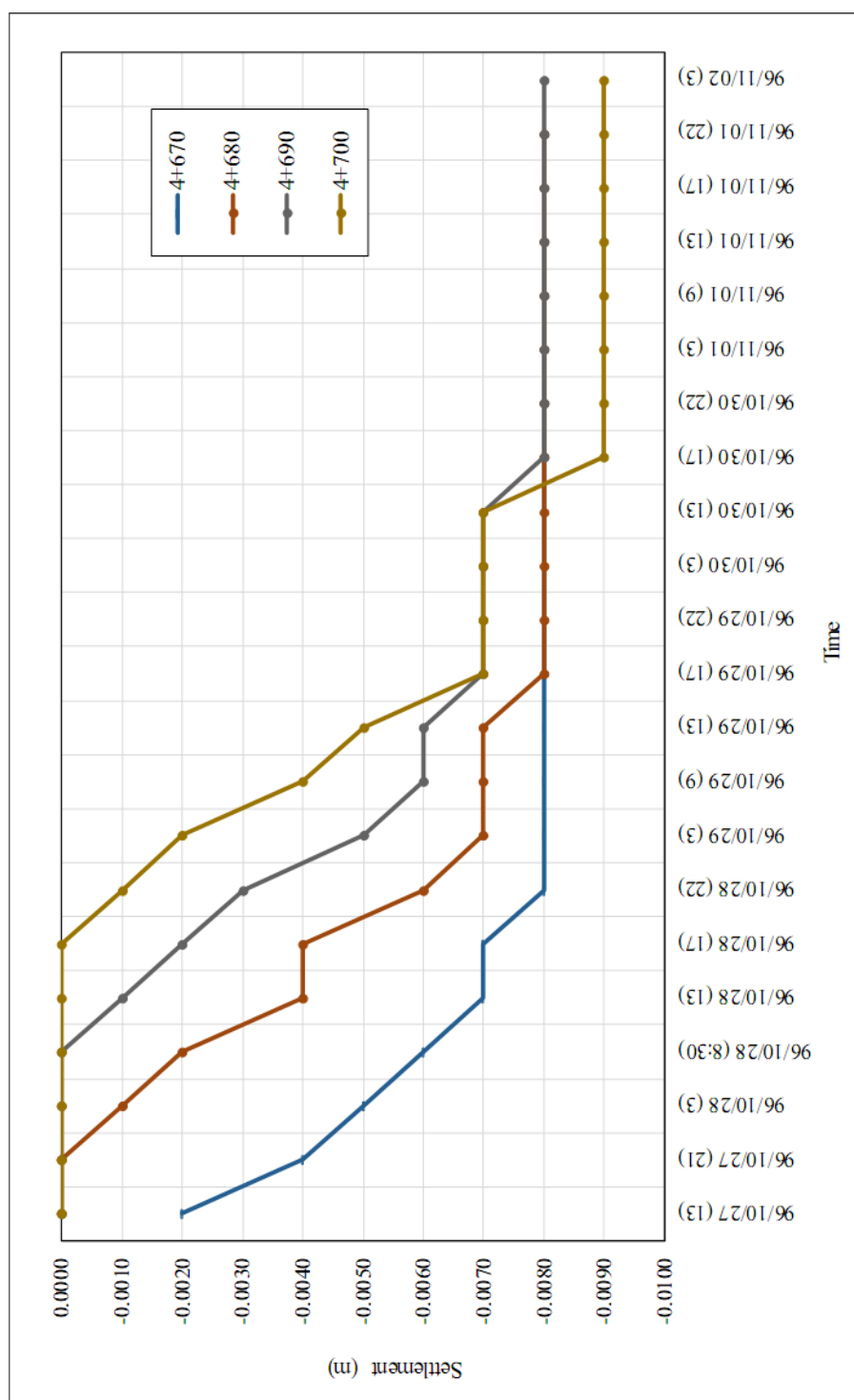
شکل ۴-۱۸ (a) تصویری از پین ، موقعیت پین‌های نصب شده نسبت به تونل (b) مدل تک نقطه ای (c) مدل سه نقطه ای (d) مدل چهار نقطه ای (e) نحوه نصب تراز یاب برای قرائت نشست [۱۱۶]



شکل ۴-۱۹ (a) تصویری از بازار امیرکبیر (b) پلان منطقه و (c) نقشه محل نصب پین‌ها [۱۱۶]

در اشکال (۴-۲۰) و (۴-۲۱) مقادیر نشست نهایی ثبت شده در پین‌های نصب شده در مسیر تونل در بازه‌های ۱۰۰ متری ارائه شده است. نکته مهم در ارتباط با این نمودارها این است که در مورد پین‌های

نصب شده در محدوده بازار امیرکبیر و بعثت وضعیت خاص سازه آن، نشست سنجی با فواصل زمانی کوتاهتر و به تعداد ۵ بار در هر شبانه روز در ساعات ۳ بامداد، ۹ صبح، ۱۳ ظهر، ۱۷ عصر و ۲۲ شب صورت گرفته است. هدف از این کار افزایش دقت کار و پایش دقیق تر جابه‌جایی‌های ایجاد شده در زمین در اثر حفر تونل بوده است و اینکه بتوان در مواقع ضروری با به کار بردن تمهیدات لازم از بروز خط جلوگیری نمود [۱۱۶].



شکل ۴-۲۰- مقادیر حداکثر نشست رخ داده در پین های ۴+۶۷۰ تا ۴+۷۰۰ [۱۱۶]

۴-۲-۳- مدلسازی عددی

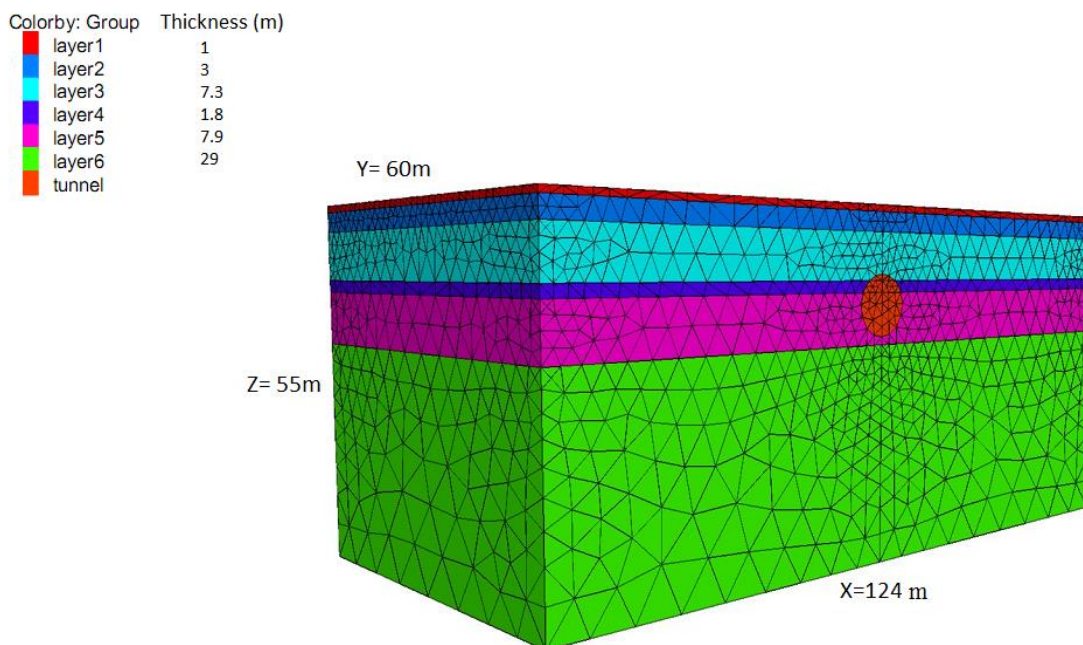
در این بخش، ماشین حفاری با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ در روش تفاضل محدود مدلسازی شده است. به منظور ساده سازی در مدل، خاک اطراف تونل همسان و همسانگرد فرض شد. در مدل عددی مدل رفتاری موهر- کلمب برای خاک و برای پوشش چندتکه و دوغاب پرکننده پشت پوشش از رفتار الاستیک استفاده شده است. شعاع حفاری تونل ۴/۷۵ متر است که از این مقدار ۰/۳۵ متر برای پوشش و ۰/۱۵ متر فضای خالی پشت پوشش که با تزریق پر می‌شوند در نظر گرفته شده است. ارتفاع روباره خاکی در این قسمت از مسیر تونل حدود ۱۱ متر است (متراژ ۶۶۰ + ۴ تا ۷۲۰ + ۴). خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک که در مدل اعمال و در جدول (۴-۷) نشان داده شده است.

جدول ۴-۷- خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک در ساختگاه پروژه

لایه ها	نوع خاک	ضخامت (متر)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	نسبت پواسون	زاویه اصطکاک داخلی
۱	مواد پر کردنی	۱	۱۶۱۰	۳۰	۰	۰/۳۵	۳۲
۲	CL-ML	۳	۱۳۰۰-۱۷۰۰	۱۰-۴۰	۰-۱۲	۰/۴۱	۱۵-۳۰
۳	ML	۷/۳	۱۵۰۰-۱۷۰۰	۱۰-۵۰	۵-۳۰	۰/۳۸	۲۰-۳۵
۴	SM	۱/۸	۱۸۰۰-۲۲۰۰	۳۰-۱۶۰	۵-۳۰	۰/۳۵	۲۰-۳۵
۵	CL-ML	۷/۹	۱۸۰۰-۲۳۰۰	۲۰-۷۰	۸-۴۰	۰/۳۷	۲۰-۳۵
۶	SM	۲۹	۲۰۳۰	۶۰-۱۱۰	۹	۰/۳۳	۳۴

نسبت تنش افقی به عمودی برای هر لایه با رابطه (۲-۱) محاسبه شد. مطابق شکل (۴-۲۲) ابعاد مدل ۱۲۴ متر طول (معادل مجموع دو برابر ارتفاع روباره و چهار برابر قطر تونل)، ۶۰ متر عرض (بیش از پنج برابر قطر تونل) و ۵۵ متر ارتفاع (برابر با مجموع ارتفاع روباره و چهار برابر قطر تونل) است. این ابعاد بعد از بررسی مدل‌های ساخته شده توسط محققین مختلف و به منظور کاهش تاثیر مرزهای مدل انتخاب شدند [۱۷، ۵۴]. به دلیل عبور تونل از لایه نازک خاک و ایجاد منطقه پلاستیک در این ناحیه، برای مش‌بندی مدل از نرم‌افزار گریدل استفاده شده است. بارهای سطحی مربوط به ساختمان‌ها و بار

ترافیکی به ترتیب ۳۰ کیلو پاسکال و ۲۰ کیلو پاسکال انتخاب شده‌اند و به صورت بار گسترده به سطح مدل وارد شده است. سطح آب زیرزمینی در این منطقه ۱۳/۱ متر می‌باشد که به عنوان فشار منفذی در مدل عددی در نظر گرفته شده است. نقطه کنترلی در روی محور تونل در سطح زمین و در موقعیت عرضی ۳۰ متر است.



شکل ۴-۲۲- مدل سه بعدی و موقعیت لایه های خاک

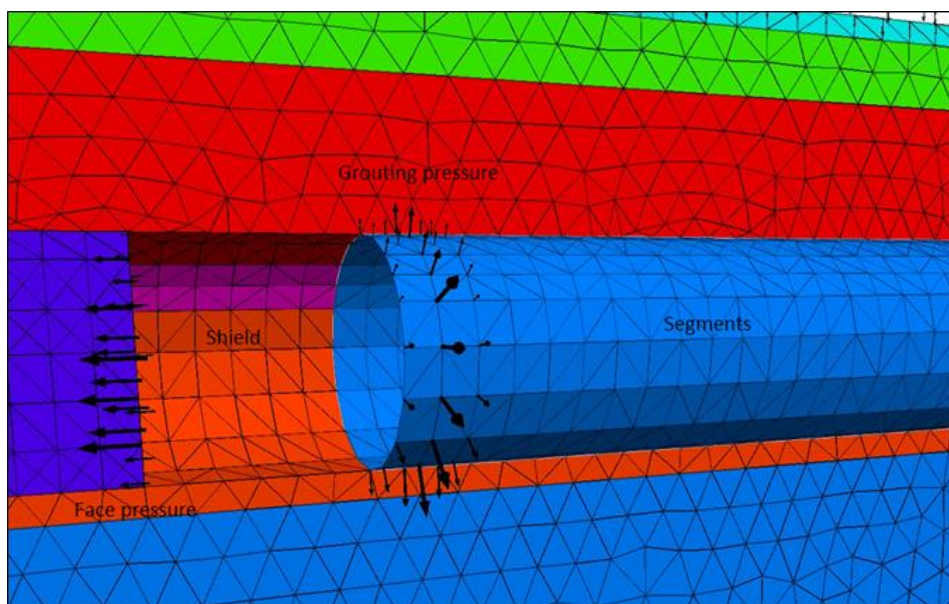
به عنوان شرایط مرزی مکانیکی، قسمت بالایی مدل آزاد و مرز پایین برای حرکت عمودی ثابت شده است، مرزهای دیگر در جهت طولی و عرضی ثابت شدند تا از هرگونه حرکت جلوگیری کنند. برای مدلسازی سپر از یک مرز مجازی به عنوان سپر استفاده شده است که در هر مرحله حفاری و در نقاط مورد نیاز در طول حفاری ایجاد می‌شود [۲۱]. در این روش، موقعیت این نقاط در هر مرحله حفاری محاسبه و به صورت مصنوعی ثابت می‌شوند تا نمایانگر سپر مجازی در مدل باشند. فضای بیش حفاری ناشی از اختلاف قطر سر دستگاه و قطر سپر در مدل عددی در نظر گرفته شده است که این اختلاف در حدود ۲ سانتی متر برای پروژه مترو تبریز است. در هر مرحله حفاری این فاصله تا رسیدن خاک به پشت سپر همگرا می‌شود.

از المان‌های پوشش^۱ برای مدلسازی سیستم نگهداری استفاده شده است. برای در نظر گرفتن تاثیر درزه موجود در پوشش تکه‌ای از روابط مویر وود^۲ برای کاهش ممان خمشی استفاده شده است [۲۸]. فضای خالی پشت سگمنت با مواد سیمانی پر شده است که این مواد برای دو سگمنت ابتدایی با خصوصیات مایع به همراه فشار دایروی که به صورت یکنواخت به دیواره خاک و بالعکس از خاک به طرف پوشش وارد می‌شود در نظر گرفته شده است. در ادامه خصوصیات مواد تزریقی سفت شده به این منطقه داده شده است. برای نقاط تماس بین سگمنت و ماده تزریقی سفت شده، المان‌های رابط^۳ به کار رفته است که مطابق دستورالعمل مهندسی ارتش آمریکا محاسبه شده است [۱۱۷]. مشخصات پوشش و ماده تزریقی در جدول (۴-۸) ارائه شده است. فاز حفاری به صورت مرحله به مرحله در نظر گرفته شده است و تمام لایه‌های خاک تا رسیدن به تعادل اولیه فعال شده‌اند. مراحل حفاری به صورت توالی ۱/۵ متری از حفر خاک و در کل ۴۰ مرحله در نظر گرفته شده است. در ۶ مرحله ابتدایی حفاری که معادل ۹ متر طول سپر است المان‌های سپر و فشار سینه کار تعبیه شده است و سپس بعد از ادامه مراحل، از پشت سپر با نصب سگمنت، فشار تزریق برای طول حدود دو سگمنت فعال می‌شود. شکل (۴-۲۳) این توالی را نشان می‌دهد. بازه فشارهای به کار رفته در مدل‌های عددی به ترتیب ۵۰-۱۱۰ کیلو پاسکال برای فشار سینه کار و ۲۰۰-۱۲۰ کیلو پاسکال برای فشار ترریق می‌باشد.

¹ Liner

² Moier wood

³ Interface

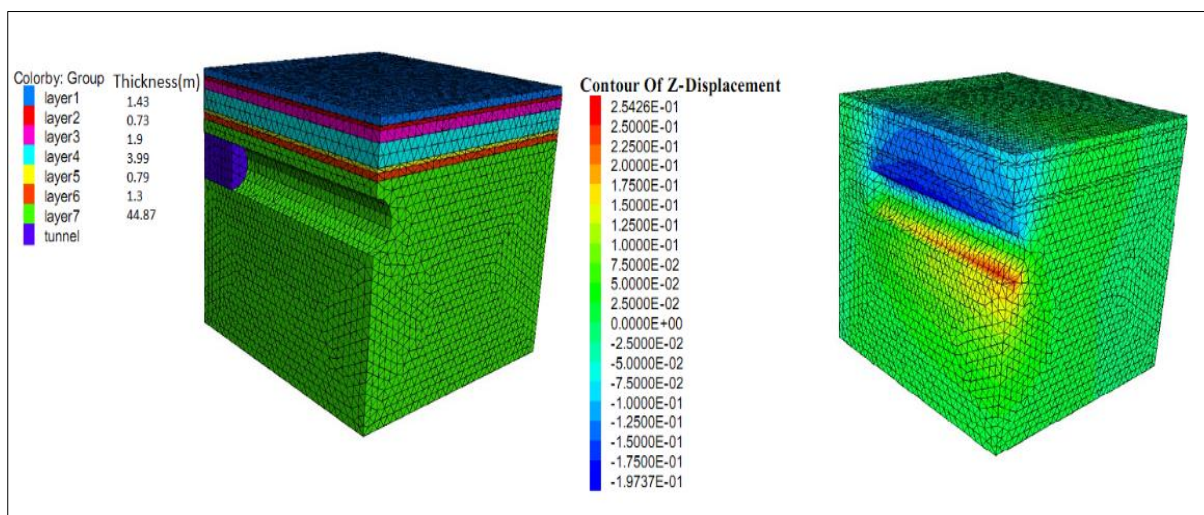


شکل ۴-۲۳- توصیف مراحل حفاری

جدول ۴-۸- مشخصات پوشش و ماده تزریقی مایع و جامد

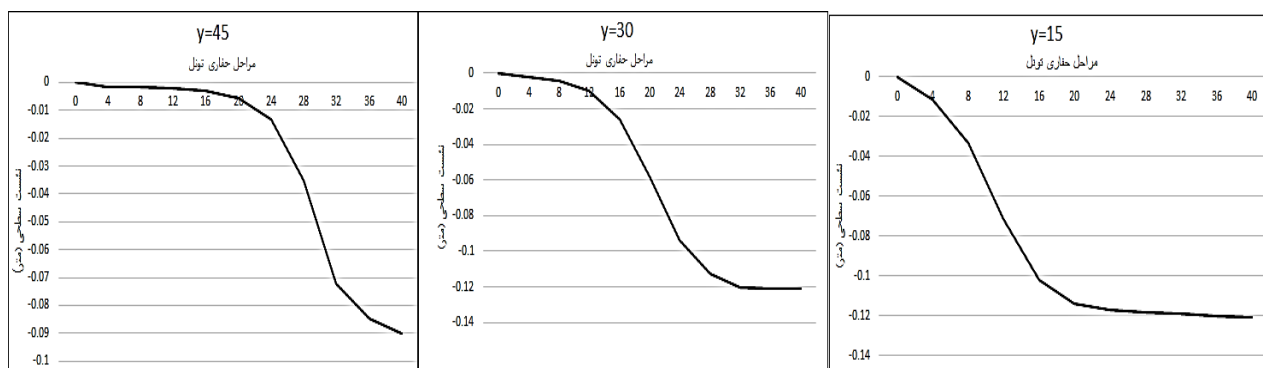
ماده تزریقی جامد	پوشش	ماده تزریقی مایع	
۱۸۰۰	۲۵۰۰	۱۸۰۰	دانسیته (کیلوگرم بر مترمکعب)
۲۰×۱۰^{-۳}	۳۰	۵×۱۰^{-۳}	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)
۰/۳	۰/۲	۰/۴۷	ضریب پواسون
۰/۱۵	۰/۳۵	۰/۱۵	ضخامت (متر)

قبل از انجام هرکاری برای تولید متا مدل صحت مدل عددی ساخته شده باید تایید شود. در مراحل ابتدایی ساخت تونل مترو تبریز خط ۲ (مترای ۷۵۰+) به دلیل خرابی دستگاه تزریق و عدم انجام این فرآیند در پروژه تونلسازی نشست سطحی حدود ۱۱/۲ سانتی متر در این منطقه به وجود می آید. با دادن مشخصات ژئوتکنیکی این منطقه به مدل و عامل‌های عملیاتی مربوطه، میزان نشست سطحی با مدل عددی برآورد شد. با توجه به شکل (۴-۲۴) می توان مشاهده کرد که میزان نشست سطحی در حدود ۱۱-۱۲/۵ سانتی متر می باشد. برای بررسی بیشتر میزان جابه جایی سطحی ناشی از حفر تونل در سه مقطع عرضی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ متر بررسی شد.



شکل ۴-۲۴- مدل عددی ساخته شده برای مترآژ (۷۵۰+) و کانتورهای جابه جایی قائم

همانطور که در نمودارهای ۴-۲۵ مشاهده می شود میزان نشست سطحی حداکثر در هر سه مقطع در حدود ۱۲ سانتی متر است و اختلاف ما بین مدل عددی و داده ایزاربنندی در حدود ۱۰٪ است و صحت مدل عددی تایید می شود.

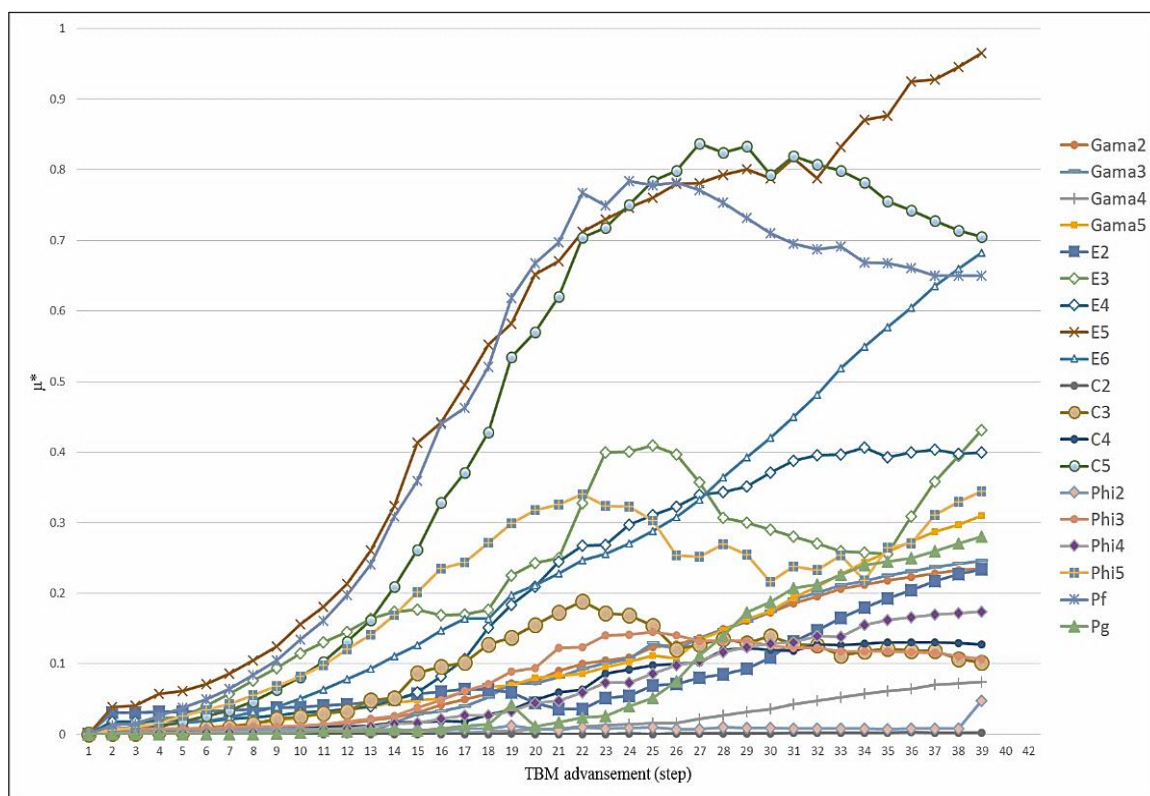


شکل ۴-۲۵- میزان نشست سطحی در مقاطع ۱۵، ۳۰ و ۴۵ متری سطح زمین در مترآژ ۷۵۰+

۴-۲-۴- واکاوی حساسیت

در این قسمت، برای شناسایی عامل های موثر در میزان نشست سطحی در پروژه مترو تبریز، تحلیل حساسیت بر روی ۱۹ عامل ورودی مدل شامل ۱۷ عامل ژئوتکنیکی لایه های خاک و ۲ عامل عملیاتی انجام شد. بر اساس نظر محققین، حساسیت عامل های مدل بستگی به بازه انتخاب شده برای این عامل ها و هدف از تخمین بستگی دارد [۲]. بازه عامل های انتخاب شده برای تحلیل حساسیت در جدول (۴-۷)

به صورت پررنگ نشان داده شده است. برای انجام تحلیل حساسیت از این عامل‌ها حدود ۱۰۰ عدد نمونه برای مدلسازی عددی به روش فرا مکعب لاتین و با استراتژی یکی در زمان تولید شد. تعداد این نمونه‌ها برای $r=5$ در رابطه (۲-۸) انتخاب شده است. به منظور تسریع فرآیند مدلسازی عددی برای این تعداد نمونه، از کامپیوتر ۳۲ هسته‌ای مرکز کامپیوتر دانشگاه ارومیه استفاده شد. شکل (۴-۲۶) نتایج تحلیل حساسیت کلی به روش تاثیر مقدماتی Morris را نشان می‌دهد. در این شکل نمودار مقادیر مطلق تاثیر مقدماتی (μ^*) نسبت به مراحل پیشروی تونل برای این ۱۹ عامل نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۶- تحلیل حساسیت عامل‌های خط ۲ مترو تبریز در نقطه کنترلی

بر طبق نمودار از میان این عامل‌ها به ترتیب مدول الاستیسیته لایه پنجم (E_5) و چسبندگی این لایه (C_5)، فشار سینه کار (P_f) و مدول الاستیسیته لایه ششم (E_6) بیشترین تاثیر را بر نشست سطحی دارند. از میان ۱۵ عامل باقی مانده براساس مقدار مطلق تاثیر مقدماتی به ترتیب عامل‌های مدول

الاستیسیته لایه سوم E_3 ، زاویه اصطکاک داخلی لایه پنجم Φ_5 ، مدول الاستیسیته لایه چهارم E_4 ، وزن مخصوص لایه پنجم و فشار تزریق P_g به عنوان دیگر عامل‌های موثر انتخاب شد. همچنان که از نتایج واکاوی حساسیت مشاهده می‌شود از بین عامل‌های مدل رفتاری، مدول الاستیسیته بیشترین تاثیر را در بین دیگر عامل‌ها دارد به طوری که این عامل به جز لایه سطحی در تمامی لایه‌ها به عنوان پارامتر موثر انتخاب شده است و از دیگر عامل‌ها فقط وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی لایه‌ای که تونل در آن حفر شده است در نتایج واکاوی حساسیت به عنوان پارامتر حساس انتخاب شده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نشست سطحی بیش‌تر تحت تاثیر خصوصیات لایه خاکی که تونل در آن حفاری می‌شود، است.

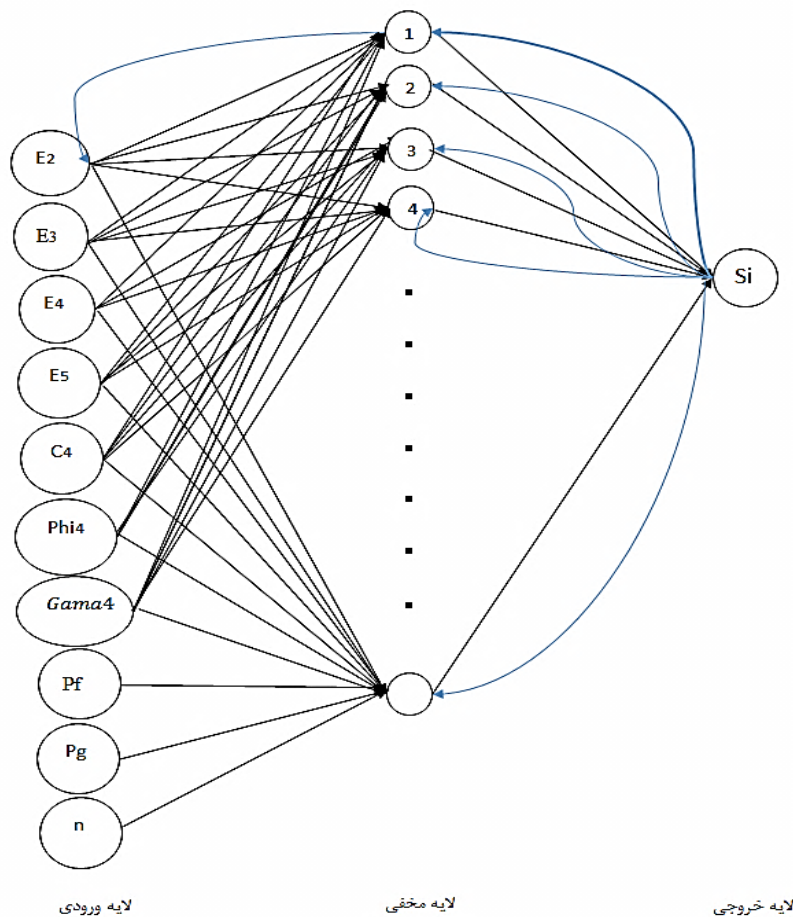
۴-۲-۵- متامدل برای داده خط ۲ مترو تبریز

در این بخش، متامدل با استفاده از ۹ عامل انتخاب شده در تحلیل حساسیت ساخته شده است. برای ساخت یک متامدل دقیق از ۱۵۰ نمونه تصادفی که با روش فرامکعب لاتین انتخاب شده‌اند، استفاده شده است. با مدلسازی عددی برای این ۱۵۰ نمونه در طی ۴۰ مرحله حفاری تونل، ۱۶۵۰ داده ورودی برای ساخت متامدل تولید شد. شکل (۴-۲۷) ساختار شبکه عصبی مصنوعی را برای ۱۰ داده ورودی نشان می‌دهد. عامل n نشانگر مرحله حفاری می‌باشد. برای دستیابی به یک راه حل مناسب، پیشنهاد شده است که مقادیر ورودی‌ها و خروجی‌ها نرمالیزه شوند [۴۱]، بنابراین داده‌ها مطابق رابطه (۴-۲) نرمالیزه شده‌اند.

$$X_{Norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} (0.9 - 0.1) + 0.1 \quad (4-2)$$

با استفاده از این رابطه تمامی داده‌ها در بازه ۰/۱ تا ۰/۹ قرار می‌گیرند، که در آن X_{norm} مقدار نرمال شده ی X ، X_{max} و X_{min} مقدار ماکزیمم و مینیمم این متغیر است. در مرحله بعد داده‌های آماده شده باید در سه گروه تربیت، آزمایش و اعتبارسنجی تقسیم بندی شوند. استراتژی کلی برای تعیین نرخ توزیع

مابین این نمونه‌های تربیت و آزمایش وجود ندارد. اگرچه به منظور جلوگیری از اغتشاش یک مقدار داده هم باید به مرحله اعتبارسنجی اختصاص یابد. بنابراین بعد از امتحان نسبت‌های مختلف بین تعداد داده در این سه گروه، نرخ ۱۵٪-۱۵٪-۷۰٪ به ترتیب برای تربیت، آزمایش و اعتبارسنجی انتخاب شد.



شکل ۴-۲۷- معماری شبکه عصبی مصنوعی به کار رفته در متامدل

بعد از طراحی شبکه عصبی مصنوعی، تعداد نوروها در لایه مخفی باید تعیین شوند. بنابراین بعد از چندین بار آزمون و خطا با مقادیر مختلف نوروهای مخفی، تعداد ۴۰ نورو برای معماری شبکه انتخاب شد. برای نشان دادن عملکرد شبکه عصبی از دو گزینه $rRMSE^1$ (ریشه میانگین مربع خطا نسبی) و R^2

¹ Relative Root Mean Square Error

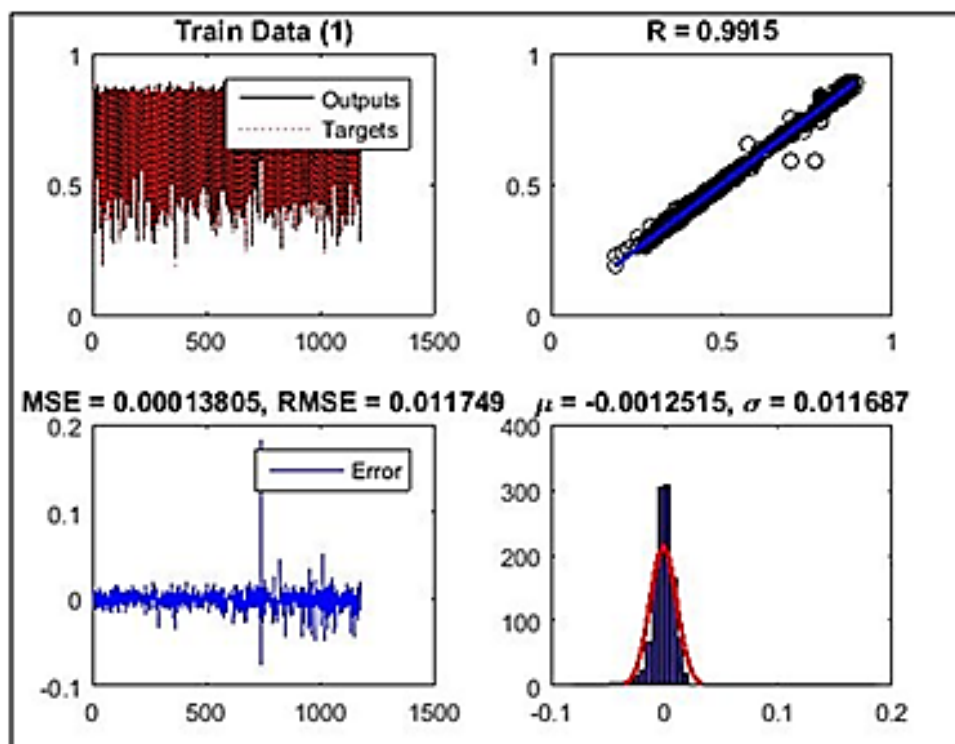
² Regression rate

(ضریب همبستگی) استفاده شده است که این مقادیر در برآورد صحت عملکرد شبکه عصبی مصنوعی بسیار معمول می‌باشند. این مقادیر مطابق رابطه‌های (۴-۳) و (۴-۴) محاسبه می‌شوند.

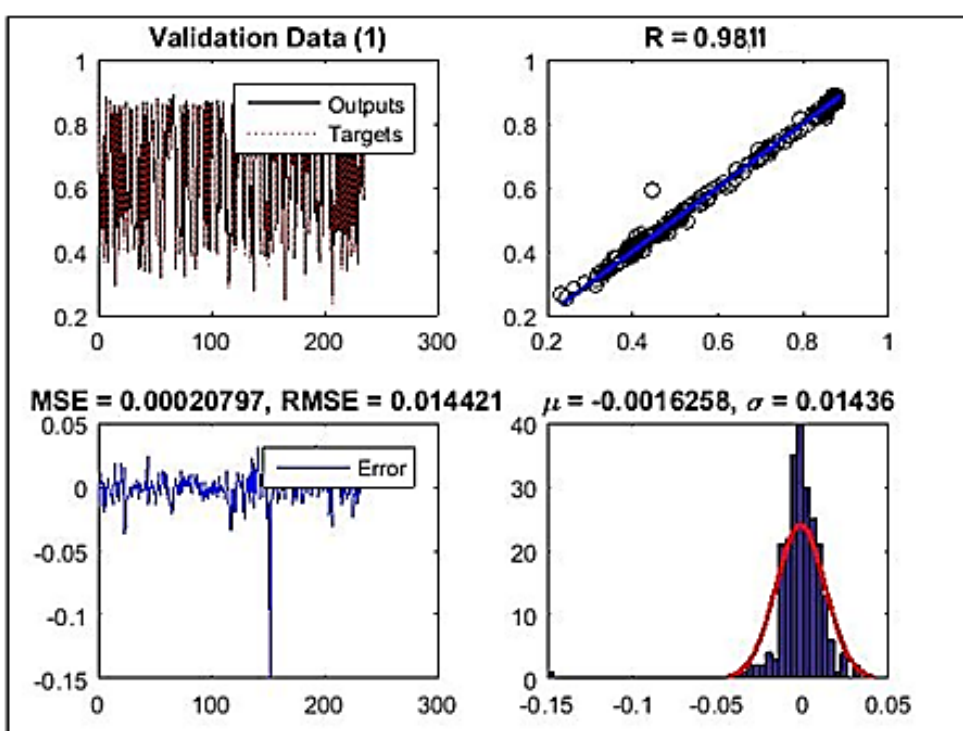
$$rRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N \left(\frac{x - x'}{x'} \right)^2} \quad (4-3)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (x - x_{mean})^2] - [\sum_{i=1}^N (x - x')^2]}{[\sum_{i=1}^N (x - x_{mean})^2]} \quad (4-4)$$

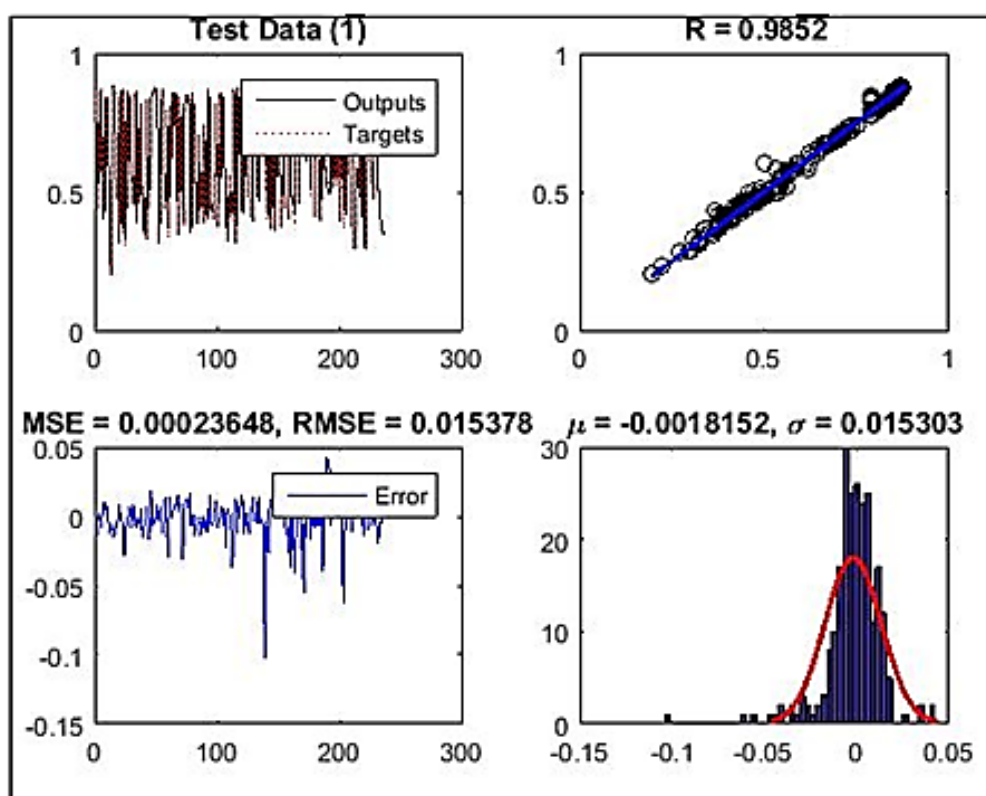
x مقدار اندازه گیری شده، x' مقدار پیش‌بینی شده، x_{mean} مقدار میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و N تعداد داده‌ها می‌باشد. شکل (۴-۲۸) نتایج به‌دست آمده از شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد. هم‌چنان که در شکل نشان داده شده است، تطابق خوبی مابین داده ورودی و داده هدف در سه مرحله تربیت، آزمایش و اعتبارسنجی دیده می‌شود به طوری که مقدار R^2 حدود ۹۹٪ و $RRMSE$ در حدود ۱/۵٪ می‌باشد.



(a)



(b)

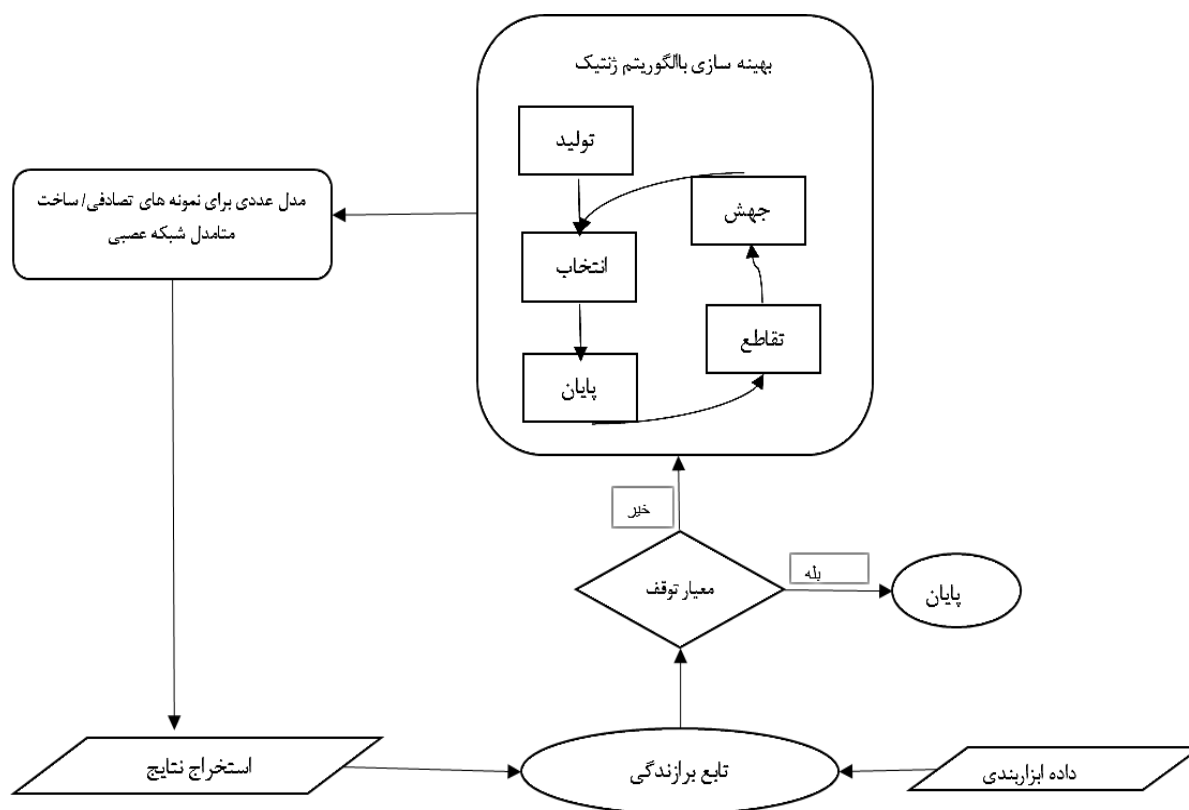


(c)

شکل ۴-۲۸- نتایج (a) داده تربیت (b) داده اعتبارسنجی (c) داده آزمایش

۴-۲-۶- واکاوی برگشتی

به منظور تعیین مقادیر عامل‌های مدل که نشست به دست آمده از آن‌ها تطابق خوبی با نشست‌های اندازه‌گیری داشته باشد از واکاوی برگشتی استفاده شده است. شکل (۴-۲۹) روند انجام واکاوی برگشتی را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل می‌توان دید شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک به‌وسیله تابع برازندگی ترکیب شده است که تابع به میزان خطای یادگیری شبکه عصبی مصنوعی پسخور بستگی دارد. تابع برازش برای این واکاوی مطابق رابطه (۴-۳) است.



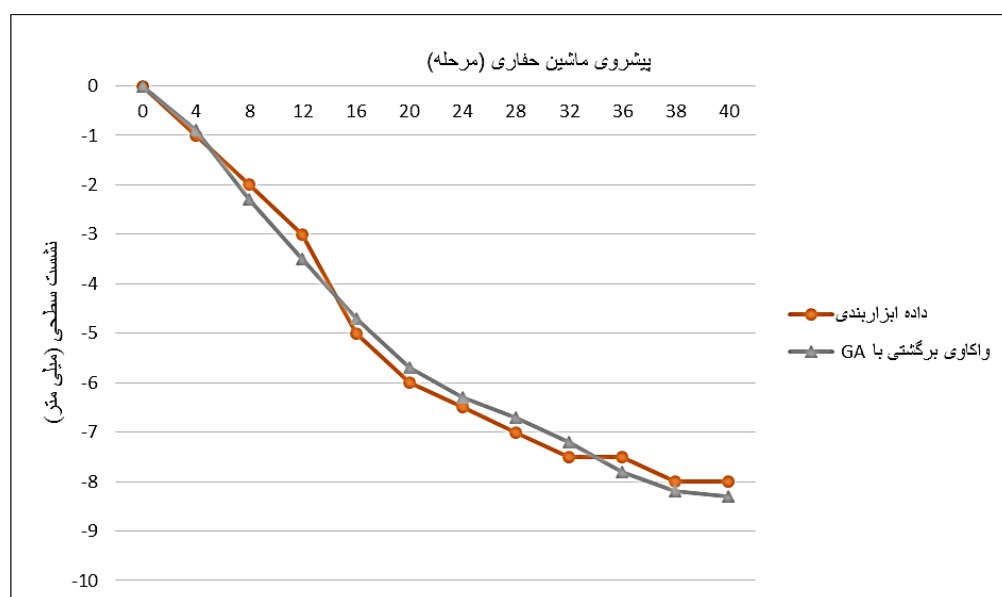
شکل ۴-۲۹- روند انجام واکاوی برگشتی با ANN-GA

در الگوریتم ژنتیک، تعداد جمعیت، نرخ تقاطع، نرخ جهش، خطای مینیمم و تعداد تکرار باید به دقت تعیین شوند. بنابراین مقادیر مناسب برای تعداد جمعیت چندین بار مورد آزمایش قرار گرفت و بهترین مقدار انتخاب شد. بقیه عامل‌های الگوریتم نیز با روش آزمون و خطا انتخاب شد. این عامل‌ها در جدول (۹-۴) ارائه شده است.

جدول ۹-۴- عامل‌های الگوریتم ژنتیک	
مقدار	عامل
	تعداد
۵۰	جمعیت
	نرخ
۷۰	تقاطع (/)
	نرخ
۳۰	جهش (/)
	تعداد
۱۰۰	تکرار

بعد از تنظیم متا مدل، به منظور تعیین عامل‌های ژئوتکنیکی در نقطه کنترلی براساس داده نشست سطحی، الگوریتم ترکیبی ANN-GA استفاده شده است. بازه عامل‌های ژئوتکنیکی براساس دفترچه ژئوتکنیکی موجود انتخاب شده است و مطابق جدول (۴-۷) است. الگوریتم بهترین پاسخ را بعد از ۳۳ تکرار و با جمعیت اولیه ۵۰ نشان داد.

شکل (۴-۳۰) مقایسه مابین نشست‌های اندازه‌گیری شده در سطح و مقادیر پیش‌بینی شده آن‌ها با استفاده از متا مدل را در نقطه کنترلی بعد از شناسایی عامل‌های ژئوتکنیکی را نشان می‌دهد. عامل‌های ژئوتکنیکی مشخص شده با واکاوی برگشتی به ترتیب وزن مخصوص لایه پنجم برابر ۲۲۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته لایه سوم برابر ۱۵ مگا پاسکال، مدول الاستیسیته لایه چهارم برابر ۱۱۰ مگا پاسکال، مدول الاستیسیته لایه پنجم برابر ۶۳ مگا پاسکال، مدول الاستیسیته لایه ششم برابر ۶۶ مگا پاسکال، چسبندگی لایه پنجم برابر ۳۶ کیلو پاسکال و ضریب اصطکاک داخلی لایه پنجم برابر ۲۲ می‌باشد. مقادیر فشار سینه کار و فشار تزریق هم به ترتیب ۸۵ و ۱۶۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۳۰- مقایسه نشست در مقابل مراحل پیشروی برای داده ابزاربندی و متامدل بعد از واکاوی برگشتی

۴-۲-۷- استفاده از واکاوی برگشتی در هدایت دستگاه حفاری

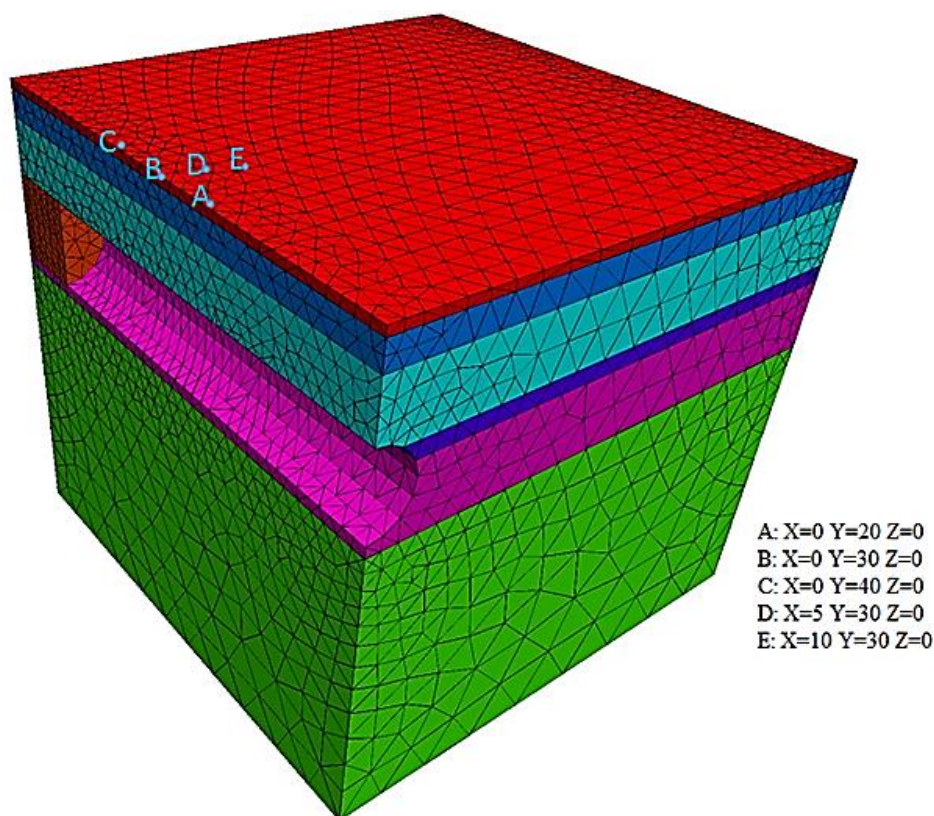
در فاز طراحی براساس نتایج آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی و همچنین تجربیات مهندسی، مقادیر اولیه‌ای برای عامل‌های ژئوتکنیکی مناطق مابین گمانه‌ها در نظر گرفته می‌شود و میزان نشست براساس این مقادیر پیش‌بینی می‌شود. مقادیر این عامل‌ها در جدول (۴-۱۰) آمده است. در شکل (۴-۳۱ الف) موقعیت پنج نقطه در مدل عددی مشخص شده است. در این مرحله با استفاده از این عامل‌های ژئوتکنیکی پیش‌بینی نشست سطحی برای هر پنج نقطه با استفاده از شبکه عصبی و بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی انجام شده است. در مرحله بعدی برای بهینه کردن مقدار نشست‌ها به اندازه مقدار مجاز، واکاوی برگشتی برای تعیین عامل‌های عملیاتی به کار رفته است.

جدول ۴-۱۰- خصوصیات ژئوتکنیکی لایه های خاک در نظر گرفته در فاز طراحی

لایه ها	نوع خاک	ضخامت (متر)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	نسبت پواسون	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی
۱	مواد پرکردنی	۱	۱۶۱۰	۳۰	۰/۳۵	۰	۳۲
۲	CL-ML	۳	۱۵۸۰	۱۲/۵	۰/۴۱	۹	۲۳
۳	ML	۷/۳	۱۵۲۰	۱۵	۰/۳۸	۷	۲۷
۴	SM	۱/۸	۱۸۷۰	۳۵	۰/۳۵	۷	۳۲
۵	CL-ML	۷/۹	۲۱۱۰	۳۰	۰/۳۷	۱۵	۲۷
۶	SM	۲۹	۲۰۳۰	۷۵	۰/۳۳	۹	۳۴

مقدار نشست مجاز در این پروژه ۱۰ میلی متر براساس نوع ساختمان‌های سطحی است [۱۱۶]. بنابراین، برای رسیدن به نشست مجاز، واکاوی برگشتی با استفاده از الگوریتم ANN-GA انجام و مقادیر ۱۰۰ و ۱۹۰ کیلو پاسکال به ترتیب برای فشار سینه کار و فشار تزریق به دست آمد. مطابق اشکال (۳۱-۴ (ب-ج)) برای هر پنج نقطه، تطابق خوبی مابین نتایج شبیه‌سازی عددی و متا مدل از نشست سطحی وجود دارد. اگرچه مطابق همین اشکال، ماکزیمم نشست سطحی در هر پنج نقطه به میزان مجاز نرسیده است و این نشان دهنده کارایی مدل بهینه شده برای تعیین نشست سطحی با پیشرفت TBM است. باید توجه داشت که با این که هدف بهینه سازی در هر پنج نقطه به دست آمده است و میزان

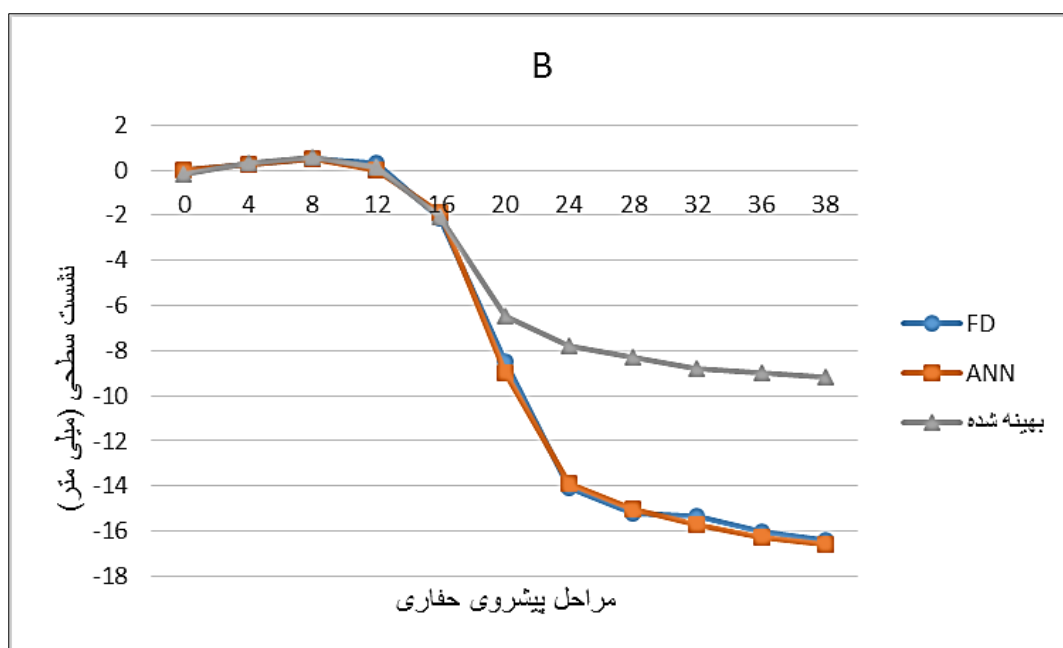
نشست سطحی در هر پنج نقطه کمتر از ۱۰ میلی متر برآورد شده است. اما میزان پارامترهای عملیاتی برآورد شده دارای تاثیر منفی در جابه‌جایی پنج نقطه کنترلی دارد به طوری که باعث ایجاد بالاآمدگی در نقاط D, C و E شده است. با توجه به این که متا مدل ساخته شده بر این فرض استوار است که پارامترهای عملیاتی برای کل مقطع مدل عددی ساخته شده ثابت در نظر گرفته شده است ولی در واقعیت پارامترهای عملیاتی قابلیت تغییر در مراحل حفاری را دارند لذا توصیه می‌شود برای فائق آمدن به این مشکل در ساخت متامدل، از مدل عددی استفاده شود که قابلیت تغییر عوامل عملیاتی در هر مرحله (متغیر با زمان) را نیز داشته باشد [۲].



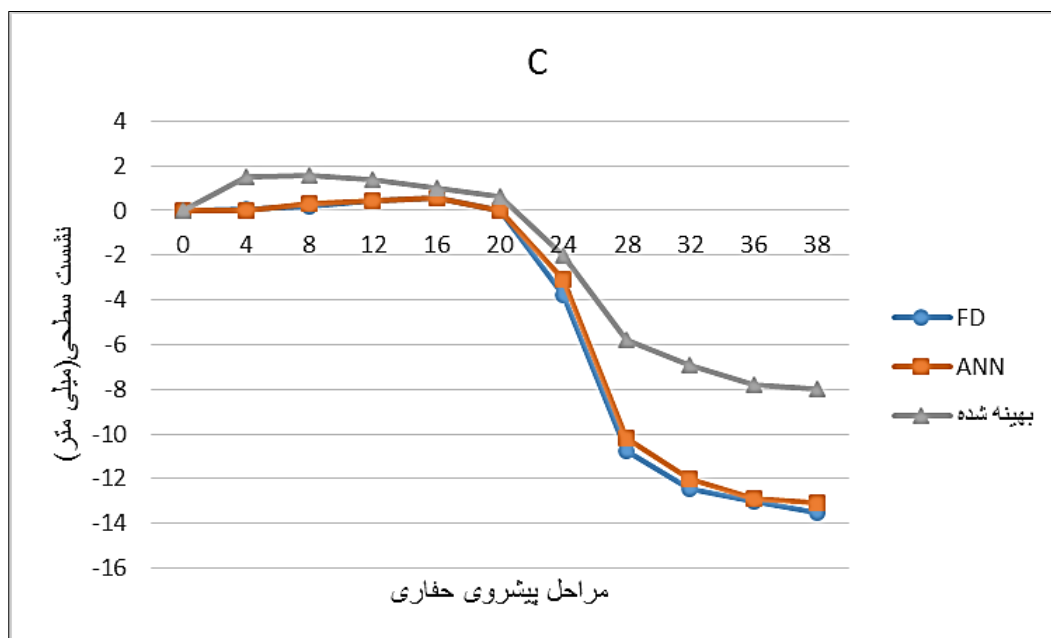
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)



(ث)



(ج)

شکل ۴-۳۱-الف) مدل سه بعدی و نقاط اندازه گیری شده در آن، (ب-ج) نتایج شبیه سازی نشست در ۵ نقطه اندازه گیری بعد از بهینه سازی عامل های عملیاتی

۴-۲-۸- مقایسه نتایج برای دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات

در این بخش، عملکرد دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات برای واکاوی برگشتی عامل های ژئوتکنیکی بررسی شده است. شش تجزیه و تحلیل برگشت با جمعیت اولیه مختلف برای هر دو الگوریتم انجام شد. در این تجزیه و تحلیل نه عامل بر اساس نشست سطح اندازه گیری شده در نقطه کنترل بهینه سازی شد. عامل های به کار رفته در الگوریتم ازدحام ذرات در جدول (۴-۱۱) آمده است.

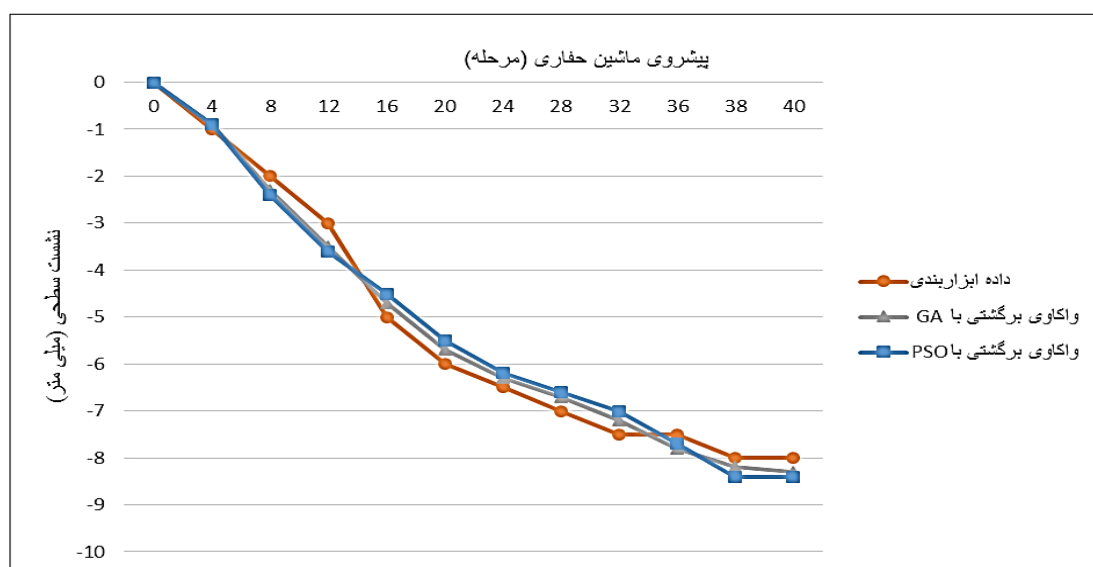
جدول ۴-۱۱- عامل های الگوریتم PSO	
مقدار	عامل های PSO
۱	Cl
۱/۸	Sl
۰/۹	W
۱۰۰	ماکزیمم مقدار تکرار

بررسی‌ها نشان داد که الگوریتم ژنتیک خطای کمتری در همه جمعیت‌های اولیه نشان می‌دهد، ولی میزان خطا در هر دو الگوریتم بسیار نزدیک و با اختلاف کم می‌باشد. از سوی دیگر، زمان مورد نیاز برای محاسبات برای الگوریتم ازدحام ذرات همیشه کمتر از الگوریتم ژنتیک است، اما این زمان در مجموع برای هر دو الگوریتم کمتر از ۵ دقیقه است و در مکانیسم تحلیل برگشتی در تونلسازی ماشینی مدت زیادی در نظر گرفته نمی‌شود. جدول (۴-۱۲) نتایج استفاده از دو الگوریتم در جمعیت اولیه‌های مختلف بر اساس میزان خطا از مقدار نشست مورد نظر و زمان لازم برای آنالیز برگشتی برآورد را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۲- نتایج واکاوی برگشتی با GA و PSO

تعداد جمعیت اولیه	میزان خطا		زمان (ثانیه)	
	GA (%)	PSO (%)	GA	PSO
۲۰	۸/۸۲	۸/۹۹	۱۴۱/۵۳	۱۲۳/۵۴
۳۰	۷/۹۶	۸/۰۲	۱۶۳/۷۶	۱۳۳/۱۳
۴۰	۶/۸۴	۷/۰۹	۲۰۹/۰۲	۱۴۳/۵۷
۵۰	۵/۶۵	۶/۹۷	۲۱۷/۳۵	۱۵۳/۵۴
۶۰	۵/۷۳	۵/۹۶	۲۲۳/۱۲	۱۶۴/۱۲
۷۰	۵/۸۵	۶/۵۴	۲۴۸/۱	۱۷۴/۶۳

با استفاده نتایج بدست آمده در هر الگوریتم، میزان نشست سطحی در نقطه کنترلی در برابر مراحل پیشرفت TBM مورد بررسی قرار گرفت که در شکل (۴-۳۲) نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۲- نمودار نشست سطحی در برابر مراحل پیشروی ماشین حفاری برای سه حالت ابزاربندی، بعد از واکاوی برگشتی با GA و PSO

۴-۳- جمع بندی

در این فصل دو مطالعه موردی انجام شده براساس موضوع رساله ارائه شده است. در مطالعه موردی اول قسمتی از خط ۷ مترو تهران برای ساخت متامدل و پیش‌بینی نشست سطحی بیشینه انتخاب شده است. به دلیل انجام تمامی شبیه‌سازی‌ها در کامپیوتر دو هسته‌ای و طولانی شدن زمان انجام، از مدل ساده شده در ابعاد کوچک و تعداد عامل کمتر استفاده شده است تا عملکرد تمامی کدهای تهیه شده بررسی و صحت سنجی شود. در بخش دوم فصل، مطالعه موردی دوم که مربوط به خط ۲ مترو تبریز است به تفصیل بررسی شده است. در این مطالعه سعی شده است مدل عددی با جزئیات بیشتر تهیه شود و تمامی واکاوی‌ها شامل واکاوی حساسیت، تولید متامدل و واکاوی برگشتی با عامل‌های بیشتری انجام شود. هر دو بررسی نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی توانایی بسیار خوبی برای استفاده به عنوان متا مدل را دارد و در آخر فصل عملکرد دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات در واکاوی برگشتی عامل‌های ژئوتکنیکی بررسی شده است. نتایج نشان دادند که هر دو الگوریتم قابلیت خوبی برای کاربرد در واکاوی برگشتی در پیش‌بینی نشست در تونلسازی ماشینی را دارند.

فصل پنجم

نتایج و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

مطالعه حاضر به منظور بررسی عملکرد متا مدل شبکه عصبی برای پیش بینی نشست سطحی ناشی از تونلسازی ماشینی EPB با استفاده از شبیه سازی عددی سه بعدی $FLAC^{3D}$ و بر اساس داده‌های نظارتی بدست آمده در حین ساخت انجام شده است. بررسی برای دو مطالعه موردی خط ۷ مترو تهران و خط ۲ مترو تبریز انجام شده است.

۵-۲- نتایج موردی

- در مطالعه موردی خط ۷ مترو تهران، قسمت‌های مختلف فرآیند شامل فشارسینه‌کار، فشار تزریق، سپر، پوشش در مدل به صورت ساده سازی شده در نظر گرفته شد. به منظور مدل‌سازی فرآیند تونلسازی از ابعاد کمینه مدل که توسط روتریگرز پیشنهاد شده است، استفاده شد. مدت زمان اجرای این مدل در کامپیوتر دو هسته‌ای در حدود ۴ ساعت می باشد. همچنین به منظور انجام واکاوی برگشتی از الگوریتم بهینه سازی PSO استفاده شده است. برای تونلسازی ماشینی، از تحلیل حساسیت کلی برای ارزیابی عامل‌های اصلی که پاسخ مدل را کنترل می‌کنند، استفاده شد. بدین منظور، از بین عامل‌های فرآیند تونلسازی ۶ عامل وزن مخصوص لایه‌ی اول و دوم، چسبندگی سه لایه و فشار سینه کار به دلخواه انتخاب و از بین آن‌ها عامل‌های موثر با استفاده از روش تاثیر مقدماتی موریس انتخاب شدند. شبکه عصبی مصنوعی به عنوان متا مدل و با استفاده از ۱۰۰ عدد شبیه‌سازی عددی تونلسازی ماشینی از داده‌های تصادفی به روش فرامکعب لاتین آموزش داده شد. عامل‌های مواد خاک و عامل‌های فرآیند تونل زنی ماشینی به منظور ارائه مجموعه داده‌های قابل اعتماد برای متا مدل در شبیه‌سازی‌های عددی در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از این بررسی به قرار زیر است:

۱- بررسی‌های حاصل از واکاوی حساسیت نشان دادند که سه عامل شامل فشار سینه کار، چسبندگی و وزن مخصوص خاک لایه دوم به عنوان حساس‌ترین عامل‌ها در نتیجه شبیه‌سازی که حداکثر نشست سطحی است، می‌باشند.

۲- نتایج عددی مطالعه نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر شبیه‌سازی می‌تواند ارزیابی مکانی - زمانی از نشست سطحی با قابلیت اطمینان معقول (بیش از ۹۸٪) را پیش‌بینی کند.

۳- استفاده از PSO - ANN برای به‌روزرسانی مدل و بهینه‌سازی عامل‌ها برای تعیین عامل‌های عملیاتی فرایند تونل زنی منجر به کاهش نشست‌های سطحی با انجام واکاوی برگشتی شد. برخلاف روش استاندارد برای واکاوی برگشتی، که در آن برای هر حالت جدید از عامل‌ها باید مدلسازی انجام شود و این فرآیند چندین ساعت طول خواهد کشید، فرایند شناسایی با متا مدل در چند دقیقه انجام شد.

۴- با استفاده از الگوریتم تهیه شده، بعد از شناسایی عامل‌های ژئوتکنیکی خاک برای دستیابی به نشست سطحی موردنظر واکاوی برگشتی بر روی عامل‌های عملیاتی انجام شد و مقدار فشارسینه کار و فشار تزریق پیش‌بینی شد. با استفاده عوامل عملیاتی بهینه شده مقدار نشست سطحی تطابق خوبی با نشست سطحی اندازه‌گیری شده نشان داد.

- در مطالعه موردی دوم به منظور بررسی عملکرد متامدل از داده‌های خط ۲ مترو تبریز استفاده شد. جزئیات مدلسازی بیشتر، ابعاد مدل بزرگتر و درگیر بودن تعداد لایه‌های خاک بیشتر در فرآیند تونلسازی مدل عددی این مطالعه متفاوت مطالعات موردی اول است. به منظور تعیین عامل‌های موثر در میزان نشست سطحی، ۱۷ عامل ژئوتکنیکی لایه‌های خاک و ۲ عامل عملیاتی شامل فشار سینه کار و فشار تزریق انتخاب شدند. برای کاهش تعداد شبیه‌سازی‌های لازم و همچنین در نظر گرفتن موثرترین عامل‌ها، از تحلیل حساسیت کلی استفاده شد. بنابراین، با استفاده از روش Morris در تجزیه و تحلیل حساسیت کلی، ۹ عامل از بین ۱۹ عامل به عنوان موثرترین عامل‌ها انتخاب شدند و برای ساخت متامدل استفاده شدند. ۱۵۰ شبیه‌سازی با استفاده

از تولید داده‌های تصادفی برای این ۹ عامل انجام شد. تمام شبیه‌سازی‌ها توسط کامپیوتر ۳۲ هسته ای در مرکز کامپیوتر دانشگاه ارومیه انجام شد و متامدل شبکه عصبی مصنوعی با این تعداد شبیه‌سازی تولید شد. با استفاده از کدهای نوشته شده در نرم افزار $FLAC^{3D}$ ، تمامی این شبیه‌سازی‌ها به صورت خودکار انجام و نتایج ذخیره شدند. الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک که در نرم افزار MATLAB نوشته شده است، برای انجام واکاوی برگشتی و به روزرسانی عامل‌ها بر اساس داده های ابزاربندی استفاده شد. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱- متامدل شبکه عصبی تولید شده با نتایج شبیه‌سازی عددی در پیش بینی نشست سطحی عملکرد بسیار خوبی نشان داد، به طوری که برای هر سه گروه داده تربیت، آزمایش و اعتبارسنجی ضریب همبستگی در حدود ۹۹٪ به دست آمد.

۲- با استفاده از الگوریتم ANN-GA و انجام واکاوی برگشتی و شناسایی عامل‌های ژئوتکنیکی، نتایج بدست آمده برای نشست سطحی با داده‌های ابزاربندی تفاوت بسیار کمی نشان دادند به طوری که همگرایی الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن تابع برازندگی میزان خطا شبکه عصبی، در زمانی در حدود چند دقیقه و با میزان خطایی در حدود ۵/۶۵ درصد بدست آمد. که این نشانگر کارایی بسیار خوب این روش در پیش بینی حداکثر نشست سطح در تونلسازی ماشینی با TBM است.

۳- برای دستیابی به عامل‌های عملیاتی مناسب برای مدل با عامل‌های ژئوتکنیکی پیش‌بینی شده در فاز طراحی، برای پنج نقطه مشخص شده در مدل واکاوی برگشتی با همین الگوریتم انجام شد. با کاربرد شبکه عصبی برای هر پنج نقطه و مبنا قراردادن میزان نشست سطحی کمتر از نشست مجاز (۱۰ میلی‌متر در این پروژه) و برآورد فشار تزریق و فشارسینه‌کار با واکاوی برگشتی برای نقطه کنترلی و کاربرد این فشارها برای بقیه نقاط، میزان نشست سطحی برای هر پنج نقطه کمتر از نشست مجاز پیش‌بینی شد.

۴- به منظور بررسی عملکرد دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات، واکاوی برگشتی برای تعیین عامل‌های ژئوتکنیکی با هر دو الگوریتم انجام شد. بررسی‌ها برای مقادیر مختلف جمعیت اولیه انجام شد چرا

که مهم‌ترین تفاوت این دو الگوریتم در تولید جمعیت جدید از جمعیت اولیه است. معیار تصمیم‌گیری در این قسمت میزان خطای نشست برآورد شده و داده ابزاربندی و زمان لازم برای انجام واکاوی برگشتی در نظر گرفته شد. نتایج نشان دادند که الگوریتم ژنتیک میزان خطای کمتری را نشان می‌دهد ولی مدت زمان لازم برای واکاوی برگشتی در این الگوریتم در حدود دو برابر الگوریتم ازدحام ذرات می‌باشد. در کل با توجه به کوتاه بودن زمان واکاوی برگشتی در هر دو الگوریتم (در حد چند دقیقه) در مقایسه با زمان واقعی فرآیند تونلسازی و اختلاف کم خطای محاسبه شده، هر دو الگوریتم برای استفاده در واکاوی برگشتی فرآیند تونلسازی مناسب می‌باشند.

۵-۳- نتایج کلی

- ۱- متا مدل شبکه عصبی ساخته شده با نتایج شبیه‌سازی عددی قابلیت پیش‌بینی نشست در زمانی کوتاه در حد چند ثانیه با قابلیت اعتماد بیش از ۹۸٪ را دارد. با استفاده از این متا مدل می‌توان نشست را در هر زمان پیشروی تونل و در هر مکانی پیش‌بینی کرد.
- ۲- به طور کلی فرآیند واکاوی برگشتی با استفاده از متامدل حتی با کامپیوتر معمولی در زمانی بسیار کوتاه و در حد چند دقیقه انجام شد. در حالی که میزان زمان لازم برای یک شبیه‌سازی با کامپیوتر ۲هسته‌ای مشابه در حدود ۱۰ ساعت طول کشید.
- ۳- با استفاده از واکاوی برگشتی متا مدل می‌توان عوامل ژئوتکنیکی و عملیاتی را به روز رسانی کرد و برای تعیین بازه پارامترهای عملیاتی با دید دقیق‌تری اقدام نمود.

۵-۴- پیشنهادها

- بررسی عملکرد متا مدل برای پیش‌بینی بار وارد بر سگمنت
- بررسی عملکرد متا مدل در پدیده چلیدن (Squeezeing)
- استفاده از روش واکاوی حساسیت جامع کمی Sobol و مقایسه نتایج با روش کیفی Morris
- ساخت متامدل براساس قابلیت تغییر عوامل عملیاتی نسبت به زمان در گام‌های مختلف حفاری

- استفاده از روش ماشین بردار پشتیبانی (SVM) در ساخت متا مدل

- استفاده از مدل‌های رفتاری متناسب با محیط خاکی و به روز رسانی پارامترها با استفاده از واکاوی

برگشتی متا مدل

مراجع

1. Ninić, J., Computational strategies for predictions of the soil-structure interaction during mechanized tunneling, PhD thesis, Rohle University of Bochum, 2016.
2. Ninić, J., S. Freitag, and G. Meschke, A hybrid finite element and surrogate modelling approach for simulation and monitoring supported TBM steering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017. 63: p. 12-28.
3. Simpson, Timothy W, Poplinski, JD, Koch, Patrick N, Allen, Janet K, Metamodels for computer-based engineering design: survey and recommendations. *Engineering with computers*, 2001. 17(2): p. 129-150.
4. Meier, Jörg, and Tom Schanz. *Benchmarking of optimization algorithms*. book, Bauhaus-University, 2015.
5. Kleijnen JP. Design and analysis of simulation experiments. In *International Workshop on Simulation 2015 Sep 21* (pp. 3-22). Springer, Cham.
6. Friedman LW. *The simulation metamodel*. Springer Science & Business Media; 2012 Dec 6.
7. Hölter R, Zhao C, Mahmoudi E, Lavasan AA, Datcheva M, König M, Schanz T. Optimal measurement design for parameter identification in mechanized tunneling. *Underground Space*. 2018 Mar 1;3(1):34-44.
8. Ninić, J. and G. Meschke, Model update and real-time steering of tunnel boring machines using simulation-based meta models. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015. 45: p. 138-152.
9. Kasper T, Meschke G. A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. 2004 Dec 10;28(14):1441-60.
10. Nagel, F. and G. Meschke, An elasto-plastic three phase model for partially saturated soil for the finite element simulation of compressed air support in tunnelling. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 2010. 34(6): p. 605-625.
11. Feng XT, Chen BR, Yang C, Zhou H, Ding X. Identification of visco-elastic models for rocks using genetic programming coupled with the modified particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006 Jul 1;43(5):789-801.
12. Calvello, M. and R.J. Finno, Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis. *Computers and Geotechnics*, 2004. 31(5): p. 410-424.
13. Barla, G., Applications of numerical methods in tunnelling and underground excavations: Recent trends. *Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future*, 2016: p. 29-40.
14. ITASCA CONSULTING GROUP, *FLAC-Fast lagrangian analysis of continua (Version 6.0) user's manual [R]*, 2008, Minneapolis.
15. Jing, L., A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003. 40(3): p. 283-353.
16. Meng, Guotao, Jianrong Xu, Anchi Shi, and Christine Detournay. "Griddle generation of FLAC3D models for the Baihetan Dam project." (2020).

17. Lambrughi, A., L.M. Rodríguez, and R. Castellanza, Development and validation of a 3D numerical model for TBM–EPB mechanised excavations. *Computers and Geotechnics*, 2012. 40: p. 97-113.
18. Manual, F.U.s., Itasca Consulting Group, 1992, Minneapolis.
19. Das, B.M. and N. Sivakugan, *Fundamentals of geotechnical engineering*. 2016: Cengage Learning.
20. Ercelebi, S., H. Copur, and I. Ocak, Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM. *Environmental Earth Sciences*, 2011. 62(2): p. 357-365.
21. Do, N.A., Numerical analyses of segmental tunnel lining under static and dynamic loads, PhD thesis, 2014, Lyon, INSA.
22. Bilotta, E., G. Russo, and C. Viggiani. Ground movements and strains in the lining of a tunnel in cohesionless soil. in *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground. Proceedings of the 5th international conference of TC 28 of the ISSMGE, the Netherlands, 15-17 june 2005*. 2006.
23. Guglielmetti V, Grasso P, Mahtab A, Xu S, editors. *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control*, book, Taylor & Francis; 2008 Jan 7.
24. Blom, C., E. Van der Horst, and P. Jovanovic, Three-dimensional structural analyses of the shield-driven “Green Heart” tunnel of the high-speed line south. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999. 14(2): p. 217-224.
25. Mollon, G., D. Dias, and A.-H. Soubra, Probabilistic analyses of tunneling-induced ground movements. *Acta Geotechnica*, 2013. 8(2): p. 181-199.
26. Golpasand, M.R.B., M.R. Nikudel, and A. Uromeihy, Specifying the real value of volume loss (V L) and its effect on ground settlement due to excavation of Abuzar tunnel, Tehran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016. 75(2): p. 485-501.
27. Schalkoff, R.J., *Artificial neural networks*. book. 1997: McGraw-Hill New York.
28. National Highway Institute (US), Parsons, Brinckerhoff, Quade & Douglas. *Technical manual for design and construction of road tunnels-civil elements*. AASHTO; 2010.
29. Widrow, B. and M.A. Lehr, 30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and backpropagation. *Proceedings of the IEEE*, 1990. 78(9): p. 1415-1442.
30. Demuth HB, Beale MH, De Jess O, Hagan MT. *Neural network design*. Martin Hagan; 2014 Sep 1.
31. Holland, J.H., *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. 1992: MIT press.

32. Buscema, M., Back propagation neural networks. *Substance use & misuse*, 1998. 33(2): p. 233-270.
33. Hill, M.C. and C.R. Tiedeman, Effective groundwater model calibration: with analysis of data ,sensitivities, predictions, and uncertainty. 2006: John Wiley & Sons.
34. Pianosi, F., et al., Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 2016. 79: p. 214-232.
35. B.Hamraz, A.Akbarpour, and b.Porreza ,Uncertainty analysis of MODFLOW input parameters by GLUE method (case study: Birgand plain). *Journal of Soil and Water Protection Research*, 2016. 22(6): p. 61-79.
36. Saltelli, A., Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk analysis*, 2002. 22(3): p. 579-590.
37. Helton, J.C. and F.J. Davis, Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2003. 81(1): p. 23-69.
38. McKay, M.D ,R.J. Beckman, and W.J. Conover, Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 1979. 21(2): p. 239-245.
39. Packham, N. and W.M. Schmidt, Latin hypercube sampling with dependence and applications in finance. Available at SSRN 1269633, 2008.
40. Lee DH, Choi YT, Kim DH, Jo BW. A study on the seismic design methods for precast concrete lining (PCL). *Underground Space-the 4th Dimension of Metropolises-Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál (eds)© 2007*. 2007.
41. Hasanipanah M, Armaghani DJ, Amnieh HB, Abd Majid MZ, Tahir MM. Application of PSO to develop a powerful equation for prediction of flyrock due to blasting. *Neural Computing and Applications*. 2017 Dec;28(1):1043-50.
42. Garg, H., A hybrid PSO-GA algorithm for constrained optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*, 2016. 274: p. 292-305.
43. Mirjalili, S., Genetic algorithm, in *Evolutionary algorithms and neural networks*. 2019, Springer. p. 43-55.
44. Yang H, Hasanipanah M, Tahir MM, Bui DT. Intelligent prediction of blasting-induced ground vibration using ANFIS optimized by GA and PSO. *Natural Resources Research*. 2020 Apr;29(2):739-50.
45. Ninić, J., J. Stascheit, and G. Meschke. Simulation-based steering for mechanized tunneling using an ANN-PSO-based meta-model. in *Proceedings of the third*

- international conference on soft computing technology in civil, structural and environmental engineering. Stirlingshire (Scotland). 2013.
46. Karakus, M., Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis .Tunnelling and Underground Space Technology, 2007. 22(1): p. 47-56.
 47. Möller, S. and P. Vermeer, On numerical simulation of tunnel installation. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008. 23(4): p. 461-475.
 48. Sagaseta C, Sanchez-Alciturri JM, Gonzalez C, Lopez A, Gomez J, Pina R. Soil deformations due to the excavation of two parallel caverns. InTwelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering {Proceedings) The Netherlands Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering; Ministry of Transport, Public Works and Water Management; AP van den Berg Machinefabriek; Fugro NV; GeoDelft; Holland Railconsult 1999 (No. Volume 3).
 49. Addenbrooke, T. and D. Potts, Twin tunnel construction—ground movements and lining behaviour. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, 1996. 441.
 50. Leca, E., Analysis of NATM and shield tunneling in soft ground, 1989, Virginia Polytechnic Institute and State University.
 51. Chehade, F.H. and I. Shahrour, Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008. 23(2): p. 210-214.
 52. Hefny, A., H. Chua, and J. Zhao. Parametric studies on the interaction between existing and new bored tunnels. in tunneling and underground space technology.Underground space for sustainable urban development. Proceedings of the 30TH ITA-AITES world tunnel congress Singapore, 22-27 may 2004. 2004.
 53. Mirhabibi, A. and A. Soroush, Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012. 29: p. 40-51.
 54. Chakeri, H., et al., Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling .Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011. 70(3): p. 439-448.
 55. Hasanpour R, Chakeri H, Ozcelik Y, Denek H. Evaluation of surface settlements in the Istanbul metro in terms of analytical, numerical and direct measurements. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2012 Aug;71(3):499-510.
 56. Mašin, D., 3D modeling of an NATM tunnel in high K₀ clay using two different constitutive models. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2009. 135(9): p. 1326-1335.

57. Hejazi, Y., D. Dias ,and R. Kastner, Impact of constitutive models on the numerical analysis of underground constructions. *Acta Geotechnica*, 2008. 3(4): p. 251-258.
58. Kasper, T. and G. Meschke, A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling. *Computers and Geotechnics*, 2006. 33(4): p. 234-247.
59. Conti, R., G.M. Viggiani, and F. Perugini, Numerical modelling of centrifuge dynamic tests of circular tunnels in dry sand. *Acta Geotechnica*, 2014. 9(4): p. 597-612.
60. Komiya K, Soga K, Akagi H, Hagiwara T, Bolton MD. Finite element modelling of excavation and advancement processes of a shield tunnelling machine. *Soils and Foundations*. 1999 Jun 15;39(3):37-52.
61. Lee, K. and R. Rowe, Finite element modelling of the three-dimensional ground deformations due to tunnelling in soft cohesive soils: Part 2—results. *Computers and Geotechnics*, 1990. 10(2): p. 111-138.
62. Swoboda, G. and A. Abu-Krishna, Three-dimensional numerical modelling for TBM tunnelling in consolidated clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999. 14(3): p. 327-333.
63. Dias, D., R. Kastner, and M. Maghazi, Three dimensional simulation of slurry shield tunnelling. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 2000: p. 351-356.
64. Chakeri, H., Y. Ozcelik ,and B. Unver, Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013. 36: p. 14-23.
65. Do, N., D. Dias, and P. Oreste, Numerical analysis of segmental tunnel lining under seismic loads, 2015.
66. Meng, F.-y., R.-p. Chen, and X. Kang, Effects of tunneling-induced soil disturbance on the post-construction settlement in structured soft soils. *Tunnelling and Underground Space Technology, Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, 2018. 80: p. 53-63.
67. Jallow ,A., C.-Y. Ou, and A. Lim, Three-dimensional numerical study of long-term settlement induced in shield tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019. 88: p. 221-236.
68. Cao, B.-T., S. Freitag, and G. Meschke, A hybrid RNN-GPOD surrogate model for real-time settlement predictions in mechanised tunnelling. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 2016. 3(1): p. 5.

69. Shi, J., J. Ortigao, and J. Bai, Modular neural networks for predicting settlements during tunneling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998. 124(5): p. 389-395.
70. Suwansawat, S. and H.H. Einstein, Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006. 21(2): p. 133-150.
71. Santos, O.J. and T.B. Celestino, Artificial neural networks analysis of Sao Paulo subway tunnel settlement data. *Tunnelling and underground space technology*, 2008. 23(5): p. 481-491.
72. An, H., Sun, J., Hu, X. Study on intelligent method of prediction by small samples for ground settlement in shield tunnelling. in 30th ITA-AITES World Tunnel Congress, C38. 2004. Singapore.
۷۳. یآوری، س. مهدوی، م. پیش بینی نرخ نفوذ تی بی ام با استفاده از شبکه های عصبی، کنفرانس مهندسی معدن ایران ۱۳۸۳.
74. Zhou, Y. and X. Wu, Use of neural networks in the analysis and interpretation of site investigation data. *Computers and Geotechnics*, 1994. 16(2): p. 105-122.
75. Agrawal, G., J. Frost, and J.-L. Chameau. Data Analysis and Modelling using an Artificial Neural Network. in *Proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation Engineering- International Society for soil mechanics and foundation engineering*. 1994. AA BALKEMA.
76. Ellis GW, Yao C, Zhao R, Penumadu D. Stress-strain modeling of sands using artificial neural networks. *Journal of geotechnical engineering*. 1995 May;121(5):429-35.
77. Penumadu, D. and R. Zhao, Modeling drained triaxial compression behavior of sand using ANN, *Numerical Methods in Geotechnical Engineering* .2000 .p. 71-87.
78. Penumadu D, Jin-Nan L, Chameau JL, Arumugam S. Rate dependent behavior of clays using neural networks. In *International conference on soil mechanics and foundation engineering 1994* (pp. 1445-1448).
79. Habibagahi, G. and A. Bamdad, A neural network framework for mechanical behavior of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003. 40(3): p. 684-693.
80. Kiefa, M.A., General regression neural networks for driven piles in cohesionless soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998. 124(12): p. 1177-1185.
81. Goh, A.T., Seismic liquefaction potential assessed by neural networks. *Journal of Geotechnical engineering*, 1994. 120(9): p. 1467-1480.

82. Shahin, M.A., H.R. Maier, and M.B. Jaksa, Closure to “Predicting Settlement of Shallow Foundations Using Neural Networks” by Mohamed A. Shahin, Holger R. Maier, and Mark B. Jaksa. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003. 129(12): p. 1175-1177.
83. Habibagahi, G., Post-construction settlement of rockfill dams analyzed via adaptive network-based fuzzy inference systems. *Computers and Geotechnics*, 2002. 29(3): p. 211-233.
84. Hornik, K., M. Stinchcombe, and H. White, Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural networks*, 1989. 2(5): p. 35۳۶۶-۹
85. Park JK, Cho DH, Hossain S, Oh J. Assessment of settlement profile caused by underground box structure installation with an artificial neural network model. *Transportation research record*. 2018 Dec;2672(52):258-67.
86. Chen RP, Zhang P, Kang X, Zhong ZQ, Liu Y, Wu HN. Prediction of maximum surface settlement caused by earth pressure balance (EPB) shield tunneling with ANN methods. *Soils and Foundations*. 2019 Apr 1;59(2):284-95.
87. Moghaddasi, M.R. and M. Noorian-Bidgoli, ICA-ANN, ANN and multiple regression models for prediction of surface settlement caused by tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018. 79: p. 197-209.
88. Ghiasi, V. and M. Koushki, Numerical and artificial neural network analyses of ground surface settlement of tunnel in saturated soil. *SN Applied Sciences*, 2020. 2: p. 1-14.
89. Zhang K, Lyu HM, Shen SL, Zhou A, Yin ZY. Evolutionary hybrid neural network approach to predict shield tunneling-induced ground settlements. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020 Dec 1;106:103594.
90. Mahmoodzadeh A, Mohammadi M, Daraei A, Ali HF, Al-Salihi NK, Omer RM. Forecasting maximum surface settlement caused by urban tunneling. *Automation in Construction*. 2020 Dec 1;120:103375.
91. Kleunen, J.P., Regression metamodels for generalizing simulation results. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 1979. 9: p. 93-9۶
92. Fonseca, D.J., D.O. Navarrese, and G.P. Moynihan, Simulation metamodeling through artificial neural networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2003. 16(3): p. 177-183.
93. Hussain, M.F., R.R. Barton, and S.B. Joshi, Metamodeling :radial basis functions, versus polynomials. *European Journal of Operational Research*, 2002. 138(1): p. 142-154.
94. Ankenman, B., B.L. Nelson, and J. Staum, Stochastic kriging for simulation metamodeling. *Operations research*, 2010. 58(2): p. 371-382.

95. Kleijnen, J.P. and R.G. Sargent, A methodology for fitting and validating metamodels in simulation. *European Journal of Operational Research*, 2000. 120(1): p. 14-29.
96. Poropudas, J. and K. Virtanen, Game-theoretic validation and analysis of air combat simulation models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 2010. 40(5): p. 1057-1070.
97. Cheng, R.C. and C.S. Currie. Optimization by simulation metamodeling methods. in *Proceedings of the 36th conference on Winter simulation*. 2004. Winter Simulation Conference.
98. Gioda, G. and S. Sakurai, Back analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1987. 11 : (6)p. 555-583.
99. Gens, A., A. Ledesma, and E. Alonso, Estimation of parameters in geotechnical backanalysis—II. Application to a tunnel excavation problem. *Computers and Geotechnics*, 1996. 18(1): p. 29-46.
100. Miranda, T.F., Geomechanical parameters evaluation in underground structures: artificial intelligence, bayesian probabilities and inverse methods. 2007.
101. Song, Z.-p., A.-n. Jiang, and Z.-b. Jiang, Back analysis of geomechanical parameters using hybrid algorithm based on difference evolution and extreme learning machine. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015. 2015.
102. Wu C, Hong Y, Chen Q, Karekal S. A modified optimization algorithm for back analysis of properties for coupled stress-seepage field problems. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019 Dec 1;94:103040.
103. Most, T. and C. Bucher, Probabilistic analysis of concrete cracking using neural networks and random fields. *Probabilistic engineering mechanics*, 2007. 22(2): p. 219-229.
104. Papadrakakis, M. and N.D. Lagaros, Reliability-based structural optimization using neural networks and Monte Carlo simulation. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2002. 191(32): p. 3491-3507.
105. Hurtado, J.E., Analysis of one-dimensional stochastic finite elements using neural networks. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2002. 17(1): p. 35-44.
106. Khaledi, K., T. Schanz, and S. Miro, Application of metamodeling techniques for mechanized tunnel simulation. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014. 44(1): p. 45-54.
107. Freitag S, Cao BT, Ninić J, Meschke G. Hybrid surrogate modelling for mechanised tunnelling simulations with uncertain data. *International Journal of Reliability and Safety*. 2015;9(2-3):154-73.

108. Zhang, J.r., G. Huang, and X.m. Gou, An optimum metamodel for safety control of operational subway tunnel during underpass shield tunneling. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018. 25(8): p. e2195.
109. Zhao C, Lavasan AA, Barciaga T, Zarev V, Datcheva M, Schanz T. Model validation and calibration via back analysis for mechanized tunnel simulations–The Western Scheldt tunnel case. *Computers and Geotechnics*. 2015 Sep 1;69:601-14.
110. Heidari S.R, Zare S, Mirzaui N,H, Foroughi M. Numerical study of face pressure effect on surface settlement in soft ground mechanized tunneling-A case study: Tehran metro line 7. *Tunneling and undergroundspace Enhineering*,1(1):p 57-67.
111. Cao, X. and S. Yan, Numerical analysis for earthquake dynamic responses of tunnel with different lining rigidity based on finite element method. *Information Technology Journal*, 2013. 12(1 :۳p. 2599-2604.
112. SCE, Engineering geology report of East-West section (Tehran Metro Line 7). SCE.(In Persian), 2011.
113. SCE, Monitoring report of of East-West section (Tehran Metro Line 7). SCE.(In Persian), 2012.
114. Pianosi, F., F. Sarrazin ,and T. Wagener, A Matlab toolbox for global sensitivity analysis. *Environmental Modelling & Software*, 2015. 70: p. 80-85.
۱۱۵. مهندسين مشاور ايمن سازان، گزارش مطالعات ژئوتكنيك مسير و پارکينگ شرقی -TURL2-IM- ۱۳۹۷ ،LINE-REP-GEO-G-001-03
۱۱۶. مهندسين مشاور ايمن سازان، گزارش نشست سنجی مسير تونل حدفاصل بازار اميرکبير، TURL2-IM-MET-REP-INT-S-0200 ۱۳۹۷.
117. ENGINEERS UA. Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock. US army corps of engineers. 1997 May.

Abstract

Numerical simulation of tunneling with multiple uncertainties data is generally time consuming, which requires a lot of computational effort with a large number of concepts and factors. In order to make reasonable predictions in the short run time and with maintenance in machine tunneling, alternative models are very suitable for describing the dependence of the response with geotechnical and operational uncertainty of tunneling. In this research, after modeling the components and factors involved in the tunneling process using the finite difference method with FLAC^{3D} software and validating the model with monitoring data, sensitivity analysis on geotechnical and operational factors of tunnel construction with earth pressure balance machine is applied. The whole research process has been done on two case studies of Tehran Metro Line 7 and Tabriz Metro Line 2. To perform global sensitivity analysis, random samples were generated using Latin Hypercube method and numerical simulations were performed for these samples. Then, using elementary effect Morris method, sensitivity analysis was performed on the input factor and effective factors were selected. The results show that the meta-model reduces the computational effort of the numerical simulation process and allows real-time prediction of the tunnel construction process in a pre-selected part of the tunnel project. The numerical results of the study confirm that the simulated ANN network can predict the surface settlement with reasonable reliability (more than 98%). Then, the combination of particle swarm optimization algorithm (PSO) for the first case study and genetic optimization algorithm (GA) for the second case study with neural network were used to perform back analysis and identify geotechnical and operational factors. Unlike the standard method for back analysis, in which each new case of factors must be modeled and this process will take several hours, the process of identification and back analysis with the meta-model was performed in a few minutes. This process was used to predict the operating factors (face pressure and grouting pressure) to achieve the optimal surface settlement rate. Finally, the performance of genetic optimization and particle swarm algorithms for optimizing geotechnical factors was investigated and compared. Dual algorithm analysis showed that each dual algorithm with an error rate of about 6% can be used in the back analysis by meta model.

Keywords: Mechanized tunneling, meta model, particle swarm optimization algorithm, Tehran metro line 7, genetic optimization algorithm, Tabriz metro line 2.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Rock Mechanics

Prediction of surface settlement due to EPB mechanized tunneling machine by the Meta model method

By: Leila Nikakhtar

Supervisor:

Dr. Shokrollah Zare

Dr. Hossein Mirzaei Nasirabad

Advisor:

Dr. Behnam Ferdosi

September 2021