

### طبقه‌بندی فازی ریسک نشست ناشی از حفاری مکانیزه با ماشین TBM-EPB با استفاده از سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS)

#### مقاله پژوهشی

توحید مقتدر<sup>۱</sup>؛ احمد شرافتی<sup>۲\*</sup>؛ حسین نادرپور<sup>۳</sup>؛ مرتضی قارونی نیک<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری؛ گروه مدیریت ساخت و آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، tohidmoghtader@gmail.com

۲- استادیار؛ گروه مدیریت ساخت و آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، asharafati@gmail.com

۳- استاد؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، naderpour@semnan.ac.ir

۴- استادیار؛ دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، gharouninik@iust.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۹/۰۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹

شماره صفحات: ۷۳ تا ۹۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2022.12441.1465

واژگان کلیدی	چکیده
تونل ریسک نشست زمین ماشین TBM-EPB سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS) حفاری مکانیزه	پیش بینی و ارزیابی ریسک ناشی از نشست سطح زمین در اثر حفاری مکانیزه با استفاده از سپر EPB از مهمترین بخش‌های مدیریت ریسک در مدیریت پروژه‌های تونل‌سازی است. از اینرو، در این مقاله سعی می‌گردد، طی دو بخش مستقل به این مهم پرداخته شود. در بخش ابتدایی، رقم نشست سطحی زمین ناشی از حفاری مکانیزه با استفاده از دستگاه TBM-EPB بر اساس روش سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS) با در نظر گرفتن ده متغیر جامع ورودی شبکه، تخمین زده می‌شود. سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی با در نظر گرفتن هفت تابع عضویت گوسی برای هر یک از ده متغیر ورودی در لایه اول شبکه و همچنین تعریف هفت قانون فازی برای استنتاج خود در لایه دوم شبکه، قادر بوده است، متغیر خروجی سیستم که حداکثر نشست سطحی است را با دقت مطلوب و رقم $0/01322$ ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) پیش بینی نماید. در بخش دوم مقاله، ریسک ناشی از نشست سطحی در حفاری مکانیزه با استفاده از توابع عضویت گوسی در پنج کلاس مختلف ریسک تحلیل و طبقه‌بندی فازی می‌شود. در انتها، طبقه‌بندی قطعی رده‌های مختلف ریسک نشست در پژوهش‌های پیشین و طبقه‌بندی فازی سطوح مختلف ریسک انجام شده در این تحقیق، قیاس می‌شوند. طبق نتایج، با تلفیق قضاوت مهندسی فازی منحصر به هر پروژه تونل‌سازی مشابه و همچنین تحلیل و روش ارائه شده در این مقاله، می‌توان به تصمیم بهینه کاربردی در مدل ارزیابی ریسک دست یافت.

#### ۱- مقدمه

افزایش جمعیت جهان در دهه‌های اخیر موجب شده است که شهرنشینی به طور چشمگیری توسعه یابد. از اینرو، مواجهه با ترافیک اجتناب‌ناپذیر و سنگین‌تر در قیاس با گذشته نه چندان دور در جاده‌ها، بزرگراه‌ها و آزادراه‌ها

\* تهران؛ انتهای بزرگراه شهید ستاری؛ میدان دانشگاه؛ بلوار شهدای حصارک؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد علوم و تحقیقات؛ ساختمان ابن سینا؛ بلوک C؛ طبقه چهارم شرقی؛ گروه تخصصی مدیریت ساخت و آب؛ کدپستی: ۱۴۷۷۸۹۳۸۵۵؛ صندوق پستی: ۱۴۵۱۵/۷۷۵؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱-۴۴۸۶۸۶۰۷-۳۵؛ داخلی: ۴۱۵۴۸

تأثیر تونل زنی با دستگاه حفار مکانیزه تمام مقطع بر میزان نشست خاک‌های مجاور حفاری است (Zhang, et al., 2021). در صورتی که میزان تغییر شکل خاک مجاور نواحی حفاری شده از یک مقدار مجاز در نظر گرفته شده فراتر رود، مواجهه با ریسک‌های احتمالی فنی و مالی در پروژه اجتناب ناپذیر خواهد بود. مطابق مطالعات انجام شده، جهت کاهش نرخ نشست سطحی زمین ناشی از فشار تحمیلی خاک‌های مجاور و پیشگیری از وقوع چنین شرایطی در حفاری، می‌توان از دستگاه TBM-EPB برای حفاری در خاک نرم، به‌ویژه در شهرهای پرجمعیت و کلان شهرها استفاده کرد. مکانیسم این دستگاه حفار بر پایه متعادل کردن میزان تنش جلویی سینه خاک با فشار گلی است که در پشت سر کاترهد قرار دارد تا بدین طریق تأثیر تغییر شکل خاک مجاور حفاری را خنثی کرده و یا دست کم کاهش دهد (Djamila, et al., 2015).

با این حال، حتی اگر این معیار در پروژه‌های تونل‌سازی با انتخاب یک دستگاه TBM مناسب برآورده شود، همچنان این قبیل از پروژه‌ها از خطرات و ریسک‌های ناشی از نشست سطحی زمین در نتیجه حفاری، مصون نخواهند بود، از اینرو، تخمین میزان نشست سطحی زمین در پروژه‌های مذکور بسیار حیاتی است (Zhang, et al., 2021).

در دهه‌های اخیر، روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی توسط محققان برای محاسبه، تخمین و پیش بینی میزان نشست سطحی زمین ارائه و مورد استفاده قرار گرفته است. به طور کل پژوهش‌های انجام شده در این زمینه را می‌توان به چهار گروه اصلی زیر تقسیم نمود: گروه اول، پژوهش‌های تحلیلی هستند که با استفاده از روابط ارائه شده در علوم مهندسی مکانیک خاک و مکانیک سنگ و بر اساس روابط ریاضی به تخمین نرخ نشست در انواع مختلف تونل می‌پردازند (Abdellah & Yang, 1982; Reilly & New, 1982; Attewell & Vorster, et al., 2005; 2018; Hurrell, 1985; Peck, 1969; Sagaseta, 1987; Verruijt & Booker, 1998). گروه دیگری از پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی می‌باشند. اکثر مطالعات انجام شده در این دسته بر اساس شبیه‌سازی المان تونل مطابق شرایط واقعی تونل و شرایط پیرامونی آن در مقیاس خیلی کوچک در

شهرهای پرجمعیت به ویژه در کلان شهرها، تشدید شده است. جهت کنترل و مدیریت این حجم رو به افزایش ترافیک شهری بدیهی است، ساخت متروی شهری می‌تواند نقش مهمی ایفا کند.

همچنین در سال‌های اخیر، ارزش ذاتی زمین در شهرهای پرجمعیت افزایش یافته است؛ بنابراین ساخت فضاها و ساختمان‌های زیرزمینی مانند مراکز تجاری زیرزمینی و همچنین شبکه‌های مترو به سرعت توسعه یافته است. از آنجائیکه تونل‌سازی در محیط پر ترافیک شهری به ویژه در کلان شهرها همواره جزء پروژه‌های با درجه عدم قطعیت بالا محسوب می‌گردد، از اینرو مدیریت و کنترل ریسک تونل‌سازی به ویژه ریسک حفاری مکانیزه در فضاهای پر ازدحام شهری، نقش محوری و حیاتی در مدیریت پروژه ایفا می‌کند. از میان عوامل متعددی که در وقوع ریسک حفاری در محیط‌های شهری دخیل هستند، ریسک ناشی از نشست سطحی زمین نقش بسزایی در وقوع حوادث و خطرات جانی و مالی و همچنین افزایش هزینه و زمان پروژه خواهد داشت؛ لذا تنظیم و تدوین مدل پیشگیری وقوع ریسکی که بتواند ریسک ناشی از نشست زمین را به حداقل ریسک اجتناب ناپذیر پروژه تقلیل دهد، بسیار ضروری است. از اینرو بدیهی است، ابتدا ریسک ناشی از نشست سطحی زمین پیش‌بینی، تحلیل و طبقه‌بندی شده تا بتوان تمهیداتی مثل پایش و کنترل، انتقال، حذف ریسک و یا ناچارا پذیرش و یا تقلیل ریسک را در خصوص یک پروژه خاص حفاری مکانیزه تونل، اجرایی نمود.

طی سال‌های اخیر، تونل‌های مترو اغلب به روش حفاری مکانیزه به ویژه تکنیک‌های مبتنی بر سپر حفاری شده‌اند، به این دلیل که مزیت‌های آن شامل ایجاد سرعت قابل توجه تونل زنی و همچنین تأثیر کمتر تونل‌سازی بر نرخ ترافیک سطحی و غیره در این نوع تونل‌سازی غیر قابل انکار است (Zhang & Huang, 2014; Shi, et al., 2011).

علیرغم مزایای قابل توجهی که در حفر تونل با دستگاه حفار (Tunnel Boring Machine – Earth TBM-EPB Pressure Balance Shield) وجود دارد و غیر قابل انکار است، لازم است معایب آن نیز مورد توجه قرار گیرد. بدون شک از عوامل مهمی که باید مورد توجه و بررسی قرار گیرد،

کارآمد خواهد بود (Bouayad & (Dai & Cao, 2017) Emeriault, 2017). بنا به دلایل مطروحه، از شبکه‌های عصبی متنوعی برای تخمین میزان نشست سطحی زمین ناشی از روش‌های مختلف تونل زنی استفاده شده است. برخی از پر کاربردترین این روش‌ها برای پیش بینی نرخ نشست زمین در انواع مختلف تونل‌سازی، به ترتیب شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی پس انتشار (BPNN: Back Propagation Neural Network)، سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS: Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)، سیستم (Gene Expression Programming: GEP)، سیستم (MARS: Multivariate Adaptive Regression Splines)، سیستم (XGBoost: Extreme Gradient Boosting)، سیستم (SVM: Support Vector Machine)، سیستم (ELM: Extreme Learning Machine)، سیستم (GRNN: General Regression Neural Network)، سیستم (GMDH: Group Method of Data Handling) می‌باشند (Kim, et al., (Suwansawat & Einstein, 2006) (Shi, et al., (Santos & Celestino, 2008) (Ahangari, et al., (Shahin, et al., 2005) (Sun, et al., (Kohestani, et al., 2017) (Samui & Sitharam, (Ding, et al., 2013) (Qi & Tang, 2018) 2008). همچنین در برخی از پژوهش‌های با موضوعات مرتبط مذکور از شبکه‌های عصبی مصنوعی مجهز به بهینه‌سازهایی مانند الگوریتم کلونی زنبورهای عسل (Artificial Bee Colony Algorithm)، الگوریتم کلونی مورچگان (Ant Colony Optimization)، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (ACO)، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (particle swarm optimization) PSO، الگوریتم موسوم به گرگ خاکستری (Grey Wolf Optimizer) GWO، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش (Teaching-learning-based Optimization) TLBO و ... استفاده شده است (Zhang, et al., 2017) (Ocak & Seker, 2013) (Chen, et al., (Zhang, et al., 2021) (Chen, et al., 2019)

در تمام تحقیقات ارزشمندی که جهت تخمین میزان نشست سطحی زمین در اثر حفاری انجام شده است، علیرغم دقت بسیار بالای برخی از تکنیک‌های مذکور در پیش بینی و همچنین همبستگی بین داده‌های خروجی و ارقام نشست قرائت شده در محل پروژه، کماکان خلاءهای تحقیقاتی به

محیط آزمایشگاهی است (Idinger, et al., 2011) (Chen, et al., 2016) (Hong & Soomro, 2015) سومین دسته از مطالعات مفصل انجام شده در این حوزه، پژوهش‌های مبتنی بر محاسبات عددی می‌باشند. عموماً در این گروه از پژوهش‌ها، میزان نشست ناشی از حفاری در پروژه‌های تونل‌سازی را با استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر روش‌ها و روابط المان محدود و تفاضل محدود، محاسبه می‌نمایند (Paternesi, et al., (Huang, et al., 2015) (Karakus, 2007) (Kirsch, 2010) (Addenbrooke, et al., (Karakus & Fowell, 2005) (Baziar, et al., (Pakbaz, et al., 2013) (Zhang, et al., 2021) 2016). آخرین و به عبارتی موثرترین و کارآمدترین گروه تحقیقات جهت نیل به تخمین صحیح عدد نشست سطحی زمین در اثر حفاری تونل، پژوهش‌های مبتنی بر محاسبات نرم به ویژه انواع مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی است (Zhang, et al., 2021). لازم به ذکر است که روش‌های ذکر شده اول تا سوم همچنان با تعداد زیادی محدودیت قابل توجه همراه هستند. به عنوان مثال، همه این روش‌ها می‌توانند در شرایط ژئوتکنیکی با دامنه عدم قطعیت بالا و همچنین در حفاری با تکنیک‌های پیچیده، غیر قابل اجرا باشند و یا دقت پیش بینی نشست پایینی داشته باشند (Zhang, et al., 2017). مضافاً، تشخیص و انتخاب پارامترهای تأثیرگذار در نرخ نشست خاک با توجه به الگوهای پیچیده سازنده آن و همچنین مدل‌سازی آن در فرآیند تونل‌زنی دشوار است (Pourtaghi & Lotfollahi- (Yaghin, 2012) (Zhang, et al., 2017). با توجه به دلایل ذکر شده و ضعف روش‌های مذکور، روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین در دهه‌های گذشته توسعه گسترده‌ای یافته است؛ بنابراین، این روش‌ها به ابزاری کارآمد و دقیق برای حل مسائل غیرخطی همراه با تعداد متغیر مستقل (ورودی) زیاد، تبدیل شده است (Chou & Lin, 2013) (Hamdia, et al., 2015) (Zoveidavianpoor, 2014). در واقع در روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، می‌توان در مدت زمان کوتاه و با سرعت بالا، شاهد یک رابطه نامحسوس و مؤثر بین پارامترهای ورودی و متغیرهای خروجی بود. از این رو، در برخی از این الگوریتم‌ها می‌توان پیچیدگی شرایط پارامترها و همبستگی بین آنها را کشف کرد که در نهایت برای درک ماهیت مسائل و حل آنها

عضویت گوسی (*Gaussian membership functions*) در کلاس‌های مختلف ریسک، به صورت فازی برای بهره‌برداری ارائه می‌گردد. در این تحقیق از نرم‌افزار *MATLAB* جهت محاسبات شبکه و ارائه نتایج استفاده شده است.

## ۲- معرفی پروژه مورد مطالعه

از آنجایی که در سال‌های گذشته جمعیت شهری به طور چشمگیری افزایش یافته است، بحران ترافیک و به تبع آن مسئله هوای آلوده به یک معضل بگرنج و حیاتی در تهران تبدیل شده است. برای رفع مشکل مذکور، پیشرفت و گسترش سیستم‌های خطوط مترو توسط تصمیم‌گیرندگان در کلان شهرها بسیار توصیه می‌شود. شایان ذکر است که شهر تهران دارای هفت خط مختلف مترو است که اکثریت ایستگاه‌های این خطوط مترویی تاکنون به بهره‌برداری رسیده‌اند؛ همچنین مابقی ایستگاه‌های افتتاح نشده خطوط مذکور در اسرع وقت به بهره‌برداری می‌رسند و خط ۱۰ مترو تهران نیز در حال احداث است. خطوط ۸، ۹ و ۱۱ متروی تهران نیز در آینده نزدیک ساخته خواهند شد. همانطور که در شکل ۱ و شکل ۲، نشان داده شده است، محدوده مورد مطالعه این مقاله مسافت ۶/۲ کیلومتری از بخش توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران (شکل ۲) از ایستگاه دولت آباد تا ایستگاه حرم عبدالعظیم است که شامل مجموعه ۱۵۰ داده نمونه حاصل از ابزار دقیق نشست سطحی زمین است (*Behro.co, 2021*).

با احداث توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران، طول این خط به ۳۸ کیلومتر خواهد رسید و تبدیل به بلندترین خط مترو در غرب آسیا (خاورمیانه) خواهد شد (شکل ۱). همانطور که در شکل ۲، ملاحظه می‌شود محدوده توسعه جنوبی خط ۶ مترو شامل چهار بخش مجزا از ایستگاه دولت آباد تا ایستگاه حرم عبدالعظیم (ع) است که کل محدوده پروژه در منطقه جنوب شرق تهران واقع گردیده است. میانگین هد آب زیرزمینی (بالای تونل) از ۰ تا ۲۰ متر متغیر است و عمق پوشش (ارتفاع روباره تونل) در بازه بین ۱۲ تا ۲۸ متر متفاوت است. یک عدد دستگاه حفار *TBM* نوع سپر متعادل کننده فشار زمین (*EPB*) با قطر کاترهد ۹/۱۶۴ متر ساخت کارخانه آلمانی هرنگنشت

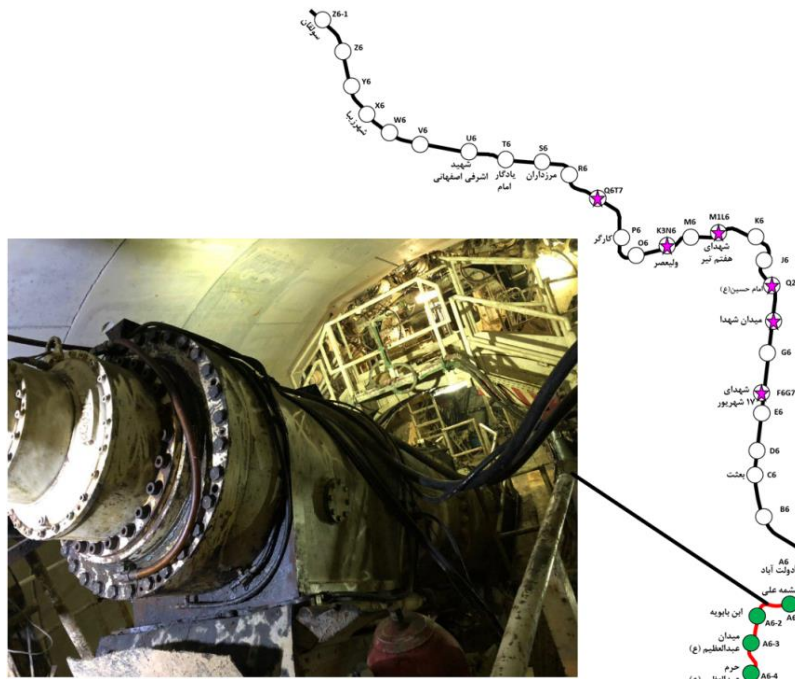
چشم می‌خورد که پرداختن به آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله سعی گردیده است، حتی المقدور به شرح ذیل به این موارد مهم پرداخته شود:

(۱) علی‌رغم در نظر گرفتن پارامترهای مختلف به عنوان متغیرهای ورودی برای مشارکت در عملیات داخلی شبکه‌ها، نمی‌توان پارامترهای جامعی با دسته‌بندی‌های مختلف یافت که تقریباً همه ویژگی‌های تأثیرگذار در ایجاد نشست‌های زمین را در حفاری تونل، به طور همزمان در بر گیرد.

(۲) تقریباً در تمامی مطالعات مذکور، بر اساس متغیرهای ورودی کلیدی تأثیرگذار بر نرخ نشست، ارقام نشست پیش بینی گردیده است؛ اما رابطه بین عدد نشست و ریسک نشست موضوعی است که ندرتا به آن پرداخته شده است.

(۳) در موارد محدودی که ارتباط بین عدد نشست و ریسک ناشی از آن مورد پژوهش واقع گردیده است، تحلیل ریسک نه به صورت فازی، بلکه به صورت قطعی انجام گردیده است (*Liu & Zhai, 2019*)؛ (*Guglielmetti, et al., 2008*). بدیهی است که طبقه‌بندی ریسک به صورت طبقه‌بندی قطعی (صفر و یکی) (*Crisp*)، با تمام جنبه‌های مجهول احتمالاتی موجود در تونل سازی، قضاوت مهندسی را برای مدیریت ریسک پروژه دشوار و گاهی غیر قابل اطمینان خواهد کرد. با توجه به محدودیت‌های ذکر شده فوق، در این مقاله با لحاظ کردن ده متغیر ورودی متنوع و موثر از پنج دسته مختلف و همچنین تعداد ۱۵۰ عدد مجموعه پایگاه داده، با استفاده از روش سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (*ANFIS*)، به تخمین نرخ نشست ناشی از حفاری مکانیزه با استفاده از دستگاه حفار *TBM-EPB* پرداخته می‌شود. سپس نتایج و دقت پیش بینی بر اساس روش فوق تحلیل شده و سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی با دقت و ضریب همبستگی (*R*) بالاتر و همچنین ریشه میانگین مربعات خطا (*Root Mean Square Error*) *RMSE* پایین تر انتخاب و معرفی می‌گردد. نهایتاً، طبقه‌بندی سطوح مختلف ریسک نشست سطحی زمین، با استفاده از توابع

گر دیده است. *Herrenknecht* برای حفاری این بخش از تونل انتخاب



شکل ۱- معرفی خط ۶ متروی تهران



شکل ۲- پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران

**مشخصات خط ۶ متروی تهران**

- طول کل مسیر: ۳۲ کیلومتر
- تعداد ایستگاه: ۲۷ ایستگاه
- تعداد تقاطع با خطوط دیگر مترو: ۶ تقاطع

**مشخصات توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران**

- طول کل مسیر: ۶/۲ کیلومتر
- تعداد ایستگاه: ۴ ایستگاه

- خط ۶ متروی تهران
- توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران
- ایستگاه مترو
- ایستگاه تقاطعی مترو
- ایستگاه‌های محدوده توسعه جنوبی پروژه

موسوم به آیین‌نامه ۲۸۰۰ تعیین می‌شود. در جدول ۱، طبقه‌بندی زمین بر اساس این آیین‌نامه ارائه گردیده است. جهت محاسبه سرعت متوسط موج برشی تا عمق ۳۰ متری یعنی پارامتر  $V_{s(30)}$  از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$V_{s(30)} = \sum_{i=1}^n T_i / \sum_{i=1}^n \left( \frac{T_i}{V_{si}} \right) \quad (1)$$

که در آن  $T_i$  ضخامت لایه خاک،  $V_{si}$  سرعت امواج برشی لایه  $i$  ام و  $n$  تعداد لایه‌های مختلف خاک است. سرعت متوسط موج برشی در اکثر گمانه‌های طول مسیر مابین ۳۱۵ تا ۳۶۶ متر بر ثانیه تعیین گردیده است. از اینرو، نوع زمین مسیر مطالعه بر اساس آزمایش لرزه نگاری انجام شده نوع ۲ و یا ۳ است. در جدول ۱، طبقه‌بندی زمین بر اساس این آیین‌نامه ارائه شده است.

بر اساس آیین‌نامه *NEHRP* (جدول ۲)، محدوده مورد مطالعه در رده  $C$  تا  $D$  قرار می‌گیرند. در این آیین‌نامه سرعت متوسط موج برشی بیشتر از ۷۶۰ متر بر ثانیه به عنوان سنگ و سرعت متوسط موج برشی بیشتر از ۱۵۰۰ متر بر ثانیه، سنگ سخت در نظر گرفته شده است.

### ۳- نوع پروفیل خاک بر اساس نتایج آزمایش‌های لرزه‌ای

محدوده مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی به وسیله رسوبات آبرفتی درشت دانه و ریز دانه پوشیده شده است و در بخشی از مسیر تونل به طول حدود ۱۱۰۰ متر توده سنگ آهکی دیده می‌شود. برای مطالعات ژئوتکنیک مرحله اول این پروژه، تعداد ۱۶ گمانه ماشینی به عمق ۱۵ تا ۵۰ متر حفاری گردیده است. نتایج حفاری نشان می‌دهد که در محدوده مورد مطالعه لایه‌های خاکی از خاک‌های ریزدانه و درشت دانه تشکیل شده است. در اعماق سطحی خاک دستی وجود داشته و سپس به تناوب خاک‌های درشت دانه ماسه‌ای همراه با سیلت و رس و نیز خاک‌های ریزدانه رسی همراه با سیلت و ماسه وجود دارد. مطابق آزمایش‌های انجام شده، مشاهده می‌شود که میزان ریزدانه خاک‌ها غالباً بالای ۱۵ درصد بوده و نشانه خمیری خاک‌ها عموماً کمتر از ۲۵ درصد است.

در تقسیم بندی‌های لایه‌های زمین با توجه به سرعت متوسط موج برشی تا عمق ۳۰ متری، نوع زمین بر اساس آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله ایران

جدول ۱- تقسیم بندی نوع زمین از نظر لرزه‌ای بر اساس آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (آیین‌نامه ۲۸۰۰ - ویرایش چهارم)

نوع زمین	مواد تشکیل دهنده ساختگاه	پارامترها	
		$V_s$ (m/s)	$N_{1(60)}$
(۱)	سنگ و شبه سنگ، شامل سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی و خاک های سیمانته بسیار محکم با حداکثر ۵ متر مصالح ضعیف تر تا سطح زمین	$\geq 750$	-
(۲)	خاک خیلی متراکم یا سنگ سست، شامل شن و ماسه خیلی متراکم، رس بسیار سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر که مشخصات مکانیکی آن با افزایش عمق به تدریج بهبود یابد. سنگ‌های آذرین و رسوبی سست، مانند توف و یا سنگ متورق و یا کاملاً هوازده	۳۷۵-۷۵۰	$\geq 50$
(۳)	خاک متراکم تا متوسط، شامل شن و ماسه متراکم تا متوسط یا رس های سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر	۳۷۵-۱۷۵	۵۰-۱۵
(۴)	خاک متوسط تا نرم، لایه های خاک غیر چسبنده یا با کمی خاک چسبنده با تراکم متوسط تا کم، لایه‌های خاک کاملاً چسبنده نرم تا محکم	$\leq 175$	$\leq 15$

جدول ۲- تقسیم بندی انواع ساختگاه‌ها از نظر نوع خاک و سنگ (آیین نامه 2007 NEHRP)

رده مواد ساختگاه	توصیف مواد ساختگاه	سرعت موج برشی (m/sec)	
		حداکثر	حداقل
A	سنگ سخت	۱۵۰۰	
B	سنگ	۱۵۰۰	۷۶۰
C	سنگ نرم تا خاک بسیار متراکم مقاومت برشی زهکشی نشده بیش از ۱۰۰ کیلو پاسکال (عدد SPT بیش از ۵۰)	۷۶۰	۳۶۰
D	خاک سخت مقاومت برشی بین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلو پاسکال (عدد SPT بین ۱۵ تا ۵۰)	۳۶۰	۱۸۰
E	خاک نرم خاک رسی نرم با بیش از ۳ متر عمق با $PI \geq 20\%$ و درصد رطوبت بیش از ۴۰٪ و مقاومت برشی کمتر از ۵۰ کیلو پاسکال (عدد SPT کمتر از ۱۵)	۱۸۰	
F	۱. خاک با قابلیت به گسیختگی و یا رمبندگی تحت بارگذاری لرزه‌ای؛ همانند خاک‌های روانگرا، رس‌های بسیار حساس و خاک‌های سیمانته شده و رمبند ضعیف ۲. پیت‌ها و رس‌های با مواد عالی زیاد ۳. رس‌های با خواص پلاستیسیته بالا ( $PI \geq 75\%$ ) ۴. لایه‌های عمیق رس نرم، متوسط و سفت		

#### ۴- توصیف مجموعه داده‌ها و متغیرهای

##### ورودی و متغیر خروجی شبکه

برای اینکه یک مدل شبکه عصبی مصنوعی بتواند به طور نسبتاً دقیق نرخ نشست زمین را تخمین بزند، متغیرهای ورودی شبکه باید به درستی انتخاب شوند. بر اساس تحقیق انجام شده توسط سوانسوات و همکاران، پارامترهای موثر بر نشست زمین را می‌توان به سه دسته اصلی طبقه‌بندی کرد: شرایط زمین شناسی، هندسه تونل و فاکتورهای عملکردی دستگاه حفار *TBM* (Suwansawat & Einstein, 2006)؛ اما در این تحقیق، پارامترها و متغیرهای ورودی موثر و مورد بررسی که با استفاده از روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم می‌توانند منتج به تعیین میزان نشست سطحی زمین شوند، به طور کلی و جامع به شرح ذیل در پنج حوزه مختلف و ده پارامتر تقسیم بندی و ارائه می‌شوند:

۱) فاکتورهای عملکردی دستگاه حفار *EPB*: که در واقع در این گروه، پنج متغیر ذیل در ایجاد نشست سطحی زمین موثر می‌باشند:

۱- گشتاور دستگاه در حین حفاری (*Torque*)

- ۲- نرخ نفوذ دستگاه در حین حفاری (*Penetration Rate*)
- ۳- نیروی پیشران دستگاه (*Thrust*)
- ۴- فشار زمین در سینه حفاری (*Earth Pressure*)
- ۵- حجم تزریق گروت (*Grout Injection*)
- ۲) متغیر مربوط به هندسه تونل (*Tunnel geometry*):
- ۶- میزان حجم روباره بر روی تاج تونل (*Overburden*)
- ۳) پارامترهای زیر مجموعه شرایط زمین شناسی (*Geological conditions*):
- ۷- میانگین هد آب زیر زمینی (*Average Ground Water Head*):
- ۴) متغیرهای مربوط به شرایط ژئوتکنیکی محور تونل (*Geotechnical parameters*):
- ۸- شاخص استحکام (*Consistency Index*):
- ۹- نفوذپذیری (*Permeability*):
- ۵) خواص ژئومکانیکی خاک (*Geomechanical properties*):
- ۱۰- تست نفوذ استاندارد خاک (*SPT Test- Standard Penetration Test*)

به علت بسته بودن سیستم حفر تونل با سپر EPB، میزان آزادسازی تنش که منجر به ایجاد پدیده قوس فشار می‌گردد، کمتر از روش‌های دیگر تونل‌سازی است (Assadoulahi & Moomivand, 2021).

اما کماکان در روش حفاری مکانیزه با سپر EPB هم این چالش یعنی مواجهه با پدیده قوس فشار که ناشی از آزاد سازی تنش سینه کار است و در نهایت منتج به وقوع نشست تاج تونل و سطح زمین می‌گردد، وجود خواهد داشت؛ لذا با عنایت به متغیر بودن ضخامت روباره تونل مورد مطالعه این تحقیق بین ۱۲ و ۲۸ متر و همچنین تاثیر غیر قابل انکار فشار سینه کار در وقوع نشست سطحی و متعاقباً افزایش سطح ریسک پروژه، فشار زمین در سینه حفاری (Earth Pressure)، به عنوان یک عامل کلیدی در متغیرهای ورودی شبکه عصبی - فازی برای تخمین نشست در این پژوهش، در نظر گرفته شده است.

در مطالعه موردی این تحقیق در امتداد مسیر تونل، تعداد زیادی نشانگر پین نشست سنجی در فواصل تقریباً ۱۵ متری از هم نصب شده است. در واقع مجموعه پایگاه داده این پژوهش، انتخاب مختصات ۱۵۰ نقطه نشانگر بین متوالی از مسیر تونل مورد مطالعه است. همانطور که در شکل ۳ (که مختصات نشست سطحی زمین در کیلومتر ۲۸۳۰ از مبدا حفاری می باشد) نشان داده شده است، پنج نقطه که به ترتیب با حروف  $L', L, C, R, R'$  مشخص شده‌اند، معمولاً به عنوان مجموعه نقاط پایش نشست در برش عرضی تونل استفاده می‌شوند. از این رو، می‌توان بر اساس استخراج حداکثر میزان نشست قرائت شده عرضی، به رقم نشست دقیق زمین در یک نقطه خاص دست یافت. البته شایان ذکر است که با توجه به برخی از محدودیت‌های موقعیتی سایت، در بعضی موارد تعداد نقاط نشانگر عرضی کمتر از پنج نقطه در نظر گرفته شده است.

اطلاعات آماری پایه‌ای متغیرهای ورودی و خروجی مدل در جدول ۳، نشان داده شده است. مجموعه ای جامع شامل ۱۵۰ نمونه از مشاهدات نشست زمین و همچنین سایر پارامترهای ورودی شبکه به منظور فراهم نمودن اطلاعات کافی جهت آموزش و آزمایش شبکه در نظر گرفته شده است.

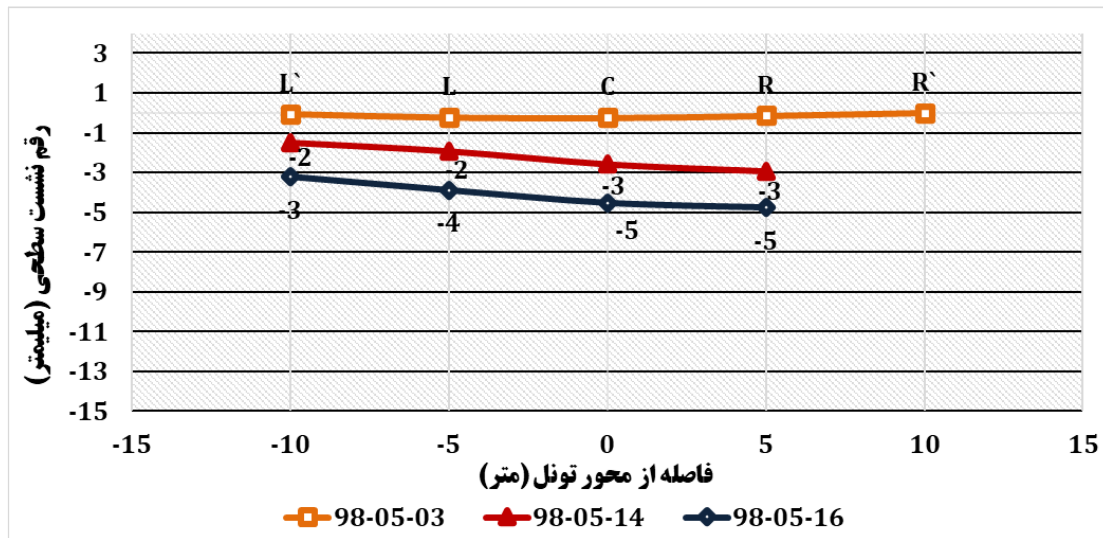
در انتخاب این ده متغیر تاثیرگذار در نرخ نشست سطحی در حفاری مکانیزه، همواره تلاش گردیده است هیچ مولفه‌ای حتی با درصد تاثیرگذاری ناچیز در ایجاد نشست هم نادیده گرفته نشود؛ لذا انتخاب متغیرهای ورودی شبکه در این تحقیق طیف گسترده ای از دلایل موثر در ایجاد نشست زمین را پوشش می‌دهد. به عنوان مثال، به علت انتخاب و درجه اهمیت پارامتر ردیف ۴ ذکر شده یعنی فشار زمین در سینه حفاری که یکی از کلیدی ترین عوامل موثر در ایجاد نشست سطحی زمین در تونل‌سازی با سپر EPB است، به اختصار پرداخته خواهد شد. در تحلیل تاثیر فشار سینه حفاری بر نشست سطح زمین در حفاری مکانیزه با سپر EPB، نتایج بیانگر این است که برای فشار نگهداری جبهه کار با عدد ثابت، با میزان افزایش نسبت ضخامت حجم روباره به قطر تونل ( $H/D$ ) نرخ نشست کاهش پیدا می‌کند. این در حالیست که نشست در تاج تونل به نسبت چندین برابر نشست در سطح زمین است. در زمین‌های سست که با سپر EPB حفر می‌شوند، بدیهی است که با کم کردن فشار سینه حفاری در تونل، جا بجایی در جبهه کار اتفاق می‌افتد. با این وجود با اندازه گیری میزان نشست در سطح زمین نمی‌توان به درستی در رابطه با میزان جابه جایی جبهه کار تونل قضاوت نمود. پدیده نشست زمین تنها قسمتی از نتایج ناشی از تاثیر فشار جبهه کار تونل است.

در صورتیکه میزان فشار نگهداری جبهه کار درست در نظر گرفته شود، جابه جایی جبهه کار ناچیز بوده و تاثیر آن بر نرخ نشست زمین نیز می تواند قابل اغماض باشد. لذا در چنین موقعیتی عدد نشست زمین منوط به کیفیت

تزریق گروت (*Grout Injection*) (پارامتر تعریف شده ردیف ۵) خواهد بود (Assadoulahi & Moomivand, 2021).

مطابق پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، با افزایش ضخامت حجم روباره و یا نسبت ضخامت روباره به قطر تونل، با اعمال فشار نگهداری جبهه کار به روشهای تجربی و تحلیلی، میزان جابه‌جایی‌های حاصل از مدلسازی جبهه کار تونل با استفاده از نرم افزار، برای نسبت ضخامت روباره به قطر تونل بیشتر از ۱/۵۶، خیلی بیشتر از نسبت ضخامت روباره به قطر برابر ۱/۳۳ است. این مساله بیانگر این است که





شکل ۳- پروفیل نشست در فاصله ۲۸۳۰ کیلومتری از نقطه مبداء پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران (Behro.co, 2021)

جدول ۳- اطلاعات آماری پایه ای متغیرهای ورودی و خروجی مورد استفاده جهت مدل‌سازی

نام متغیر	مخفف	نوع متغیر	مجموعه داده ها (۱۵۰ عدد)					واحد
			مقدار حد اقل متغیر	مقدار حداکثر متغیر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	
گشتاور دستگاه	<i>To</i>	ورودی	۱/۴	۱۴۵/۳	۵/۲۴	۱۲/۳۳	۲/۳۵	MN.m
نرخ نفوذ	<i>Pr</i>	ورودی	۵	۲۸	۱۷/۷۸	۵/۴۳	۰/۳۱	mm/rev
نیروی پیشران دستگاه	<i>Th</i>	ورودی	۶۴۲۱	۳۴۰۰۴	۲۰۵۷۱/۱۹	۴۴۰۰/۶۰	۰/۲۱	KN
فشار زمین	<i>Ep</i>	ورودی	۰	۱/۵۷	۰/۵۸	۰/۵۲	۰/۹۱	bar
حجم تزریق گروت	<i>Gi</i>	ورودی	۰	۲۰۴۰۱	۸۶۰۸/۸۳	۲۴۱۸/۹۹	۰/۳۲	Liter
حجم روباره	<i>O</i>	ورودی	۱۲	۲۸	۲۲/۶۶	۴/۲	۰/۱۹	m
هد آب زیر زمینی	<i>W</i>	ورودی	۰	۲۰	۶/۳۳	۷/۴۷	۱/۱۸	m
شاخص استحکام	<i>Ic</i>	ورودی	۰/۷۵	۱	۰/۹۳	۰/۱۱	۰/۱۲	/
نفوذپذیری (نرمال شده)	<i>K</i>	ورودی	۴	۵	۴/۰۹	۰/۲۹	۰/۰۷	cm/s
تست نفوذ استاندارد	<i>SPT</i>	ورودی	۴۲/۵	۵۰	۴۹/۸۵	۱/۰۵	۰/۰۲	/
حداکثر نشست	<i>Sm</i>	خروجی	۱/۱	۲۷۱	۲۰/۴۴	۳۲/۲۲	۱/۵۸	mm

## ۵- روش تحقیق

تونل‌سازی مکانیزه در مناطق شهری مدل ارزیابی ریسکی برای ساختمان‌های متأثر از تونل‌سازی ارائه گردیده است که شامل سه مرحله اساسی ذیل است. در شکل ۴، فلوچارت انجام مرحله به مرحله مدل ارزیابی ریسک حفاری پیشنهادی توسط ویتوریو گوگلیومتی و همکاران نشان داده شده است (Guglielmetti, et al., 2008).

در پژوهش‌های صورت گرفته پیش از این، میزان نشست سطح زمین به روش‌های مختلف بر اساس متغیرهای مستقل و وابسته متفاوت محاسبه شده است، اما به کارگیری از نتیجه کار پس از اطلاع از میزان نشست سطح زمین، مساله ای بوده که کمتر به آن پرداخته شده است. در کتاب

مهندسی به ویژه مسائل با هدف تخمین و تقریب تابع، به صورت گسترده‌ای مورد بهره برداری واقع شده است. مدل مذکور بر مبنای استنتاج سوگنو طراحی شده و ساختار آن به این ترتیب است که سیستم فازی را در قالب یک شبکه عصبی پنج لایه برگشتی شامل می‌شود (لایه صفر بیانگر لایه ورودی است). معماری ANFIS تنها در سیستم‌هایی با یک متغیر خروجی قابلیت به کارگیری دارند. از اینرو، از آنجائیکه مساله موضوع این پژوهش نیز دارای یک پارامتر خروجی (حداکثر میزان نشست زمین) است، این مدل برای پیش بینی انتخاب گردیده است. شمای کلی ساختار ANFIS برای مدل‌هایی با دو متغیر ورودی در شکل ۵، ارائه گردیده است. در تصویر مذکور، گره‌های تطبیقی با مربع و گره‌های ثابت با دایره نشان داده شده است.

روشی که در یادگیری ANFIS استفاده می‌شود، یک فرایند ترکیبی (Hybrid) است که شامل دو روش پس انتشار خطا و مربعات حداقل است. بدین ترتیب که در هر دور آموزش، ابتدا متغیرهای قسمت مقدمه با استفاده از روش مربعات حداقل حاصل می‌شوند. سپس در مرحله بعدی که در آن نخست متغیرهای قسمت نتیجه ثابت فرض می‌شوند، مقدار متغیر خروجی با شرایط فوق تعیین شده و با خروجی مطلوب مقایسه می‌گردد تا خطای سیستم معلوم گردد. این خطا بوسیله روش پس انتشار خطا به ANFIS باز می‌گردد تا بدین طریق مقادیر متغیرهای قسمت مقدمه اصلاح شوند. در یک روند کلی، در سیستم ANFIS نخست درجه‌های عضویت متغیرهای ورودی توسط لایه ابتدایی معین می‌گردند. سپس بوسیله لایه دوم، میزان درجه عضویت قسمت مقدمه هر یک از قانون‌ها توسط یک عملگر فازی بر مبنای درجات عضویت ورودی، به دست خواهد آمد. مقادیرهای وزنی مربوط به هر یک از قانون‌های فازی، با استفاده از میانگین وزنی در لایه سوم معین خواهند شد که به این مقادیر، مقادیر نرمال شده نیز گفته می‌شود. لایه چهارم جهت تعیین مقدار خروجی هر یک از قانون‌ها، وزن آن قانون خاص را در تابع خطی استنتاج سوگنو ضرب خواهد کرد. نهایتاً، تمامی ارقام ورودی به لایه پنجم با یکدیگر جمع می‌گردند تا بدین ترتیب خروجی نهایی ANFIS مشخص گردد (Naderpour & Mirrashid, 2020).

### ۱) بررسی وضعیت ساختمان‌ها BCS (Building Condition Survey)

عملیات بررسی شرایط ساختمان‌ها پیش از حفاری شامل بازدید میدانی و ثبت مشخصات عمومی ساختمان‌ها، تهیه شناسنامه برای هر ساختمان، محاسبه شاخص آسیب پذیری بنا و تعیین رده آسیب پذیری یا کلاس ساختمان‌ها بوده و نتایج آن در گزارشی با عنوان "بررسی شرایط ساختمان‌های واقع در محدوده تاثیر محور تونل‌سازی پروژه مد نظر" ارائه می‌گردد.

### ۲) ارزیابی ریسک ساختمان‌ها BRA (Building Risk Assessment)

این بخش شامل تعیین رده آسیب وارده محتمل برای ساختمان‌ها بر اساس نشست پیش بینی شده و تشکیل ماتریس ریسکی که شامل کلاس ساختمان و رده آسیب محتمل برای هر یک، بر اساس میزان نشست سطح زمین و در نهایت تعیین کلاس ریسک ساختمان‌ها است.

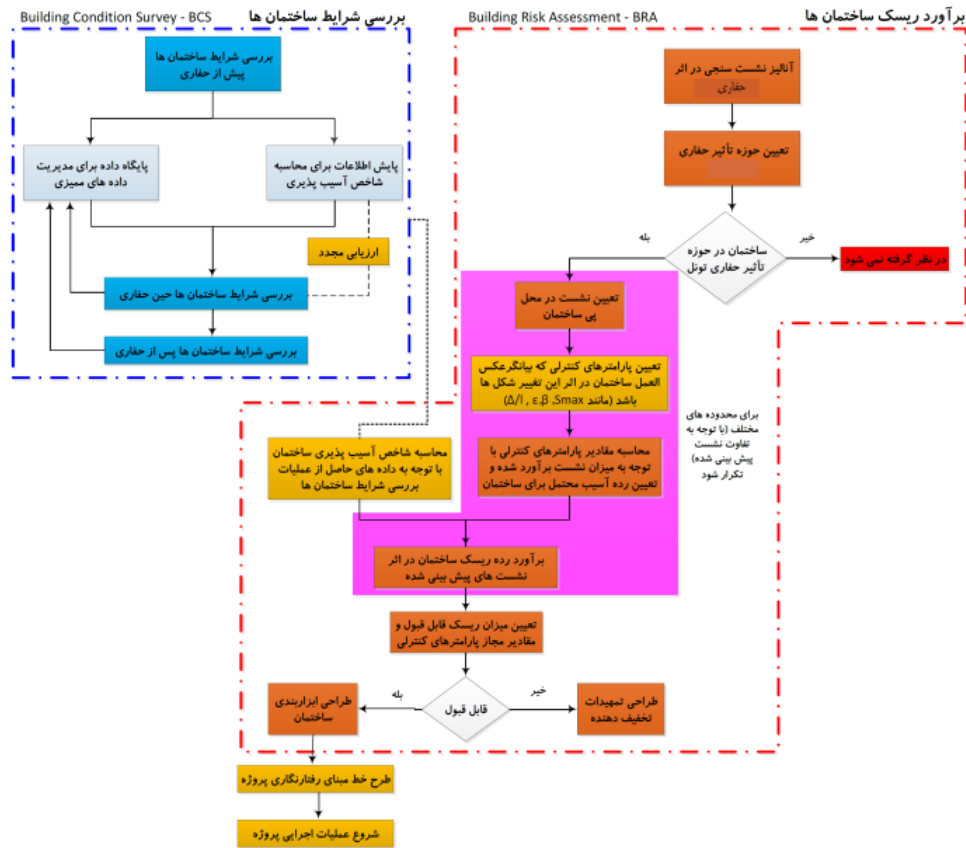
در واقع همانطور که در شکل ۴، به وضوح مشاهده می‌شود، اولین مرحله از بخش ارزیابی ریسک ساختمان‌ها در فلوجارت ارائه شده مبحث آنالیز نشست سنجی در اثر حفاری است. در این مقاله ابتدا با استفاده از سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی، عدد نشست سطحی زمین پیش بینی می‌شود. سپس، از آنجائیکه عدم قطعیت جزئی از ذات متغیرهای استخراج شده از پروژه‌های تونل‌سازی است، لذا با استفاده از روش‌های مبتنی بر محاسبات فازی که در بر گیرنده عدم قطعیت‌هایی نظیر تصادفی بودن داده‌ها می‌باشند، طبقه‌بندی سطوح مختلف ریسک با استفاده از توابع عضویت گوسی انجام می‌گردد.

### ۳) روش حفاظت از ساختمان‌ها (Building Protection Policy) BPP

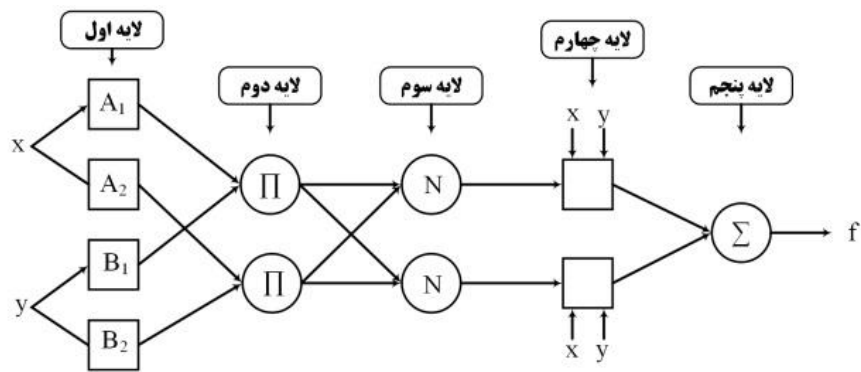
در این بخش پس از اطلاعات کسب شده از دو مرحله قبل، بهینه ترین نوع استراتژی حفاظت بر اساس دو روش اصلی حفاظت پیشگیرانه و حفاظت اصلاحی ساختمان‌ها، برای ساختمان‌های مختلف با درجه اهمیت متفاوت در نظر گرفته می‌شود (Guglielmetti, et al., 2008).

### ۵-۱- سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی

سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی از جمله پرکاربردترین نوع مدل‌های عصبی- فازی بوده که در علوم



شکل ۴- فلوچارت انجام مرحله به مرحله مدل ارزیابی ریسک حفاری



شکل ۵- ساختار ANFIS با دو متغیر ورودی

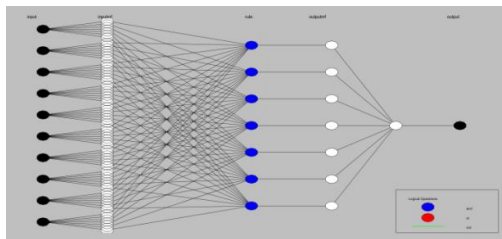
معادلات ۲ تا ۵ ارائه شده که بیانگر روابط محاسبه خطا به ترتیب شامل میانگین مربعات خطا  $MSE$  (Mean Square Error), میانگین خطای مطلق  $MAE$  (Mean Absolute Error) و ریشه میانگین مربعات خطا  $RMSE$  می‌باشند،

### ۵-۲- تجزیه و تحلیل عملکرد

هدف از تجزیه و تحلیل عملکرد این است که نشان دهد مدل پیش‌بینی ایجاد شده چقدر دقیق و قابل اعتماد است.

$$X_{scaled} = [(0.9 - 0.1) (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})] + 0.1 \quad (۶)$$

در این مقاله پایگاه داده‌ها به نسبت دو به یک، به ترتیب جهت آموزش و آزمایش شبکه تقسیم بندی شده است. به عبارتی دیگر از ردیف داده شماره ۱ تا ۱۰۰ برای آموزش مدل و از داده شماره ۱۰۱ تا ۱۵۰ جهت آزمون *ANFIS* استفاده گردیده است. ساختار مدل عصبی- فازی برای تخمین حداکثر نشست سطحی زمین در تونل‌سازی با استفاده از دستگاه حفار تمام مکانیزه *EPB* در شکل ۶، قابل مشاهده است. برای متغیرهای ورودی از توابع عضویت گوسی استفاده شده که مشخصات مربوط به پارامترهای واریانس و میانه در آنها، توسط الگوریتم یادگیری *ANFIS* با استفاده از داده‌های آموزش، تعیین می‌گردد. همانگونه که از معماری ساختار مدل عصبی - فازی در شکل ۶، نیز مشخص است، برای هر یک از ده پارامتر ورودی این سیستم از هفت تابع عضویت گوسی استفاده شده است.



شکل ۶- ساختار مدل عصبی - فازی پیشنهادی

جزئیات توابع عضویت متغیرهای ورودی در شکل ۷، به تصویر کشیده شده است. در این مقاله از روش خوشه بندی جزئی (*Sub clustering*) جهت ساخت سیستم استنتاجی اولیه استفاده شده است. در ضمن از روش ترکیبی (*Hybrid*) جهت بهینه سازی (*Optimization*) روش اتخاذ شده برای آموزش سیستم استنتاج فازی *FIS* (*Fuzzy inference system*) استفاده گردیده است. پس از مشخص نمودن تعداد دوره‌های آموزش (*Epochs*) که در این پژوهش ۱۰۰ بار در نظر گرفته شده است، شبکه مورد آموزش قرار می‌گیرد. سپس، مطابق تصویر ارائه شده در شکل ۸، سیستم آماده شده، به فضای کاری (*Workspace*) متلب ارسال و برای تخمین خروجی، استفاده خواهد شد. همانطوریکه از شکل ۸ به وضوح مشاهده می‌گردد، مطابق ساختار تعریف شده، *ANFIS* قادر

می‌تواند برای محاسبه حد انتظار مابه تفاوت بین پیش‌بینی‌ها و ارقام هدف انتخاب شوند. البته در *ANFIS* از رابطه ۴ یعنی ریشه میانگین مربعات خطا (*RMSE*)، جهت معیار توقف آموزش شبکه استفاده می‌شود. فرمول‌های محاسبه *MAE*، *MSE* و *RMSE* به شرح ذیل تعریف می‌شوند:

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n |r_i - p_i| \quad (۲)$$

$$MSE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (r_i - p_i)^2 \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (r_i - p_i)^2} \quad (۴)$$

که در این تحقیق،  $n$  تعداد کل داده‌ها (مشاهدات در نظر گرفته شده) (*Samples Observations*)،  $p$  رقم پیش‌بینی شده نشست توسط شبکه (*Outputs*) و  $r$  عدد قرائت شده نشست سطحی (*Targets*) می‌باشند. بدیهی است که مقادیر کمتر در این روابط بیانگر عملکرد بهینه تر شبکه می‌باشند.

## ۶- یافته های تحقیق

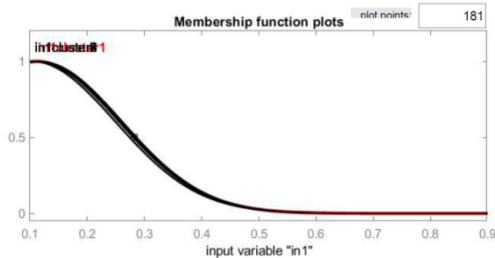
### ۶-۱- خروجی سیستم استنتاج فازی - عصبی

#### تطبیقی

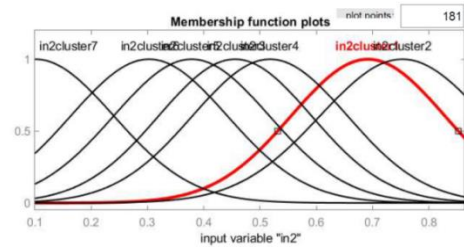
همانطوری که در بخش ۴ این مقاله به تفصیل تشریح گردید در مجموع، تعداد ۱۵۰ نمونه از مشاهدات شامل ده متغیر تاثیرگذار ورودی و یک متغیر خروجی (نشست زمین) در هر نمونه، برای این پژوهش گردآوری گردیده است که مشخصات آماری آنها پیشتر در جدول شماره ۳ ارائه شد. لازم به ذکر است که برای سیستم‌هایی از قبیل شبکه عصبی و یا عصبی- فازی، معمولاً بازه تغییرات پارامترها محدود می‌گردند. این امر، موجب افزایش دقت سیستم می‌گردد. از اینرو، جهت نرمال سازی پایگاه اطلاعات مذکور از رابطه ذیل (۶) در بازه بین ۰/۱ و ۰/۹ استفاده شده است (*Ahmadi, et al., (Naderpour, et al., 2010)*:2014)

مذکور با ارقام قرائت شده نشست سطحی زمین در محل پروژه در شکل ۹، ارائه گردیده است.

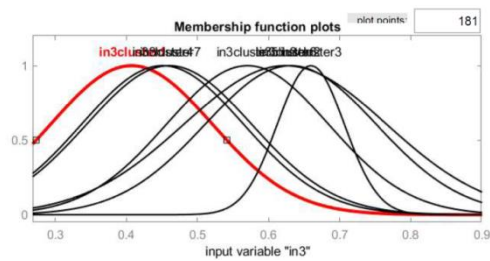
بوده است با دقت نسبتا بالا و رقم  $0.1322$  ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) که به طور نسبی خطای پایینی است، مدل را پیش بینی نماید. مقایسه نتایج خروجی مدل



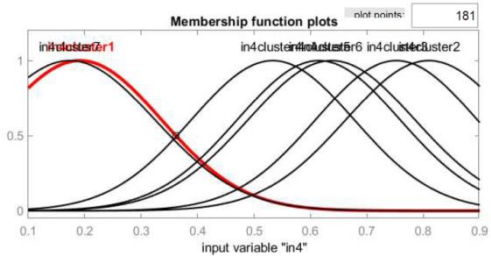
ب- توابع عضویت متغیر گشتاور دستگاه



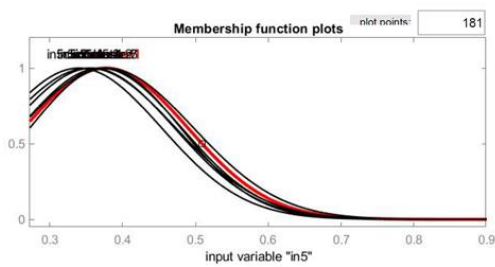
الف- توابع عضویت متغیر نرخ نفوذ



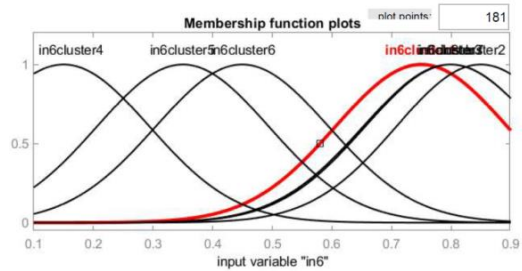
ت- توابع عضویت متغیر نیروی پیشران دستگاه



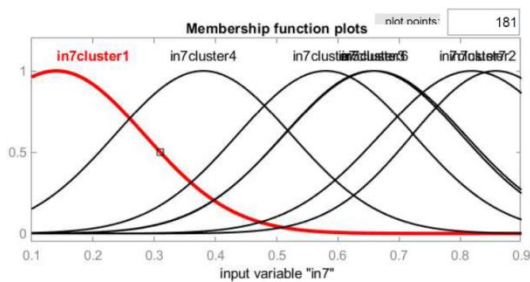
پ- توابع عضویت متغیر فشار زمین



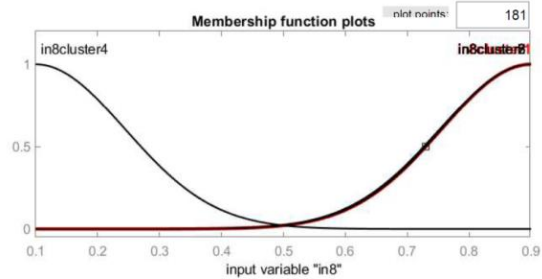
ج- توابع عضویت متغیر حجم تزریق گروت



ث- توابع عضویت متغیر حجم روباره



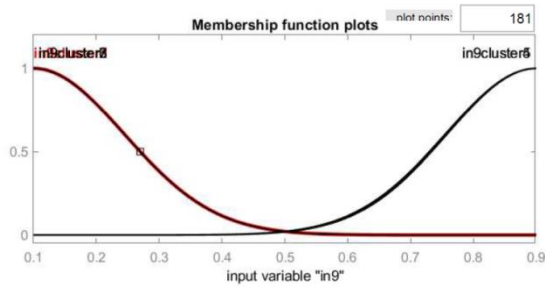
ح- توابع عضویت متغیر هد آب زیر زمینی



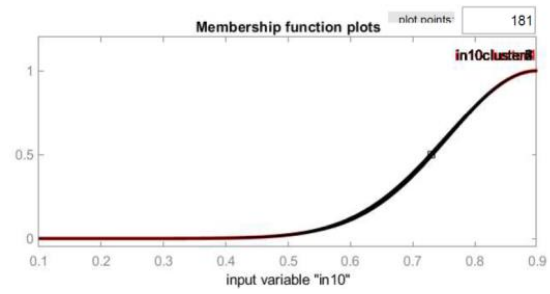
چ- توابع عضویت متغیر شاخص استحکام

شکل ۷- توابع گوسی عضویت ده متغیر ورودی

طبقه‌بندی فازی ریسک نشست ناشی از حفاری مکانیزه با ماشین TBM-EPB...، توحید مقتدر و ...، ص ۷۳-۹۵

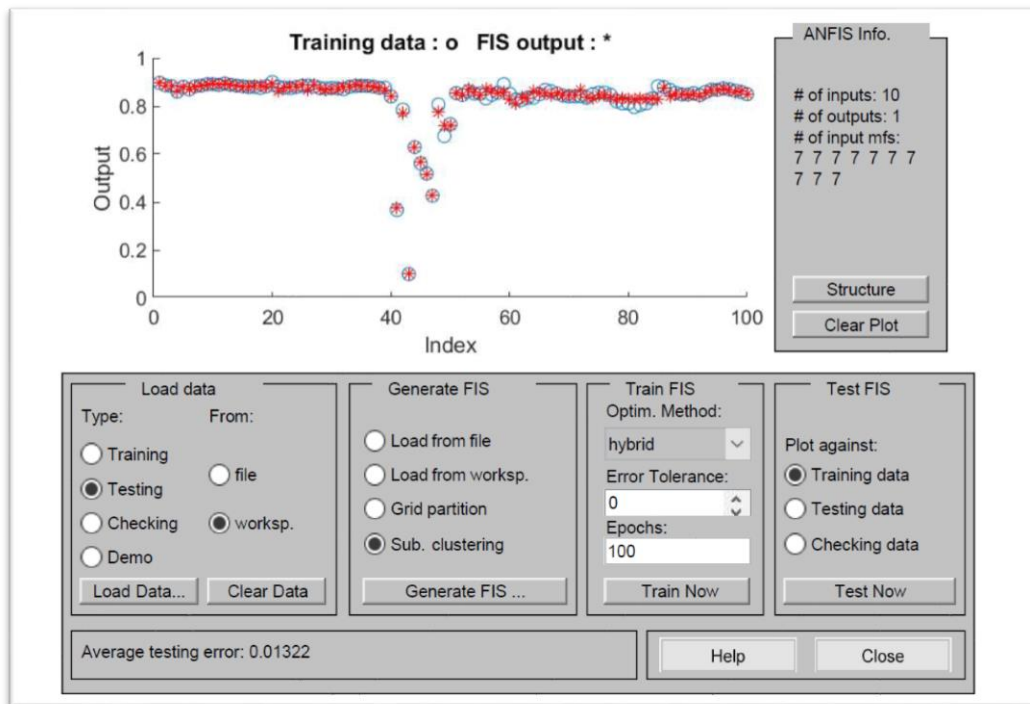


د- توابع عضویت متغیر نفوذپذیری

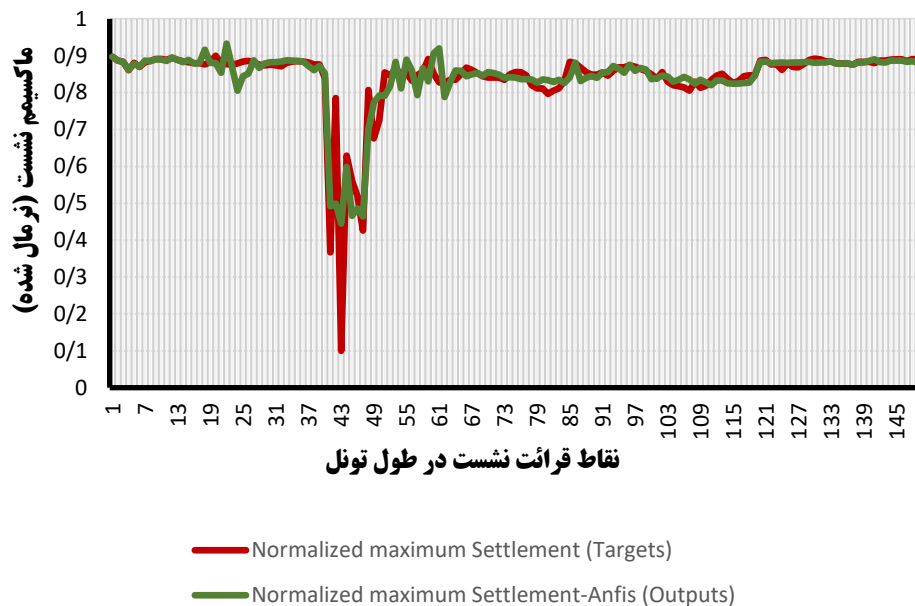


خ- توابع عضویت متغیر تست نفوذ استاندارد

ادامه شکل ۷ - توابع گوسی عضویت ده متغیر ورودی



شکل ۸- مختصات کلی معماری مدل ANFIS در متلب



شکل ۹- قیاس نتایج خروجی ANFIS با داده‌های واقعی نشست

## ۲-۶- بررسی تاثیر متغیرهای ورودی بر روی نشست (Settlement):

یکی از راهکارها به منظور بررسی تاثیر متغیرهای ورودی بر روی متغیر خروجی، استفاده از گراف‌های سطح است. در یک گراف سطح، تغییرات مولفه خروجی که از مدل بدست می‌آید، به ازای تغییرات دو پارامتر ورودی، قابل مطالعه و تحلیل است. در ترسیم هر گراف، برای سایر متغیرهایی که در آن گراف قرار نمی‌گیرند، مقداری ثابت و عموماً برابر با مقدار میانه متغیر، در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، می‌توان میزان حساسیت به تغییرات هر جفت از متغیرهای ورودی، بر روی پارامتر خروجی را تعیین کرد.

(Naderpour & Mirrashid, 2020)

در این پژوهش، گراف ارائه شده در شکل ۱۰، به عنوان نمونه جهت آنالیز تاثیر متقابل دو پارامتر مهم فشار زمین در سینه حفاری (*Earth Pressure*) و حجم تزریق گروت (*Grout Injection*) که به ترتیب در شکل مذکور با علائم اختصاری *in4* و *in5* نمایش داده شده است، بر نشست سطحی زمین (*out1*) ارائه گردیده است. دیاگرام ارائه شده جزء نمودارهای خروجی ساختار تعریف شده ANFIS در این پژوهش است و در رابطه با تاثیر متقابل هر

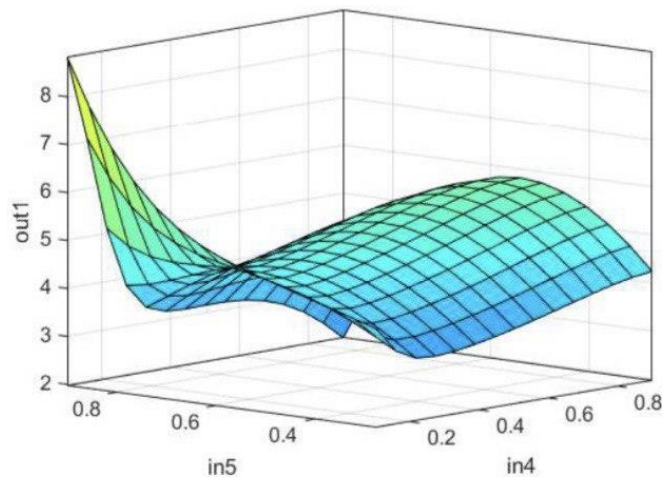
دو پارامتر تعریف شده از متغیرهای ورودی این تحقیق بر میزان نشست، قابل ارائه و آنالیز است. همانطور که در قسمت مقدمه به دلایل انتخاب پارامتر فشار سینه کار به عنوان یک متغیر کلیدی در احتمال وقوع ریسک نشست اشاره گردید و پیرو آن بر اساس تصویر این گراف، می‌توان به وضوح به روند تاثیر دو متغیر منتخب مذکور در ایجاد نشست سطحی پی برد.

## ۳-۶- طبقه‌بندی فازی ریسک (*Risk fuzzy classification*):

در اکثر پژوهش‌های انجام شده در خصوص ارتباط بین سطوح مختلف ریسک و مقادیر نشست سطحی، ریسک منوط به بازه‌های قطعی (*Crisp*) مقادیر نشست گردیده است. از موارد مشابه چنین مطالعاتی می‌توان به تحقیقات طبقه‌بندی رده‌های مختلف ریسک با توجه نرخ نشست، توسط Burland و همکاران در سال ۱۹۷۷ و همچنین Rankin در سال ۱۹۸۸ اشاره نمود (Guglielmetti, et al., 2008). بسیاری از کشورها استانداردهایی را تعریف کرده‌اند که بیانگر معیاری جهت تعیین اعداد نشست قابل پذیرش در حفاری با استفاده از سپر در خاک نرم و یا سنگ

مبنای تعاریف بازه های قطعی نشست در جدول ۵ از توابع گوسی بر اساس رقم میانه ارائه شده و رقم واریانس پیشنهاد شده نرم افزار، به عنوان توابع عضویت فازی استفاده گردیده است. همانگونه که در شکل ۱۱، مشاهده می‌گردد، ارقام میانگین بازه‌های نشست در جدول ۵، به عنوان نقاط میانه توابع عضویت گوسی در نظر گرفته شده و با استفاده از پنج تابع عضویت گوسی، ریسک ناشی از نشست سطح زمین به صورت فازی در پنج کلاس مختلف طبقه‌بندی گردیده است.

سخت است (جدول ۴). از طرفی دیگر، مطابق استاندارد شماره ۲۰۱۳-۵۰۹۱۱ GB چین نیز که ملاکی برای مطالعات ارقام نشست جهت مهندسی حمل و نقل ریلی شهری است و همچنین استانداردهای سایر کشورها، ریسک نشست طبق جدول ۵، در بازه‌های قطعی ارقام نشست، طبقه‌بندی شده است (Liu & Zhai, 2019). در این مقاله جهت طبقه‌بندی سطوح مختلف ریسک از توابع عضویت فازی استفاده شده است. با استفاده از نرم افزار متلب و بر



X (input):	in4	Y (input):	in5	Z (output):	out1
X grids:	15	Y grids:	15	Evaluate	
Ref. Input:	[0.5 0.4826 0.5841 NaN N:		Plot points:	101	Help Close
Ready					

شکل ۱۰- گراف سطح دو متغیر کلیدی ورودی فشار زمین در سینه حفاری و حجم تزریق گروت در مقابل تنها متغیر خروجی ANFIS (نشست سطحی)

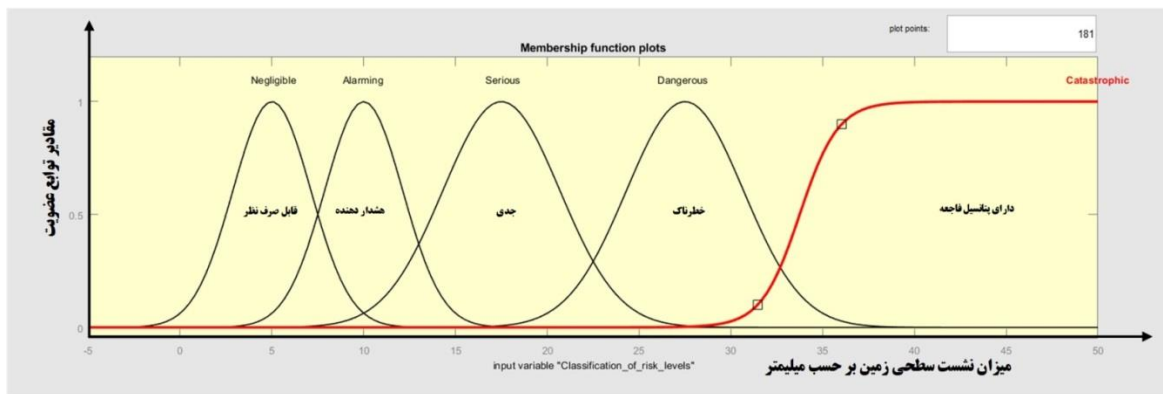
جدول ۴- استانداردهای کشورهای مختلف جهت تعیین ارقام یا بازه نشست قابل پذیرش در حفاری سپر در خاک نرم و یا سنگ سخت

نام کشورها	چین	فرانسه	ژاپن	آمریکا	آلمان
نشست سطحی قابل پذیرش (mm)	سنگ سخت: ۱۰-۴۰ خاک نرم: ۱۵-۴۵	سنگ سخت: ۱۰-۲۰ خاک نرم: ۲۰-۵۰	۲۵-۵۰	۱۰-۱۵	۵۰



جدول ۵- طبقه‌بندی سطوح مختلف ریسک ناشی از نشست سطحی زمین در حفاری تونل

رده ریسک	۱	۲	۳	۴	۵
توصیف کیفی ریسک	قابل صرف نظر	هشدار دهنده	جدی	خطرناک	فاجعه آمیز
بازه نشست سطحی زمین (mm)	۱۰-۰	۱۵-۵	۲۵-۱۰	۳۵-۲۰	۴۵-۳۰



شکل ۱۱- طبقه‌بندی فازی ریسک ناشی از نرخ نشست سطحی زمین در حین حفاری تونل

## ۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله در دو بخش مستقل به موارد ذیل پرداخته شد:

۱) تخمین عدد نشست سطحی زمین ناشی از حفاری مکانیزه با استفاده از دستگاه *TBM-EPB* بر اساس روش سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (*ANFIS*).

۲) تحلیل و طبقه‌بندی فازی ریسک ناشی از نشست سطحی در حفاری مکانیزه با استفاده از توابع عضویت گوسی در پنج کلاس مختلف ریسک.

در بخش اول با انتخاب کامل پارامترهای موثر در وقوع نشست سطحی، از پنج حوزه مختلف دارای پتانسیل ایجاد نشست سعی گردید، اولاً به تاثیر ارتباط متقابل (*Interconnection*) ده متغیر ورودی در وقوع نشست پرداخته شود. ثانياً، نرخ نشست سطحی بر اساس این ده متغیر جامع ورودی برای بهره برداری در بخش دوم پژوهش، پیش بینی گردید. سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی با در نظر گرفتن هفت تابع عضویت گوسی برای

هر یک از ده متغیر ورودی در لایه اول شبکه وهمچنین تعریف هفت قانون فازی برای استنتاج خود در لایه دوم شبکه، قادر بوده است، متغیر خروجی سیستم که نشست حداکثر سطحی است را با دقت مطلوب و رقم  $0.1322$  ریشه میانگین مربعات خطا (*RMSE*) پیش بینی نماید.

در بخش دوم با استفاده از خروجی طبقه‌بندی فازی ریسک ناشی از نشست سطحی زمین در حین حفاری مکانیزه تونل، می‌توان ورودی بخش آنالیز نشست سطحی در بخش برآورد ریسک ساختمان‌ها را در فلوچارت انجام مرحله به مرحله مدل ارزیابی ریسک حفاری ویتوریو گوگلیومتی و همکاران (شکل ۴) پیش بینی نمود. نهایتاً بر اساس و توالی سه مرحله بررسی وضعیت ساختمان‌ها، ارزیابی ریسک ساختمان‌ها و همچنین روش حفاظت از ساختمان‌ها، ریسک ناشی از نشست با دقت مطلوب، قابل پیش بینی و محاسبه و همچنین خطرات احتمالی ناشی از آن با مدیریت قابل پیشگیری است.

فازی تعریف کردن رده های مختلف ریسک ناشی از حداکثر نشست، این کمک را به تصمیم گیرندگان تیم

طبقه‌بندی سطوح مختلف ریسک ناشی از نشست سطحی زمین در حفاری تونل در نظر بگیریم، از تعداد ۱۵۰ عدد نقطه نظارت در طول تونل، تعداد ۸۰ نمونه با نشست کمتر از ۱۵ میلیمتر، در سطوح یک و دو ریسک و تعداد ۷۰ نقطه با عدد نشست بیشتر از ۱۵ میلیمتر در سطوح سه و چهار و پنج ریسک، قرار خواهند گرفت. در حالیکه طبق شکل ۱۱ از آنجائیکه مرز قطعی و مشخصی بین سطوح مختلف ریسک وجود ندارد، تخصیص هر نقطه پیش بینی شده در خروجی سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی به توابع متفاوت عضویت ریسک به صورت فازی با درجات عضویت مختلف، به طور همزمان امکان پذیر است.

#### ۸- تقدیر و تشکر

مرجع دریافت داده‌های مورد نیاز و اطلاعات فنی مطالعه موردی این تحقیق شرکت مهندسی مشاور جامع بهرو، مشاور کارفرمای سیویل، تجهیزات، ناوگان و بهره برداری خط ۶ متروی تهران است. بدینوسیله از مدیر عامل محترم وقت شرکت، جناب آقای غلامرضا شمسی و کلیه مدیران و کارشناسان معاونت های ساختمانی و فنی - مهندسی شرکت و همچنین مهندسان سرپرست کارگاه شرکت های مشاور و پیمانکار پروژه بخش توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی می‌کند تا در شرایط عدم قطعیت، با لحاظ کردن معیارهای مهم دیگری در تصمیم‌گیری بتواند سطح ریسک حاصل از نشست را تعریف نموده و مطابق کلاس تعیین شده ریسک نشست، تمهیدات مقتضی جهت کنترل و مدیریت ریسک را اتخاذ نمایند. به عنوان مثال، میزان پیش بینی ۵ میلیمتر نشست با درجه عضویت ۱ به تابع عضویت گوسی ریسک قابل صرف نظر کردن و همچنین با درجه عضویت قریب به صفر به تابع گوسی ریسک هشدار دهنده تعلق دارد. در یک چنین شرایطی تکلیف تعیین کلاس ریسک کاملاً مشخص است؛ اما در مثالی دیگر، چنانچه با استفاده از روش‌های مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی، رقم حداکثر نشست سطحی ۷/۵ میلیمتر تخمین زده شود، در واقع نرخ نشست به طور یکسان و با درجه عضویت ۰/۵ هم به تابع عضویت ریسک قابل صرف نظر و هم به تابع عضویت ریسک هشدار دهنده تعلق دارد. از اینرو، در چنین مواقعی با لحاظ کردن قضاوت مهندسی که منحصر به یک پروژه خاص است و تحلیل و روش ارائه شده در این مقاله، می‌توان به تصمیم بهینه‌کاربردی در مدل ارزیابی ریسک دست یافت.

در مطالعه موردی این تحقیق یعنی بخش توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران، پس از غیر فازی سازی (Defuzzification) خروجی ANFIS با استفاده از فرمول نرمال سازی رابطه (۶)، چنانچه جدول ۵ را جهت

#### ۹- مراجع

- Abdellah, W. R., Ali, M., & Yang, H. (2018). Studying the Effect of Some Parameters on the Stability of Shallow Tunnels. *Journal of Sustainable Mining*, 17(1), 20-33.
- Addenbrooke, T. I., Potts, D., & Puzrin, A. (1997). The Influence of Pre-Failure Soil Stiffness on the Numerical Analysis of Tunnel Construction. *Geotechnique*, 47(3), 693-712.
- Ahangari, K., Moeinossadat, S. R., & Behnia, D. (2015). Estimation of Tunnelling-Induced Settlement by Modern Intelligent Methods. *Soils and Foundations*, 55(4), 737-48.
- Ahmadi, M., Naderpour, H., & Kheyroddin, A. (2014). Utilization of Artificial Neural Networks to Prediction of the Capacity of CCFT Short Columns Subject to Short Term Axial Load. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14(3), 510-17.
- Assadoulahi, M., & Moomivand, H. (2021). A Critical Analysis of the Effect of Earth Pressure Balance (EPB) on Displacements of Tunnel Face by Numerical Modeling for the Geomechanical Conditions of Abuzar Water Transitional Tunnel. *Journal of Civil and Environmental Engineering, University*

of Tabriz, 50(4), 83–93.

- Attewell, P. B., & Hurrell, M. (1985). *Settlement Development Caused By Tunnelling in Soil*. *Ground Engineering*, 18(8), 17–20.
- Baziar, M. H., Moghadam, M. R., Choo, Y. W., & Kim, D. S. (2016). *Tunnel Flexibility Effect on the Ground Surface Acceleration Response*. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(3), 457–76.
- Behro Comprehensive Consulting Engineers Company (Behro.co). (2021). *The employer's consultant in civil, procurement, equipment, rail transportation, & the operation of Tehran Metro - Line 6*.
- Bouayad, D., & Emeriault, F. (2017). *Modeling the Relationship between Ground Surface Settlements Induced by Shield Tunneling and the Operational and Geological Parameters Based on the Hybrid PCA/ANFIS Method*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 68, 142–152.
- Bouayad, D., Emeriault, F., & Maza, M. (2015). *Assessment of Ground Surface Displacements Induced by an Earth Pressure Balance Shield Tunneling Using Partial Least Squares Regression*. *Environmental Earth Sciences*, 73(11), 7603–16.
- Chen, R., Meng, F., Li, Z., Ye, Y., & Ye, J. (2016). *Investigation of Response of Metro Tunnels Due to Adjacent Large Excavation and Protective Measures in Soft Soils*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 58, 224–235.
- Chen, R., Zhang, P., Wu, H., Wang, Z., & Zhong, Z. (2019). *Prediction of Shield Tunneling-Induced Ground Settlement Using Machine Learning Techniques*. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(6), 1363–78.
- Chou, J., & Lin, C. (2013). *Predicting Disputes in Public-Private Partnership Projects: Classification and Ensemble Models*. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(1), 51–60.
- Dai, H., & Cao, Z. (2017). *A Wavelet Support Vector Machine-Based Neural Network Metamodel for Structural Reliability Assessment*. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(4), 344–57.
- Ding, L., Wang, F., Luo, H., Yu, M., & Wu, X. (2013). *Feedforward Analysis for Shield-Ground System*. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(3), 231–42.
- Hamdia, K. M., Lahmer, T., Nguyen-Thoi, T., & Rabczuk, T. (2015). *Predicting the Fracture Toughness of PNCs: A Stochastic Approach Based on ANN and ANFIS*. *Computational Materials Science*, 102, 304–13.
- Huang, H., Gong, V., Khoshnevisan, S., Juang, C. H., Zhang, D., & Wang, L. (2015). *Simplified Procedure for Finite Element Analysis of the Longitudinal Performance of Shield Tunnels Considering Spatial Soil Variability in Longitudinal Direction*. *Computers and Geotechnics*, 64, 132–45.
- Idinger, G., Aklík, P., Wu, W., & Borja, R. I. (2011). *Centrifuge Model Test on the Face Stability of Shallow Tunnel*. *Acta Geotechnica*, 6(2), 105–17.
- Karakus, M. (2007). *Appraising the Methods Accounting for 3D Tunnelling Effects in 2D Plane Strain FE Analysis*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 47–56.

- Karakus, M., & Fowell, R. (2005). *Back Analysis for Tunnelling Induced Ground Movements and Stress Redistribution*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(6), 514–24.
- Kim, C. Y., Bae, G., Hong, S., Park, C., Moon, H., & Shin, H. (2001). *Neural Network Based Prediction of Ground Surface Settlements Due to Tunnelling*. *Computers and Geotechnics*, 28(6–7), 517–47.
- Kirsch, A. (2010). *Experimental Investigation of the Face Stability of Shallow Tunnels in Sand*. *Acta Geotechnica*, 5(1), 43–62.
- Kohestani, V. R., Bazargan-Lari, M. R., & Asgari-Marnani, J. (2017). *Prediction of Maximum Surface Settlement Caused by Earth Pressure Balance Shield Tunneling Using Random Forest*. *Journal of AI and Data Mining*, 5(1), 127–35.
- Liu, W., Zhai, S., & Liu, W. (2019). *Predictive Analysis of Settlement Risk in Tunnel Construction: A Bow-Tie-Bayesian Network Approach*. *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, Article ID, 2045125, 19 pages.
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2008). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas, Design methodology and construction control*. CRC Press, eBook ISBN, 9780203938515, (pp. 129-39).
- Naderpour, H., Kheyroddin, A., & Ghodrati Amiri, G. (2010). *Prediction of FRP-Confined Compressive Strength of Concrete Using Artificial Neural Networks*. *Composite Structures*, 92(12), 2817–29.
- Naderpour, H., & Mirrashid, M. (2020). *Soft Computing in Civil Engineering*. Semnan University Press, (pp. 20-24 & 248-250).
- Ng, C. W.W., Hong, Y., & Soomro, M. A. (2015). *Effects of Piggyback Twin Tunnelling on a Pile Group: 3D Centrifuge Tests and Numerical Modelling*. *Geotechnique*, 65(1), 38–51.
- O'Reilly, M. P., & New, B. M. (1982). *Settlements above Tunnels in the United Kingdom - Their Magnitude and Prediction*. *Tunnelling '82. Papers presented at the 3rd international symposium*, 173–81.
- Ocak, I., & Seker, S. E. (2013). *Calculation of Surface Settlements Caused by EPBM Tunneling Using Artificial Neural Network, SVM, and Gaussian Processes*. *Environmental Earth Sciences*, 70(3), 1263–76.
- Pakbaz, M. S., Imanzadeh, S., & Bagherinia, K. H. (2013). *Characteristics of Diaphragm Wall Lateral Deformations and Ground Surface Settlements: Case Study in Iran-Ahwaz Metro*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 109–21.
- Patemesi, A., Schweiger, H. F., & Scarpelli, G. (2017). *Numerical Analyses of Stability and Deformation Behavior of Reinforced and Unreinforced Tunnel Faces*. *Computers and Geotechnics*, 88, 256–66.
- Peck, R. B. (1969). *Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground*. *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 225–90.
- Pourtaghi, A., & Lotfollahi-Yaghin, M. A. (2012). *Wavenet Ability Assessment in Comparison to ANN for Predicting the Maximum Surface Settlement Caused by Tunneling*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28(1), 257–71.

- Chapman, D., Rogers, C., & Hunt, D. (2004). Predicting the Settlements above Twin Tunnels Constructed in Soft Ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(4–5), 378.
- Qi, C., & Tang, X. (2018). Slope Stability Prediction Using Integrated Metaheuristic and Machine Learning Approaches: A Comparative Study. *Computers and Industrial Engineering*, 118, 112–22.
- Sagaseta, C. (1987). Analysis of Undrained Soil Deformation Due to Ground Loss. *Geotechnique*, 37(3), 301–20.
- Samui, P., & Sitharam, T. G. (2008). Least-Square Support Vector Machine Applied to Settlement of Shallow Foundations on Cohesionless Soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(17), 2033–43.
- Santos, O. J., & Celestino, T. B. (2008). Artificial Neural Networks Analysis of São Paulo Subway Tunnel Settlement Data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(5), 481–91.
- Shahin, M. A., Maier, H. R., & Jaksa, M. B. (2005). Investigation into the Robustness of Artificial Neural Networks for a Case Study in Civil Engineering. In *International Congress on Modeling and Simulation, MODSIM 2005*, , 79–83.
- Shi, H., Yang, H., Gong, G., & Wang, L. (2011). Determination of the Cutterhead Torque for EPB Shield Tunneling Machine. *Automation in Construction*, 20(8), 1087–95.
- Shi, J., Ortigao, J. A. R., & Bai, J. (1998). Modular Neural Networks for Predicting Settlements during Tunneling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(5), 389–95.
- Sun, W., Shi, M., Zhang, C., Zhao, J., & Song, X. (2018). Dynamic Load Prediction of Tunnel Boring Machine (TBM) Based on Heterogeneous in-Situ Data. *Automation in Construction*, 92, 23–34.
- Suwansawat, S., & Einstein, H. H. (2006). Artificial Neural Networks for Predicting the Maximum Surface Settlement Caused by EPB Shield Tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(2), 133–50.
- Verruijt, A., & Booker, J. R. (1998). Surface Settlements Due to Deformation of a Tunnel in an Elastic Half Plane. *Géotechnique*, 48(5), 709–13.
- Vorster, T. E., Klar, A., Soga, K., & Mair, R. J. (2005). Estimating the Effects of Tunneling on Existing Pipelines. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(11), 1399–1410.
- Zhang, L., Wu, X., Ji, W., & AbouRizk, S. M. (2017). Intelligent Approach to Estimation of Tunnel-Induced Ground Settlement Using Wavelet Packet and Support Vector Machines. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(2).
- Zhang, L., Wu, X., Zhu, H., & AbouRizk, S. M. (2017). Performing Global Uncertainty and Sensitivity Analysis from Given Data in Tunnel Construction. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(6).
- Zhang, W. G., Li, H. R., Wu, C. Z., Li, Y. Q., Liu, Z. Q., & Liu, H. L. (2021). Soft Computing Approach for Prediction of Surface Settlement Induced by Earth Pressure Balance Shield Tunneling. *Underground Space (China)*, 6(4), 353–63.
- Zhang, Z., & Huang, M. (2014). Geotechnical Influence on Existing Subway Tunnels Induced by

طبقه‌بندی فازی ریسک نشست ناشی از حفاری مکانیزه با ماشین TBM-EPB...، توحید مقتدر و ...، ص ۷۳-۹۵

*Multiline Tunneling in Shanghai Soft Soil. Computers and Geotechnics, 56, 121–132.*

*Zoveidavianpoor, M. (2014). A Comparative Study of Artificial Neural Network and Adaptive Neurofuzzy Inference System for Prediction of Compressional Wave Velocity. Neural Computing and Applications, 25(5), 1169–76.*