



آنالیز حساسیت جامع در پیش بینی نشست سطحی ناشی از فرآیند تونل سازی مکانیزه

لیلا نیک اختر^۱، شکرالله زارع^{۱*}، حسین میرزائی نصیرآباد^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران

۲- دانشگاه صنعتی سهند، آذربایجان شرقی، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۴

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۰۲

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۱۱

کلمات کلیدی:

منا مدل

تونل سازی مکانیزه

FLAC^{3D}

تأثیر مقدماتی Morris

فرامکعب لاتین

خلاصه: آنالیز حساسیت جامع یک ابزار مفید و کاربردی برای شناسایی عدم قطعیت پارامترهای ورودی می باشد که به طور گسترده در علوم مختلف از جمله شبیه سازی مهندسی مورد استفاده قرار می گیرد. آنالیز حساسیت یکی از مراحل اساسی ساخت منا مدل یا مدل جایگزین است که با شناسایی پارامترهای موثر در امر تونل سازی باعث کاهش زمان و میزان محاسبات لازم می شود. در این تحقیق آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی و عملیاتی ساخت تونل با ماشین حفاری مکانیزه از نوع تعادلی فشار زمین در خاک انجام شده است. به همین منظور فرآیند حفاری تونل با استفاده از روش تفاضل محدود در نرم افزار FLAC^{3D} به صورت سه بعدی مدل شد و مدل عددی ساخته شده با استفاده از داده مانیتورینگ حاصل از مسیر شرقی - غربی خط ۷ مترو تهران اعتبارسنجی گردید. سپس با استفاده از روش تأثیر مقدماتی Morris، آنالیز حساسیت بر روی ۶ پارامتر ورودی انجام و ۳ پارامتر فشار سینه کار، وزن مخصوص و چسبندگی لایه‌های خاکی که تونل در آن حفر شده است، به عنوان پارامترهای موثر و حساس در نتیجه نهایی شبیه سازی که در این تحقیق نشست سطحی حداکثر می باشد، انتخاب شد. در ادامه تعداد ۱۰۰ عدد نمونه تصادفی برای پارامترهای موثر با استفاده از روش فرامکعب لاتین تولید و بعد از شبیه سازی عددی برای آن‌ها، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی نشست سطحی حداکثر پیش بینی شد. نتایج پیش بینی با منا مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل عددی ساخته شده با داده در فاز طراحی حدود ۹۸٪ تطابق نشان دادند.

۱- مقدمه

برای توسعه شهرسازی در کنار حفظ محیط زیست، نیاز به سیستم‌های حمل و نقل سریع، مناسب و فن آوری‌های ساخت آن‌ها می باشد. در این میان، اثرات ناشی از ساخت تونل در محیط شهری به سازه‌های سطحی آسیب پذیر باید در حد کمینه نگه داشته شوند. تونل سازی مکانیزه فن آوری ساخت بسیار رایجی است که اجازه پیشروی تونل در بازه‌ی وسیعی از محیط‌های خاکی با کمترین آسیب به اطراف را می دهد. به منظور ایجاد نشست‌های کم و اطمینان از فرآیند ساخت مناسب و سالم، تونل سازی مکانیزه جدید نیازمند مدل‌های عددی منطقی و قابل اعتماد در طول مراحل طراحی و ساخت می باشد. استفاده از این مدل‌ها در محیط‌های دشوار ژئوتکنیکی و همچنین شرایط مرزی خاص که پیشروی ماشین حفاری در این ساختارها مشکل می باشد، بسیار حیاتی است.

از ملزومات اولیه یک برنامه عددی قابل اعتماد، ارزیابی صحیح از اندرکنش میان اجزای تونل سازی، محیط اطراف و سازه‌های موجود است.

حل این مسائل، نیازمند شکل گیری یک تحقیق اساسی در همه جنبه‌های فرآیند تونل سازی مکانیزه شامل بررسی فشار نگهدارنده سینه کار در سپرهای EPB^۱، تزریق، رابطه‌ی اندازه گیری‌ها با مقادیر پیش بینی شده، استحکام پوشش ناپیوسته، تأثیر تزریق ما بین زمین و پوشش و در نهایت کاربرد آن در زمان واقعی اجرای فرآیند تونل سازی با کمک مدل‌های عددی پیوسته است. شکل ۱ اجزای مختلف ماشین حفاری تونل EPB و مدل عددی معادل ساخته شده از آن را نشان می دهد [۱].

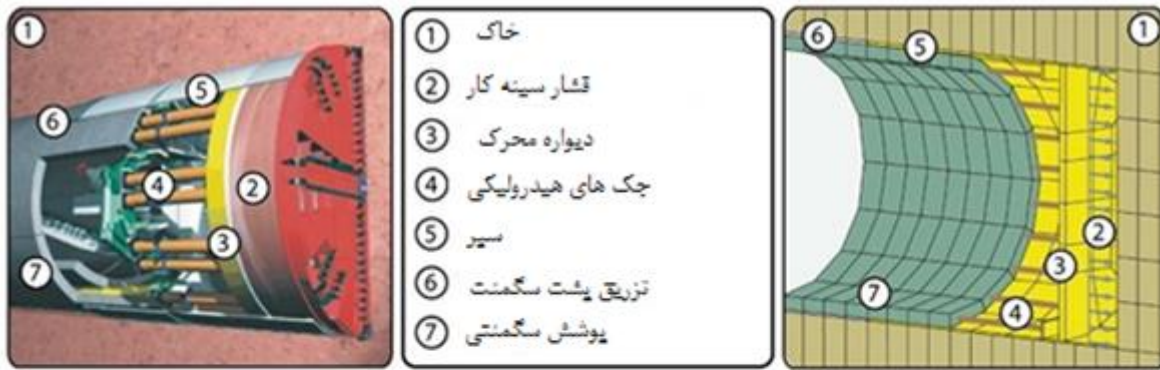
در مرحله طراحی همه پیش‌بینی‌ها از مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی بر اساس اطلاعات محدود از بررسی‌های مکانیک خاک، آب شناسی و زمین شناسی می باشد. تعداد گمانه‌ها برای به دست آوردن داده‌های لازم محدود است. بر اساس نوع طرح و اطلاعات زمین شناسی موجود، گمانه‌ها در هر ۵۰ تا ۳۰۰ متر در طول مسیر تونل حفاری می شوند [۲]. در حالی که نیمرخ کامل حاصل برون‌یابی مابین مناطق اکتشاف شده می باشد. در صورت وجود تغییرات خاص در شرایط خاک و برآورد نادرست پارامترهای خاک، این

1 Earth pressure balance

* نویسنده عهده دار مکاتبات: zare@shahroodut.ac.ir

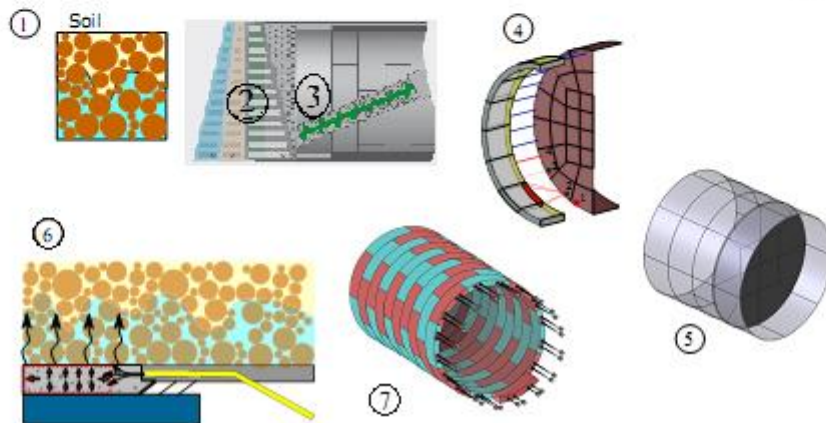
حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





(الف)

(ب)



شکل ۱. اجزای مدل شبیه سازی تونل سازی سپری: (الف) توصیف ماشین، (ب) مدل عددی [۱]

Fig. 1. Shield Tunnel Modeling Components: (a) Machine description, (b) numerical model

هدف از مدل باید انجام شود. حساسیت ورودی‌ها شدیداً به بازه پارامترهای انتخاب شده و هدف از تخمین بستگی دارد. در مورد پروژه تونل سازی، در گزارش‌های مکانیک خاکی یک بازه قابل قبول از پارامترها که خصوصیات مواد، شرایط آب و خاک، توپوگرافی و غیره را توصیف می‌کنند، وجود دارد که برای تحلیل‌های حساسیت می‌توانند استفاده شوند. نتایج این تحلیل‌ها سپس برای ساخت متامدل بر اساس پارامترهای حساس استفاده می‌شود [۶].

تحلیل حساسیت^۱ از جمله مفاهیم کلیدی در پویایی سیستم‌ها است که همه تحلیل‌گران نیازمند درک عمیق و به کارگیری صحیح آن هستند. روش‌های مختلفی برای انجام تحلیل حساسیت وجود دارد. این روش‌ها در دو دسته مهم محلی^۲ و جامع^۳ دسته بندی می‌شوند. فنون تحلیل حساسیت نقش مهمی در مدل سازی توسعه یافته در دو دهه اخیر دارد [۷-۹].

- 1 Sensitivity analysis
- 2 Local
- 3 Global

عدم قطعیت مستقیماً به پیش‌بینی مدل‌های شبیه سازی شده براساس این داده‌ها منتقل می‌شود. اگر شرایط موجود در زیرزمین از پیش‌بینی در فاز طراحی متفاوت باشد، به هنگام رسانی پارامترهای زمین در مدل شبیه سازی لازم است تا از آن برای عکس‌العمل مناسب در حین فرآیند ساخت استفاده شود. از آنجایی که چنین تحلیل‌هایی نیازمند تعداد زیادی از شبیه سازی‌ها هستند، منابع کامپیوتری سریع برای آن لازم است [۳-۵].

امروزه در طراحی مهندسی استفاده از فنون آماری برای تقریب کدهای کامپیوتری سنگین رایج شده است که به این فنون متا مدل یا مدل جایگزین گفته می‌شود. از جنبه‌های ساخت مدل‌های جایگزین (متامدل) قابل اعتماد در فرآیند تونل سازی، سر و کار داشتن با پیچیدگی شرایط زمین شناسی، فرآیند ساخت و اندرکنش با سازه‌های موجود است. این پیچیدگی سیستم مستقیماً به مدل عددی منتقل می‌شود، بنابراین قبل از ساخت متامدل یک تحلیل حساسیت برای تعیین گروه پارامترهای مهم و حساس در خروجی

تونل های دایروی استفاده کردند. آن ها برای مدل سازی از روش FEM و نرم افزار ABAQUSE استفاده کردند [۱۳]. فنگ^۱ و همکارانش (۲۰۲۰) از آنالیز حساسیت کلی برای بررسی پارامترهای ژئوتکنیکی موثر در طراحی سیستم نگهداری تونل دایروی به منظور کاهش عدم قطعیت و استفاده در طراحی مبتنی بر عدم اطمینان استفاده کردند [۱۴].

شبیه سازی عددی حفاری مکانیزه توسط محققین بسیاری بررسی شده و هر کدام جنبه های تازه ای به این فرآیند افزوده اند. به عنوان مثال، بلوم^{۱۱} و همکارانش (۱۹۹۹) یک تحلیل المان محدود سه بعدی از ساختار تونل با استفاده از نرم افزار Ansys پیشنهاد کردند [۱۵]. لامبورگی و همکارانش^{۱۲} (۲۰۱۲) یک مدل سه بعدی با استفاده از کد تفاضل محدود FLAC^{3D} برای حفاری مکانیزه با استفاده از TBM^{۱۳} فشار تعادلی زمین انجام دادند که در این مدل جنبه های اصلی ساخت حفاری مکانیزه مانند ماشین سپری، پوشش بتنی، نگهداری سینه کار حفاری، بیش حفاری، تزریق پشت دنباله و فرآیند گیرش سیمان تزریق مد نظر قرار گرفته است [۱۶]. چاکری و همکاران (۲۰۱۳) نتایج جالبی از تاثیرات پارامترهای کلیدی و مهم مانند عمق تونل، فشار روباره، ابعاد تونل و فشار سینه کار را با استفاده از روش های تجربی، تئوری و عددی برای کنترل نشست سطحی ارائه داده اند [۱۷]. دیاس^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل سه بعدی از تونل منفرد با استفاده از روش تفاضل محدود در نرم افزار FLAC^{3D} تهیه کرده اند، که در آن اغلب المان های حفاری مکانیزه مانند شرایط اولیه در مرزهای مدل، شکل مخروطی سپر، فشار سینه کار، فشار حلقوی عمل کننده در سطح خاک در اتاقک پشت سینه کار، فشار حلقوی ایجادکننده جابه جایی مایع تزریق در سطح خاک و دنباله سپر، فشار تزریق در دنباله سپر، فرآیند سخت شونده گی تزریق و نیروی جک را در نظر گرفتند [۱۰]. لای^{۱۵} و همکارانش با استفاده از مدل سازی سه بعدی در نرم افزار FLAC به بررسی میزان نشست حاصل از حفاری تونل جدید در زیر تونل های موجود در خطوط متروی چین پرداختند. آن ها برای مدل سازی سه بعدی اکثر پارامترهای دخیل مانند فشار سینه کار، فشار تزریق، سپر و پوشش سگمنتی را در نظر گرفتند [۱۸].

در این تحقیق کاربرد متامدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی نشست سطحی حداکثر در پروژه خط ۷ مترو تهران در فرآیند تونل سازی

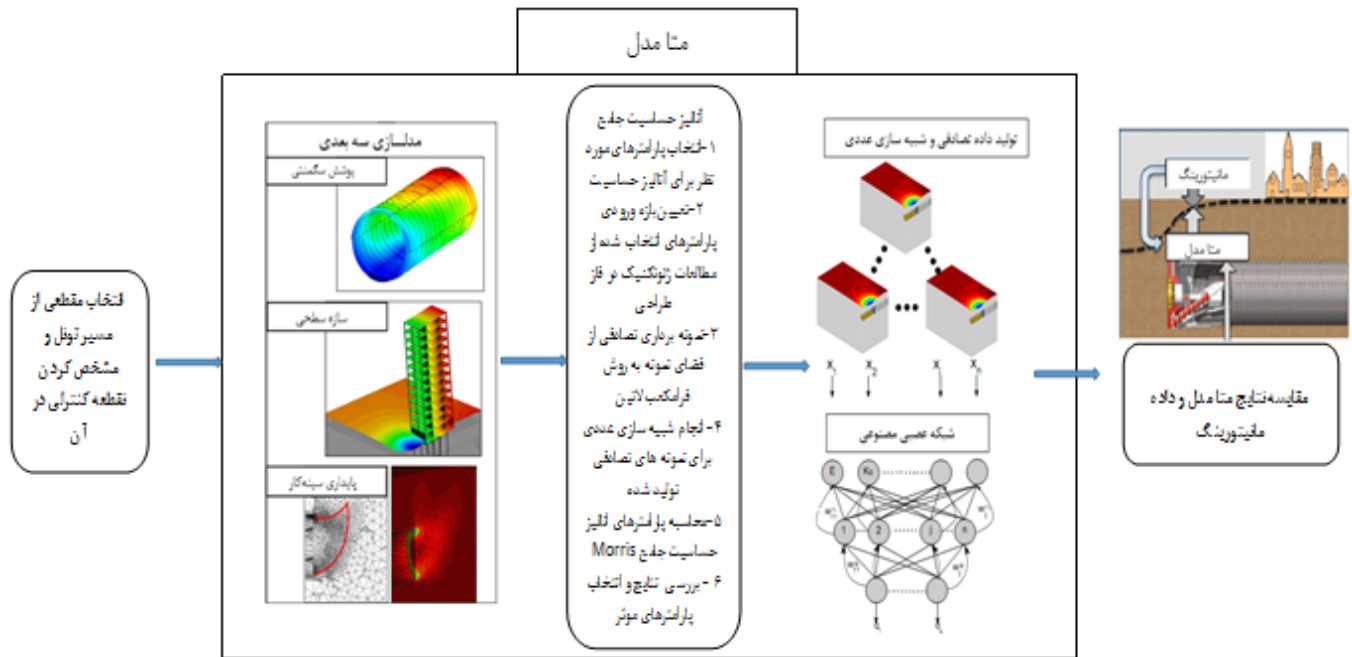
در سال های اخیر محققان مختلفی برای شناسایی پارامترهای موثر در زمینه متامدل از آنالیز حساسیت جامع استفاده کرده اند، نمونه هایی از کاربرد تحلیل حساسیت جامع در مکانیک خاک، برای اندازه گیری اهمیت پارامترهای داخل خاک، در تخمین پارامتر و بررسی شرایط مرزی وجود دارد [۱۰]. سانگ^۱ و همکارانش (۲۰۱۳) از آنالیز حساسیت جامع برای شناسایی پارامترهای موثر در مدل های هیدرولوژیکی استفاده کردند و در نهایت نتایج آن را برای ساخت متامدل با روش سطح پاسخ به کار بردند [۱۱]. میرو^۲ و همکارانش (۲۰۱۴) در کار تحقیقاتی خود دو روش واریانس^۳ و تاثیر مقدماتی^۴ را برای تحلیل حساسیت جامع استفاده کرده اند. هدف آن ها بررسی پارامترهای کلیدی خاک و شناسایی پارامترهای موثر در تونل سازی مکانیزه بود.

در یک کار تحقیقاتی دیگر، زائو و همکارانش^۵ (۲۰۱۵) با استفاده از آنالیز حساسیت جامع پارامترهای حساس در فرآیند تونل سازی مکانیزه در پروژه تونل اسچلد غربی را شناسایی کردند. آن ها شبیه سازی فرآیند تونل سازی را با استفاده از نرم افزار Plaxis به روش المان محدود انجام دادند و در ادامه، نشست در سطح زمین را با متامدل تجزیه متعامد همراه با تابع دایروی اساسی^۶ پیش بینی کردند [۱۲]. در

سال ۲۰۱۷ نینیچ و مسچکه^۷ برای ساخت متامدل، از شبکه عصبی مصنوعی همراه با الگوریتم بهینه سازی تراکم ذرات^۸ استفاده کردند. هدف از این کار به روز رسانی مدل مطابق داده مانیتورینگ به دست آمده در طول ساخت و بهینه سازی پارامترهای ماشین به منظور نگاه داشتن نشست سطحی در زیر بازه مورد قبول بود. در این کار به منظور کاهش حجم داده های شبیه سازی برای ساخت متامدل مربوطه، ابتدا پارامترهای موثر در فرآیند با روش آنالیز حساسیت جامع تعیین شد. آن ها همچنین در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که کاربرد این روش می تواند کمک شایانی در دستیابی به یک آنالیز برگشتی معتبر با کاهش تعداد پارامترهای دخیل داشته باشد [۲]. در سال ۲۰۱۹ نازم عبدولنریمان^۹ و همکارانش از آنالیز حساسیت جامع به روش Sobol برای شناسایی پارامترهای مهم و تاثیر گذار در تحلیل دینامیکی

10 Fang
11 Blom
12 Lambrughi
13 Tunnel Boring Machine
14 Dias
15 Lai

1 Song
2 Miro
3 Variance based
4 Elementary Effect
5 Zhao
6 ¹⁰ POD-RBF
7 Ninic & Meschke
8 PSO
9 Nazim Abdul Nariman



شکل ۲. مراحل انجام تحقیق
Fig. 2. Research steps

- سازی عددی با پارامترهای انتخاب شده
- ساخت معماری شبکه عصبی مصنوعی و استفاده از بانک داده ایجاد شده در مرحله ی قبل برای پیش بینی
- مقایسه نتایج با داده ماینورینگ

۲- آنالیز حساسیت جامع

روش های آنالیز حساسیت به دو دسته کلی، روش محلی و روش جامع تقسیم بندی می شوند. در روش تحلیل حساسیت محلی معمولاً پارامترهای مدل را به عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته و هدف از آن ارزیابی تاثیر عدم قطعیت یک پارامتر ورودی بر عملکرد مدل است. به عبارتی در این روش چگونگی تغییر عملکرد مدل با دور شدن آن از مقادیر بهینه یا مرجع پارامترها بررسی می گردد [۲۱]. روش تحلیل حساسیت جامع، هم پارامترهای مدل و هم اندرکنش این پارامترها را با سایر عوامل ورودی مدل در فرآیند شبیه سازی در نظر می گیرد [۲۲]. از دیدگاه نحوه تفسیر نتایج، روش های تحلیل حساسیت جامع به دو دسته کیفی و کمی تقسیم می شوند. در روش های کیفی یا تصویری، ارزیابی با بررسی بصری پیش بینی مدل یا ابزارهای تصویرسازی مخصوص مانند نمودارهای پراکنده یا نقطه ای، توزیع پسین پارامترهای ورودی انجام می شود. اما در روش های کمی هر یک از

مکانیزه با ماشین حفاری EPB مورد بررسی قرار گرفت. به منظور آنالیز حساسیت و شناسایی پارامترهای مهم و موثر در نتایج شبیه سازی (که در این تحقیق نشست سطحی حداکثر است) از روش آنالیز حساسیت جامع Morris استفاده شده است. تاکنون تمامی شبیه سازی های انجام شده برای ساخت متامدل در زمینه تونل سازی مکانیزه به روش المان محدود و با استفاده از نرم افزارهای ekate و Plaxis می باشد [۲۰ و ۱۹ و ۱۲ و ۱۳]. از این رو در تحقیق حاضر از روش تفاضل محدود و نرم افزار شناخته شده $FLAC^{3D}$ به منظور شبیه سازی عددی استفاده شد، تا عملکرد این روش عددی در صحت پیش بینی مولفه ی پاسخ (نشست سطحی) و کاربرد متامدل بررسی شود. به طور کلی مراحل انجام این تحقیق به صورت زیر می باشد که به صورت تصویری در شکل ۲ ارائه شده است:

- انتخاب مقطعی از مسیر تونل و ساخت مدل عددی سه بعدی برای آن با داده های اولیه از مرحله طراحی
- انتخاب بازه مناسب برای پارامترهای ورودی مورد نظر از دفترچه مطالعات ژئوتکنیک در فاز طراحی
- تولید داده تصادفی، انجام شبیه سازی عددی برای داده های تولید شده و آنالیز حساسیت
- انتخاب پارامترهای حساس و تولید داده تصادفی برای شبیه

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (EE_i^j - \mu_i)} \quad (3)$$

μ تاثیر همه جانبه پارامتر ورودی در پاسخ سیستم را تخمین می‌زند. σ تاثیر درجه بالای پارامتر ورودی یا همان اندرکنش بین پارامترهای ورودی را نشان می‌دهد. کامپولونگو^۳ 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.

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |EE_i^j| \quad (4)$$

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 [۲۴].

۲-۲- نمونه‌برداری تصادفی

روش‌های نمونه‌گیری نقش خوبی در تحلیل حساسیت مسائلی با تعداد زیادی پارامتر 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 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 [۲۵]. 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

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.

۲-۱- آنالیز حساسیت تاثیر مقدماتی Morris

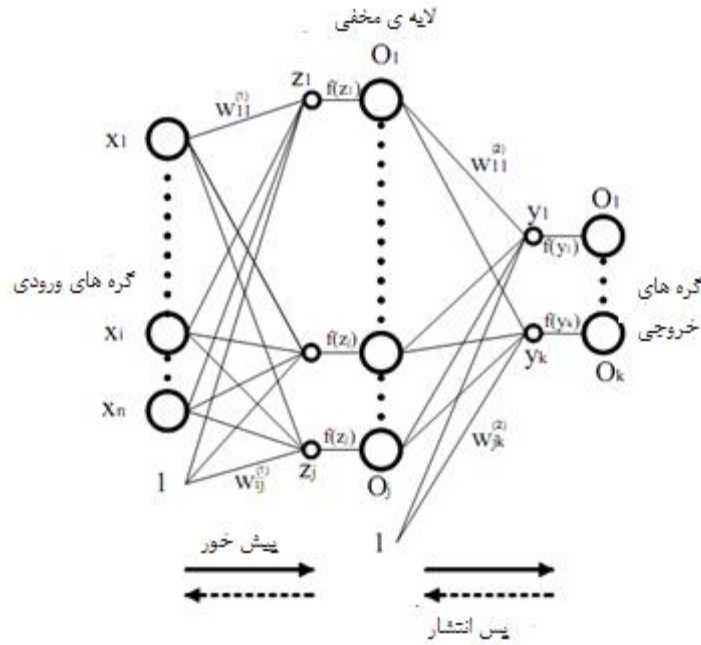
یکی از روش‌های آنالیز حساسیت جامع با تحلیل کیفی، روش تاثیر مقدماتی Morris است. در این روش، ورودی‌ها از لحاظ حساسیت در سه گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: ورودی‌هایی با تاثیرات قابل چشم‌پوشی، ورودی‌ها با تاثیرات خطی بزرگ بدون اندرکنش و ورودی‌هایی با تاثیرات غیرخطی و یا اندرکنش زیاد. استراتژی آزمایش به دو صورت یکی در زمان^۱ و همه در زمان^۲ می‌باشد. در روش همه در زمان، 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 پارامترهای ورودی درحالی که بقیه ثابت هستند، بررسی می‌شود [۲۳]. در روش آنالیز حساسیت Morris امکان استفاده از هر دو نوع استراتژی برای انجام آزمایش وجود دارد. برای یک مدل با k پارامتر 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 p سطح تقسیم‌بندی می‌شود. برای هر مقدار X تاثیر مقدماتی برای i امین فاکتور ورودی در j امین تکرار به صورت فرمول (۱) محاسبه می‌شود:

$$EE_i^j = \frac{Y(X_1; X_2, \dots, X_j + \Delta, \dots, X_k) - Y(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_k)}{\Delta} \quad (1)$$

که P تعداد فواصل X_i و Δ برابر $\left\{ \frac{1}{p-1}, \dots, 1 - \frac{1}{p-1} \right\}$ است [۲۴]. میزان تاثیردهی یک ورودی به خروجی، μ (میانگین) و σ (انحراف استاندارد) است که مطابق فرمول‌های (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند.

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

- 1 One at a time (OAT)
- 2 All at a time (AAT)



شکل ۳. ساختار اساسی یک شبکه عصبی مصنوعی [۲۸]

Fig. 3. The basic structure of an artificial neural network

می‌باشد [۲۸].
 با در نظر گرفتن همه گره‌های ورودی x_i ($i=1,2,\dots,n$) و گره‌های خروجی o_k ($k=1,2,\dots,m$) برای یک تعداد از الگوهای p ، می‌توان الگوریتم پس انتشار را در دو مرحله توصیف کرد: مرحله پیش‌خور که در ابتدا اجرا می‌شود و تابع فعال‌سازی را به مقادیر ورودی تبدیل و به لایه‌ی بعدی انتقال می‌دهد [۲۸].

$$o_k(x, w) = f \left(\sum_j w_{kj} f \left(\sum_i w_{ji} x_i \right) \right) \quad (5)$$

که در آن $f(\cdot)$ تابع فعال‌سازی می‌باشد. یکی از مشهورترین توابع فعال‌سازی برای شبکه پس‌انتشار، تابع سیگموئید است، که به صورت زیر تعریف می‌شود:

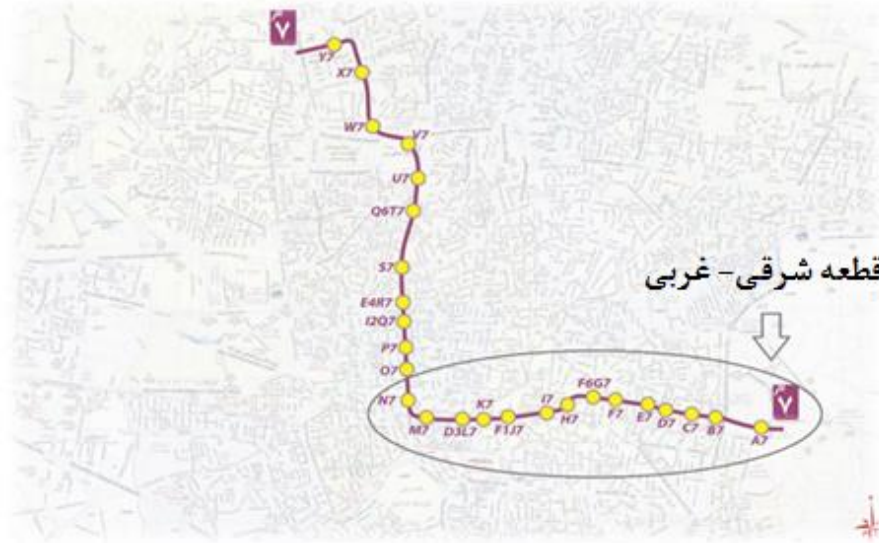
$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-cx}} \quad (6)$$

از فضای توزیع چند متغیره را فراهم می‌آورد [۲۶]. معمولاً توزیع پارامترهای ژئوتکنیکی به صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود [۲۷]، که در این تحقیق نیز، توزیع پارامترهای ژئوتکنیکی و عملیاتی به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است.

۳- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی نوعی مدل‌سازی ساده انگارانه از سیستم‌های عصبی واقعی هستند که کاربرد فراوانی در حل مسائل مختلف دارند. حوزه کاربرد این شبکه‌ها آن‌چنان گسترده است که از کاربردهای طبقه بندی گرفته تا کاربردهای نظیر درون‌یابی، تخمین، آشکارسازی و غیره را شامل می‌شود. شاید مهم‌ترین مزیت این شبکه‌ها، توانایی زیاد در کنار سهولت استفاده از آن باشد. شبکه عصبی پس انتشار^۱ یکی از پرکاربردترین شبکه‌ها در مسائل طبقه‌بندی، پیش‌بینی و شناسایی سیستم است. الگوریتم پس انتشار کمترین مقدار تابع خطا را در فضای وزن‌های سیناپسی با استفاده از روش شیب نزولی پیدا می‌کند. معماری کلی یک شبکه عصبی چندلایه مانند شکل ۳ شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه مخفی و یک لایه خروجی

1 Back propagation



شکل ۴. نقشه خط ۷ مترو تهران

Fig. 4. Tehran Metro Line 7 map

روش یادگیری محلی بر اساس اطلاعات خاص وزنی با استفاده از نرخ‌های یادگیری مستقل γ_{ij} و γ_{jk} در هر تماس می‌باشد. این فرآیند با کنترل علامت دو گرادیان آخری کامل می‌شود. تا زمانی که علامت گرادیان‌ها در دو تکرار متوالی تغییر نیابد، نرخ یادگیری متناظر با آن با استفاده از افزایش اندازه مرحله خطی زیادتر می‌شود. به محض اینکه تغییر در علامت گرادیان ایجاد شد، نرخ یادگیری با استفاده از کم کردن اندازه مرحله نمایی، کاهش می‌یابد [۲۸].

۴- معرفی خصوصیات پروژه

خط ۷ متروی تهران از خطوط چندگانه طراحی شده برای تهران است که مطابق شکل ۴ 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 مکانیزه به روش تعادلی فشار زمین به قطر ۹/۱۶۴ متر حفاری شده است. پوشش نهایی تونل به صورت سگمنت‌هایی با ضخامت ۳۵ سانتی‌متر 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

مقدار خروجی این تابع در بازه صفر تا یک است. بعد از این که تمامی مقادیر خروجی محاسبه شد، آن‌ها با مقادیر هدف مقایسه می‌شوند. یک اندازه‌گیری خطا مابین خروجی و مقادیر هدف مطابق با فرمول (۷) انجام می‌شود:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (o_k - t_k)^2 \quad (7)$$

که در آن t_k مقادیر هدف می‌باشد. منظور از پروسه یادگیری، تنظیم پارامترهای آزاد-وزن‌های سیناپسی شبکه با هدف کمینه کردن خطا است. بنابراین در مرحله دوم، گرادیان‌هایی از E با در نظر گرفتن مقادیر ورودی محاسبه شده و وزن‌ها به صورت پله‌ای تنظیم می‌شود.

$$\Delta w_{ij} = -\gamma_{ij} \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \quad (8)$$

$$\Delta w_{jk} = -\gamma_{jk} \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} \quad (9)$$

جدول ۱. خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک در کیلومتر ۱۰+۵۰۰ خط ۷ متروی تهران [۳۱]

Table 1. Geotechnical properties of soil layers in 10 + 500 km of Tehran Metro line 7

زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	ضخامت (متر)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	ضریب پواسون	نوع خاک	لایه ها
۲۸	۳۱	۵	۱/۷	۳۵	۰/۳۵	سیلت و رس ماسه ای	۱
۳۵	۲۵	۱۹	۱/۸۶	۸۵	۰/۳۱	ماسه شنی به همراه سیلت و رس	۲
۳۸	۳۰	۲۷	۱/۹	۷۰	۰/۳۲	ماسه رس	۳

شکل ۵ است که براساس ابعاد پیشنهادی لمبروگی^۱ 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 [۱۶].

نسبت تنش افقی به تنش قائم با استفاده از فرمول $K = 1 - \sin\phi$ 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. 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.

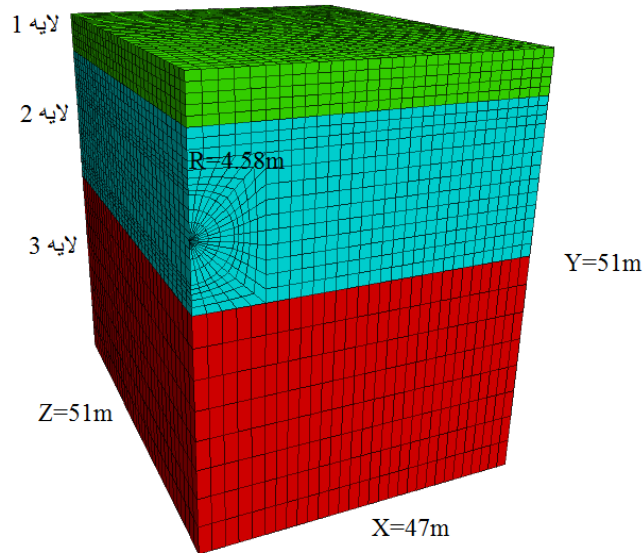
در مدل‌سازی به منظور حفر تونل، ابتدا حفاری تونل به اندازه ۱/۵ متر انجام شد و سپس با اعمال فشار سینه کار و همچنین اعمال شرایط سپر در مترای ۱/۵ متری، نگهداری فضای حفر شده صورت گرفت. این روند تا مترای ۹ (به اندازه طول سپر) ادامه یافت. پس از آن با پیشروی سپر و ورود به مترای ۱۰/۵ پوشش بتنی و تزریق پشت پوشش 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

ریز رسی 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 [۲۹]. در این تحقیق کیلومتر ۱۰+۵۰۰ برای مدل‌سازی و پیش‌بینی نشست به روش متا مدل انتخاب شده است.

۵- 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 ۱ به مدل معرفی شده است.

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 ۵. ابعاد مدل سه بعدی، موقعیت تونل و ضخامت لایه های موجود

Fig. 5. 3D model dimensions, tunnel position and layers thickness

جدول ۲. خصوصیات مکانیکی سپر و سگمنت در پروژه خط ۷ مترو تهران

Table 2. Mechanical properties of shield and segments in Tehran Metro Line 7 project

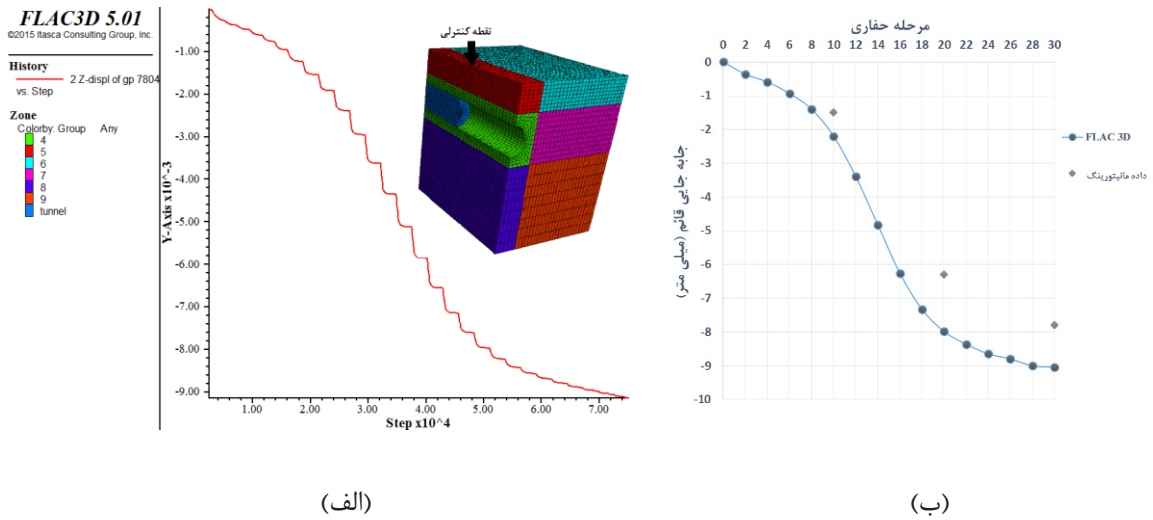
ضخامت(متر)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول یانگ (گیگا پاسکال)	ضریب پواسون	
۰/۲۴۵	۷۸۵۰	۲۱۰	۰/۲	سپر
۰/۳۵	۲۵۰۰	۳۰	۰/۲	سگمنت

۶- انجام مدل سازی عددی برای نقطه کنترلی

به منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت روند مدل سازی عددی سه بعدی از نتایج ابزاربندی و رفتارنگاری استفاده شده است. برای پایش نشست سطحی در مدل سازی، نقطه ای در سطح زمین به فاصله ۲۵ متری از جبهه کار تونل انتخاب شد. شکل ۶-الف مقادیر تغییر شکل قائم محاسبه شده بر اساس پارامترهای به کار رفته (جدول ۱) و موقعیت نقطه کنترلی را نشان می دهد. شکل ۶-ب مربوط به میزان جا به جایی قائم نسبت به مراحل حفاری در نقطه کنترلی و میزان نشست سطحی حاصل از داده مانیورینگ است. برای پایش میزان نشست سطحی پین هایی به طول ۱/۲ متر در سطح زمین و در مسیر حفر تونل نصب شده است. در شکل ۷-الف ساختار پین

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
- اجازه همگرایی به خاک به اندازه فضای مخروطی شکل 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
- ویژگی های مکانیکی سپر و سگمنت در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۶. الف) جابه جایی قائم برای نقطه کنترلی و جایگاه نقطه کنترلی در مدل ب) نمودار جابه جایی قائم نسبت به مراحل حفاری در نقطه کنترلی و داده مانیتورینگ

Fig. 6. (a) Vertical displacement for the control point and position of the control point in the model (b) Vertical displacement diagram for excavating steps at the control point and monitoring data



شکل ۷. مقایسه نمونه‌های آزمایشگاهی و پیش بینی: الف) مجموعه آموزش، ب) مجموعه آزمایش.

Fig. 7. Comparison of test and prediction results: a) training dataset, b) test dataset

جدول ۳. بازه پارامترها برای انجام آنالیز حساسیت [۳۱]

Table 3. Parameter range for sensitivity analysis

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

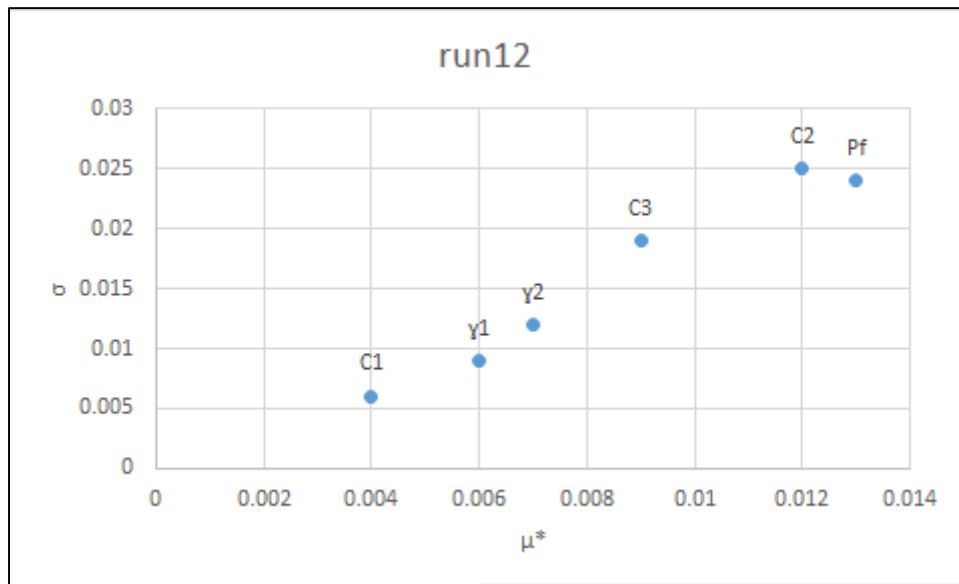
۷- آنالیز حساسیت و تعیین پارامترهای موثر

صحت یک ماتریس بستگی به تعداد نقاط نمونه برداری و توزیع آن‌ها در فضای پارامتر ورودی دارد. به منظور صرفه جویی در زمان و هزینه محاسبات، باید تعدادی نمونه محدود تولید شود. بنابراین روش نمونه برداری تصادفی برای یافتن بهترین نقاط درون دامنه طراحی استفاده شده است. ایده کلی استراتژی نمونه برداری تصادفی، تولید یک سری از نقاط است که به صورت یکنواخت در فضای پارامتر ورودی توزیع شده باشد. در این تحقیق از روش فرامکعب لاتین برای نمونه برداری استفاده شده است.

برای یک مسئله غیرخطی پیچیده، شبیه سازی عددی دارای هزینه محاسباتی زیادی می‌باشد. بنابراین کاهش تعداد پارامترهای موثر با کاربرد آنالیز حساسیت یک راهبرد مفید و موثر برای کاهش هزینه و زمان مورد نیاز شبیه سازی‌ها می‌باشد. این آنالیز، اهمیت هر پارامتر ناشناخته را با در نظر گرفتن پاسخ مدل تخمین می‌زند و موجب کاهش تعداد پارامترهای موثر در تولید ماتریس می‌گردد [۳۳]. از پارامترهای ژئوتکنیکی وزن مخصوص لایه‌های اول و دوم، چسبندگی لایه‌ی اول، دوم و سوم و از پارامترهای عملیاتی فشار سینه کار برای انجام آنالیز حساسیت انتخاب و بازه مقادیر ورودی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. که این بازه‌ها کمینه و بیشینه مقادیر مربوط به پارامترها حاصل از نتایج آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی

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 بین‌ها 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 و سپس تقریباً ثابت می‌شود. در این تحقیق از سه مقدار نشست بین نصب شده در نقطه کنترلی در فواصل حفاری ده مرحله ای پیشروی دستگاه حفاری برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده است [۳۲].

میزان فشار سینه کار و فشار تزریق در این مقطع ۶۰ و ۱۱۰ کیلو پاسکال می‌باشد. باید در نظر داشت که اختلاف ما بین داده ابرار بندی و نتایج مدل سازی ناشی از عوامل مختلف مثل انتخاب نوع رفتار خاک، عدم قطعیت در بیش حفاری، نرخ نفوذ TBM و غیره می‌باشد که در این تحقیق همه این فاکتورها، به منظور بررسی تاثیر پارامترهای ژئوتکنیکی و عملیاتی نادیده گرفته شده است. با این وجود، نتایج داده مانیورینگ و مدل سازی در بازه نزدیک به هم هستند و اعتبار مدل عددی قابل قبول می‌باشد.



شکل ۸. مقادیر میانگین مطلق و انحراف معیار برای ۶ پارامتر انتخابی بعد از ۱۲ مرحله حفاری در نقطه کنترلی

Fig. 8. Absolute mean values and standard deviation for the 6 selected parameters after 12 excavation steps

نشست حداکثر می‌باشد. بنابراین معیار انتخاب، میزان نشست حداکثر بعد از ۳۰ مرحله حفاری است، که با در نظر گرفتن این شرایط و مقدار میانگین مطلق، همانطور که از شکل ۱۰ قابل مشاهده است، پارامترهای 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 این رو به عنوان پارامترهای حساس انتخاب می‌شوند. نتایج آنالیز حساسیت از پارامترهای 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.

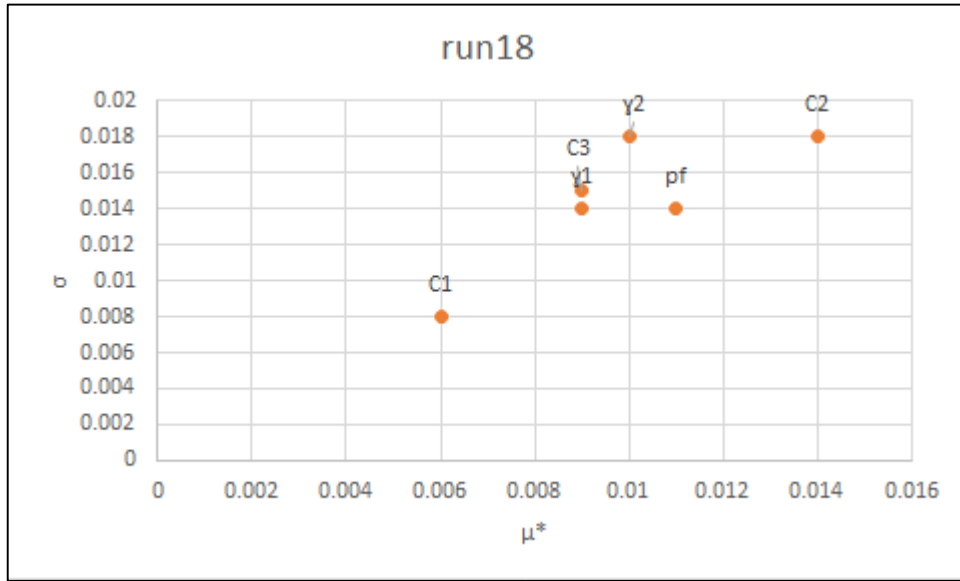
۸- تولید داده برای متا مدل و ساخت شبکه عصبی مصنوعی

همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد، از بین ۶ پارامتر انتخاب شده برای آنالیز حساسیت، ۳ پارامتر وزن مخصوص و چسبندگی لایه دوم و فشار سینه‌کار به عنوان پارامترهای حساس انتخاب شد. به منظور ایجاد متا مدل ۱۰۰ نمونه با استفاده از روش تولید داده تصادفی فرامکعب لاتین از بازه این پارامترها تولید و سپس شبیه سازی عددی سه بعدی برای آن‌ها انجام شده است. انجام شبیه سازی‌ها برای تولید داده‌های متا مدل با کامپیوتر ۲ هسته‌ای، ۲/۸ گیگاهرتز و حافظه ۴ گیگابایت حدود ۲۰ روز طول کشید. با

از نمونه های خاک برای عمق‌های مختلف مقطع مورد نظر می‌باشد. در نهایت برای ۶ پارامتر انتخاب شده، به ازای $I=7$ تعداد ۴۹ نمونه برای شبیه سازی در فرآیند آنالیز حساسیت انجام شده است. فشار تزریق در تمامی شبیه سازی‌های با نمونه تصادفی، ۵۰ کیلو پاسکال بیش‌تر از فشار سینه‌کار در نظر گرفته شده است. 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.

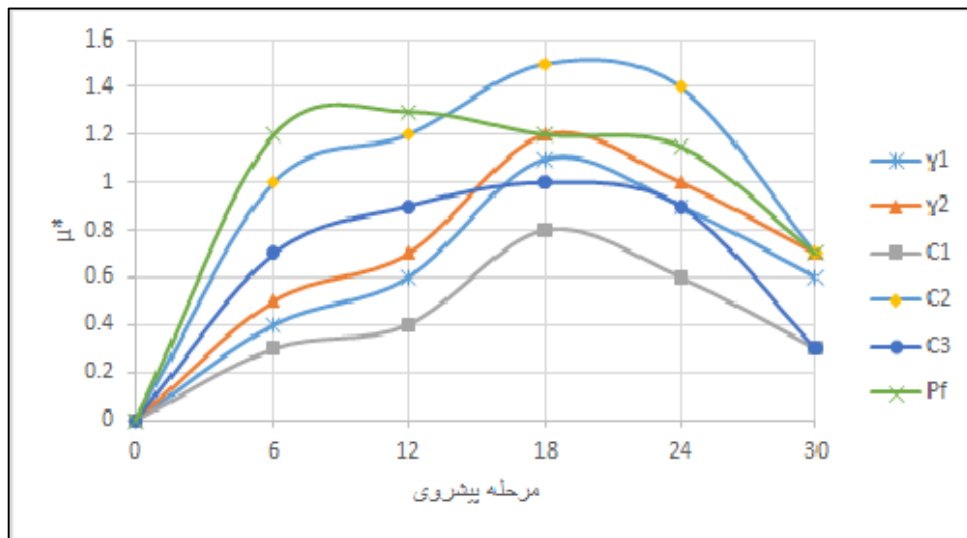
نتایج هر شبیه سازی با در نظر گرفتن جابه‌جایی قائم به عنوان نتیجه نهایی جمع‌آوری و پارامترهای مربوط به آنالیز (انحراف معیار و میانگین استاندارد) محاسبه گردید. تمامی مراحل فوق در نرم افزار MATLAB و با استفاده از جعبه ابزار SAFE انجام شده است [۳۴].

همان‌طور که از شکل ۸ و ۹ مشاهده می‌شود پارامتر P_f و C_2 دارای بیشترین مقدار میانگین مطلق و انحراف معیار می‌باشد که نشان دهنده‌ی اندرکنش زیاد این دو پارامتر با بقیه پارامترهای موجود در کنار تاثیر زیاد آن‌ها می‌باشد. بنابراین از بین ۶ پارامتر، 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 پارامتر موثر سوم وجود ندارد، هدف از این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای انتخابی در میزان



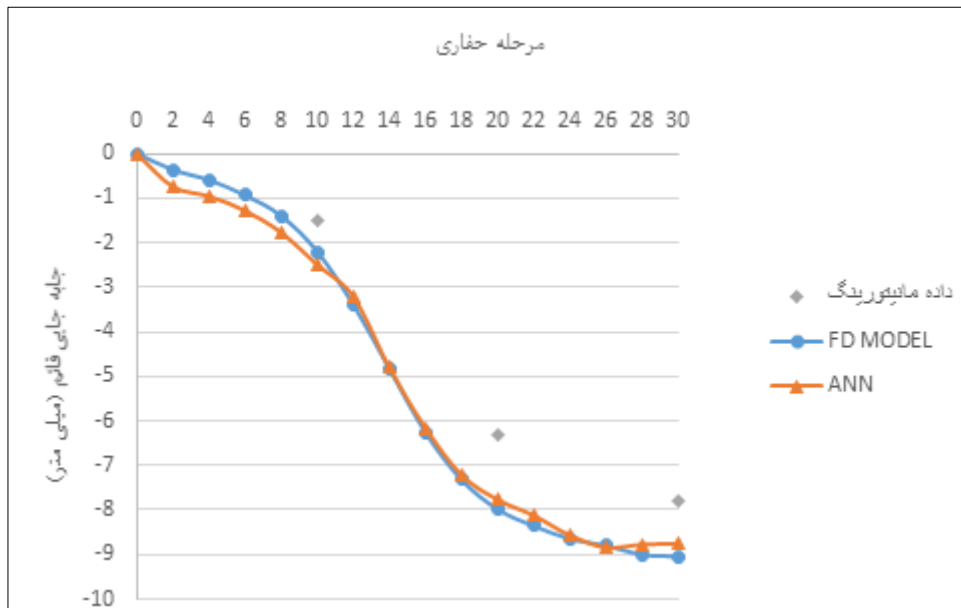
شکل ۹. مقادیر میانگین مطلق و انحراف معیار برای ۶ پارامتر انتخابی بعد از ۱۸ مرحله حفاری در نقطه کنترلی

Fig. 9. Absolute mean values and standard deviation for the 6 selected parameters after 18 excavation steps



شکل ۱۰. نمودار کلی میانگین مطلق ۶ پارامتر نسبت به مراحل حفاری

Fig. 10. Overall graph of the absolute average of 6 parameters relative to the excavating steps



شکل ۱۱. نتایج شبیه سازی با متامدل، مدل سازی $FLAC^{3D}$ و داده مانیتورینگ در مقطع انتخاب شده

Fig. 11. Simulation results with meta-model, $FLAC^{3D}$ modeling and monitoring data at selected cross sections

ورودی و خروجی می‌باشند. نتایج خطی‌سازی و میزان خطا در هر سه نوع داده آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی برای شبکه عصبی در جدول ۴ آورده شده است.

نتایج پیش‌بینی نشست با شبکه عصبی برای نقطه‌ی کنترلی و شبیه سازی اولیه با $FLAC^{3D}$ در شکل ۱۱ آورده شده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت نتایج به دست آمده با متامدل شبکه عصبی و تک شبیه سازی عددی تفاضل محدود تطابق نزدیکی دارند و در نتیجه شبکه عصبی قابلیت پیش‌بینی مکانی-زمانی 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 ۵ میزان هزینه محاسباتی لازم برای هر دو نوع شبیه سازی 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 پارامترهای ورودی و ساخت متامدل قوی و قابل اعتماد در صورت عدم تغییر ناگهانی خصوصیات

استفاده از نتایج شبیه سازی 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. در این تحقیق از روش شبکه عصبی پس انتشار، تابع سیگموئید تانژانتی 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 فرمول زیر نرمالیزه شده است.

$$x^- = 0/9 - \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}} \times 0/8 \quad (10)$$

که در آن x_{min} و x_{max} بیشترین و کمترین مقدار در بازه‌ی پارامترهای

جدول ۴. نتایج شبکه عصبی مصنوعی

Table 4. The results of ANN prediction

تعداد نمونه	میانگین مربع خطا	ضریب رگرسیون	مرحله
۱۰۵۰	$4/93 \times 10^{-4}$	۰/۹۸۳۷	آموزش
۲۲۵	$6/26 \times 10^{-4}$	۰/۹۸۲۵	آزمایش
۲۲۵	$6/61 \times 10^{-4}$	۰/۹۸۱۴	اعتبارسنجی

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

Table 5. Computational time comparison for different methods using a dual-core computer

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

سپهر، فشارسینه کار، فشار تزریق، پوشش سگمتی تونل به صورت مرحله به مرحله انجام شد. مدل ساخته شده با مقادیر ژئوتکنیکی اولیه با میزان اختلاف نشست در حدود ۱۰٪ تطابق قابل قبولی را با داده مانیتورینگ نشان داد و اعتبار مدل عددی تایید شد.

۲- با تعیین تعداد نمونه لازم برای انجام آنالیز حساسیت برای ۶ پارامتر انتخابی، ۴۹ شبیه سازی در بازه تعریف شده برای پارامترها انجام شد. نتایج آنالیز حساسیت برای مراحل ۱۲، ۱۸ و در نهایت مرحله ۳۰ بررسی و با در نظر گرفتن مقدار میانگین مطلق به دست آمده سه پارامتر فشار سینه کار، چسبندگی و وزن مخصوص لایه دوم به عنوان پارامترهای حساس با در نظر گرفتن نشست سطحی حداکثر انتخاب شد.

۳- برای ساخت متامدل با این سه پارامتر انتخاب شده، ۱۰۰ عدد نمونه تصادفی به روش فرامکعب لاتین تولید و بعد از شبیه سازی برای هر نمونه، برای تربیت شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. معماری شبکه عصبی با ۴ نورون ورودی، یک لایه مخفی، ۱۸ نورون مخفی و یک خروجی ساخته و برای داده های نرمالیزه شده ورودی و خروجی، با ۷۰ درصد داده

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

۹- نتیجه‌گیری

شبیه سازی عددی یک ابزار مهم و نیرومند در پیش‌بینی میزان نشست در تونل‌سازی مکانیزه است. با این وجود، اغلب اوقات دسترسی به یک شبکه دقیق و کافی از پارامترهای ژئوتکنیکی محل (به دلیل ناکافی بودن آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی) مشکل و یا زمان بر است. در این میان، آنالیز حساسیت جامع در کاهش میزان عدم قطعیت در پارامترهای ژئوتکنیکی خاک زیرسطحی و پارامترهای رفتاری و عملیاتی نقش موثری ایفا می‌کند، چرا که قادر به تشخیص پارامترهای کلیدی حاکم بر پاسخ مدل می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از روش Morris، آنالیز حساسیت جامع برای ۶ پارامتر ژئوتکنیکی و عملیاتی انجام شد و نتایج به قرار زیر است:

۱- ساخت مدل عددی با در نظر گرفتن پارامترهای ژئوتکنیکی خاک،

- [5] M. Calvello, R.J. Finno, Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis, *Computers and Geotechnics*, 31(5) (2004) 410-424.
- [6] S. Miro, D. Hartmann, T. Schanz, Global sensitivity analysis for subsoil parameter estimation in mechanized tunneling, *Computers and Geotechnics*, 56 (2014) 80-88.
- [7] T. Kasper, G. Meschke, A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 28(14) (2004) 1441-1460.
- [8] F. Nagel, 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*, 34(6) (2010) 605-625.
- [9] J.P. Kleijnen, Design and analysis of simulation experiments, in: *International Workshop on Simulation*, Springer, 2015, pp. 3-22.
- [10] N. Do, D. Dias, P. Oreste, Numerical analysis of segmental tunnel lining under seismic loads, 2015.
- [11] X.-m. Song, F.-z. Kong, C.-s. Zhan, J.-w. Han, X.-h. Zhang, Parameter identification and global sensitivity analysis of Xin'anjiang model using meta-modeling approach, *Water Science and Engineering*, 6(1) (2013) 1-17.
- [12] C. Zhao, A.A. Lavasan, T. Barciaga, V. Zarev, M. Datcheva, T. Schanz, Model validation and calibration via back analysis for mechanized tunnel simulations—The Western Scheldt tunnel case, *Computers and Geotechnics*, 69 (2015) 601-614.
- [13] N.A. Nariman, R.R. Hussain, I.I. Mohammad, P. Karampour, Global sensitivity analysis of certain and uncertain factors for a circular tunnel under seismic action, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(6) (2019) 1289-1300.
- [14] Y. Fang, Y. Su, On the use of the global sensitivity analysis in the reliability-based design: Insights from a tunnel support case, *Computers and Geotechnics*, 117 (2020) 103280.
- [15] C. Blom, E. Van der Horst, P. Jovanovic, Three-

برای تربیت، ۱۵ درصد داده برای آموزش و ۱۵ درصد داده برای آزمایش شبکه استفاده شد. نتایج پیش بینی با شبکه عصبی در میزان نشست سطحی، تطابق ۹۸٪ با نتایج شبیه سازی سه بعدی را نشان داد.

۴- زمان لازم برای پیش بینی با استفاده از شبکه عصبی کمتر از یک دقیقه می باشد. لذا با توجه به این زمان محاسباتی خیلی کم در ادامه با استفاده از آنالیز برگشتی به کمک یکی از روش های بهینه سازی امکان استفاده از این نتایج در پیش بینی پارامترهای عملیاتی فشار سینه کار و تزریق به منظور کاهش میزان نشست سطحی وجود دارد که برای مطالعات آینده پیشنهاد می شود.

۱۰- فهرست علائم

علائم انگلیسی

C چسبندگی، kPa

P_f فشار سینه کار، kPa

علائم یونانی

γ چگالی، g/cm^3

منابع

- [1] J. Ninić, J. Stascheit, 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, pp. 1-19.
- [2] J. Ninić, S. Freitag, G. Meschke, A hybrid finite element and surrogate modelling approach for simulation and monitoring supported TBM steering, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63 (2017) 12-28.
- [3] J. Meier, T. Schanz, Benchmarking of optimization algorithms, (2015).
- [4] X.-T. Feng, B.-R. Chen, C. Yang, H. Zhou, X. Ding, 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*, 43(5) (2006) 789-801.

- [25] J.C. Helton, F.J. Davis, Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems, *Reliability Engineering & System Safety*, 81(1) (2003) 23-69.
- [26] M.D. McKay, R.J. Beckman, W.J. Conover, Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, *Technometrics*, 21(2) (1979) 239-24.
- [27] J. Ninić, Computational strategies for predictions of the soil-structure interaction during mechanized tunneling, PHD thesis 2016.
- [28] J. Ninic, J. Stascheit, G. Meschke, Prediction of tunnelling induced settlements using simulation-based artificial neural networks, in: *Proceedings of the 2nd International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering*, paper, 2011.
- [29] R. Heidari sheibani, S. Zare, H. Mirzaui nasirabad, M. Foroughi, Numerical Study of Face Pressure Effect on Surface Settlement in Soft Ground Mechanized Tunneling-A Case Study: Tehran Metro Line 7(in persian), *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, 1(1) (2013) 67-57.
- [30] X. Cao, S. Yan, Numerical analysis for earthquake dynamic responses of tunnel with different lining rigidity based on finite element method, *Information Technology Journal*, 12(13) (2013) 2599-2604.
- [31] SCE, Engineering geology report of East-West section (Tehran Metro Line 7), SCE.(In Persian), (2011).
- [32] SCE, Monitoring report of East-West section (Tehran Metro Line 7), SCE.(In Persian), (2012).
- [33] J. Ninić, G. Meschke, Model update and real-time steering of tunnel boring machines using simulation-based meta models, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45 (2015) 138-152.
- [34] F. Pianosi, F. Sarrazin, T. Wagener, A Matlab toolbox for global sensitivity analysis, *Environmental Modelling & Software*, 70 (2015) 80-85.
- dimensional structural analyses of the shield-driven “Green Heart” tunnel of the high-speed line south, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 14(2) (1999) 217-224.
- [16] A. Lambrughi, L.M. Rodríguez, R. Castellanza, Development and validation of a 3D numerical model for TBM–EPB mechanised excavations, *Computers and Geotechnics*, 40 (2012) 97-113.
- [17] H. Chakeri, Y. Ozcelik, B. Unver, Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 36 (2013) 14-23.
- [18] H. Lai, H. Zheng, R. Chen, Z. Kang, Y. Liu, Settlement behaviors of existing tunnel caused by obliquely under-crossing shield tunneling in close proximity with small intersection angle, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97 (2020) 103258.
- [19] S. Freitag, B.T. Cao, J. Ninić, G. Meschke, Hybrid surrogate modelling for mechanised tunnelling simulations with uncertain data, *International Journal of Reliability and Safety*, 9(2-3),(2015)154 -173.
- [20] K. Khaledi, T. Schanz, S. Miro, Application of metamodelling techniques for mechanized tunnel simulation, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 44(1) (2014) 45-54.
- [21] M.C. Hill, C.R. Tiedeman, *Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty*, John Wiley & Sons, 2006.
- [22] F. Pianosi, K. Beven, J. Freer, J.W. Hall, J. Rougier, D.B. Stephenson, T. Wagener, Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow, *Environmental Modelling & Software*, 79 (2016) 214-232.
- [23] B.Hamraz, A.Akbarpour, b.Porreza, Uncertainty analysis of MODFLOW input parameters by GLUE method (case study: Birgand plain), *Journal of Soil and Water Protection Research*, 22(6) (2016) 61-79.
- [24] A. Saltelli, Sensitivity analysis for importance assessment, *Risk analysis*, 22(3) (2002) 579-590.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

L. Nikakhtar, Sh. Zare, H. Mirzaei Nasirabad, Global Sensitivity Analysis in the Surface Settlement Prediction Caused by Mechanized Tunneling, Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 2497-2514.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17432.6558](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17432.6558)

