استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان مکمل روش‌های عددی در پیش‌بینی نشست تونل خط یک مترو تبریز

حسین اینانلو عربی شاد: دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
کاوه آهنگری: دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات

تاریخ: دریافت ۸۹/۵/۲۸ **پذیرش** ۸۹/۱۲/۴

چکیده

یکی از مسائل مهم در تونل‌های مترو شهری، تحلیل پایداری تونل و تعیین ضریب اطمینان مناسب و ایمن و همچنین پیش‌بینی میزان نشست است که منجر به تأمین پایداری در حین اجرا و پس از آن در زمان بهره‌برداری از سازهٔ مورد نظر خواهد شد. اهداف این پژوهش، استفاده از روش‌های مختلف در پیش‌بینی نشست و همچنین توسعه و ارتقای این روش‌ها به‌کمک یک‌دیگر است. در تحقیق حاضر، تحلیل پایداری و بررسی میزان نشست تونل خط یک مترو تبریز، با روش عددی، شبکهٔ عصبی مصنوعی و روابط تجربی صورت پذیرفته است. با توجه به دو روش حفاری استفاده شده در تونل خط یک مترو تبریز (استفاده از دستگاه TBM[1] و همچنین حفر تونل به روش NATM[2] در این بررسی، ابتدا قسمتی از تونل که با روش NATM حفاری می‌شود با استفاده از روش عددی مورد تحلیل قرارگرفته و مقدار نشست سطح زمین و همچنین میزان هم‌گرایی تونل در دیوارهٔ تونل نیز با کمک همین نرم‌افزار پیش‌بینی شده است. سپس بر این اساس، روابط تجربی هم‌گرایی- نشست برای محیط پیرامون تونل خط یک مترو تبریز اصلاح شده‌اند. پس از آن با استفاده از شبکهٔ عصبی مصنوعی و داده‌های موجود، میزان نشست، پیش‌بینی شده و با مقدار به‌دست آمده از روش عددی و روابط تجربی مقایسه شده است. در قسمت دوم تحقیق نیز میزان نفوذ TBM با شبکهٔ عصبی

۱. Tunnel Boring Machine ۲. New Austrian Tunnel Method

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

پیش‌بینی شده است که این پارامتر می‌تواند در مواجهه با مناطق دردسرساز و همچنین استفاده از فشار EPB[۱] مناسب در TBM بسیار مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: تونل مترو، شبکه عصبی، پیش‌بینی نشست، مدل‌سازی عددی، FLAC، شبکهٔ عصبی،آنالیز حساسیت

مقدمه

احداث تونل‌های کم‌عمق، در نواحی متراکم و پرازدحام شهری با موانع و مشکلاتی روبه‌رو می‌شود که یکی از آن‌ها مسئلهٔ نشست است. این امر، نیازمند کنترل عملیات حفر برای کاهش ریسک و تأثیر احتمالی آن بر ساختارهایی است که در سطح زمین و در نزدیکی تونل قرار دارند. بر این اساس، بررسی نشست در تونل‌های کم‌عمق می‌تواند باعث کاهش خسارات و پیش‌گیری از خطرهای احتمالی شود. برای کنترل نشست باید مراحل پیش‌بینی، پیش‌گیری و محافظت به‌ترتیب صورت پذیرد. روش‌های کنترل و جلوگیری از نشست، بستگی به روش‌های پیش‌بینی نشست دارد که این امر، اهمیت پیش‌بینی نشست را نشان می‌دهد.

توانایی در پیش‌بینی تأثیرات استخراج و نشست ناشی از آن، یکی از مهم‌ترین مراحل در احداث تونل‌های کم‌عمق از جمله خطوط مترو شهری است. در این تونل‌ها که در عمق کم‌تر از ۲۰ متری سطح زمین، در محیط‌های آبرفتی با مقاومت و چسبندگی کم حفر می‌شوند، رهایی تنش در اطراف تونل، سریع‌تر صورت می‌پذیرد. جابه‌جایی زمین می‌تواند به اندازهٔ کافی وسیع باشد تا سبب گسیختگی ساختارها و سازه‌های نزدیک آن شود. مخصوصاً در مناطق شهری، آزادی عمل و انتخاب در مسیر و عمق تونل تا اندازه‌ای محدود است [۱].

روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی نشست وجود دارند که از آن جمله می‌توان به روش‌های تجربی و نیمه تجربی اشاره کرد. روش‌های تجربی ساده هستند و براساس یک یا دو متغیر مؤثر بر نشست همراه با سایر پارامترهای شناخته شده مؤثر بر نشست هستند. همچنین این روش‌ها برای خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه‌ای خاص کاربرد دارند [۲]-[۱]. با توجه به تعدد پارامترهای مؤثر بر نشست، روش‌های جدیدی نظیر روش‌های عددی و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نشست پیشنهاد می‌شوند. شبکه‌های عصبی مصنوعی،

۱. Earth Pressure Balance

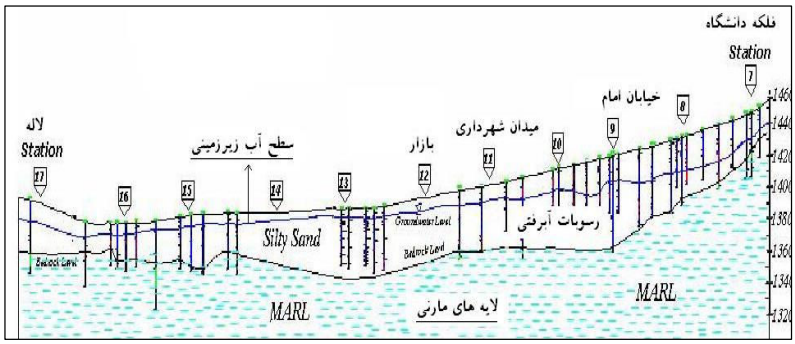
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

علاوه بر دقت لازم در پیش‌بینی از سرعت زیاد و سهولت کاربرد نیز برخوردار هستند. با توجه به پیچیدگی محیط پیرامون تونل‌ها از نظر ژئوتکنیکی و قرارگیری سازه‌های سطحی از جمله ساختمان‌ها، شبکه‌های آب و فاضلاب، خطوط برق و لوله‌های مدفون شده گاز در نزدیکی تونل‌های مترو، استفاده ترکیبی از روش‌های عددی و شبکه‌های عصبی مصنوعی، علاوه بر پیش‌بینی میزان نشست و تحلیل پایداری تونل می‌توانند در اصلاح روابط تجربی نیز کمک مؤثری کنند [۳]-[۲].

معرفی خط یک مترو تبریز

مسیر خط ۱ مترو تبریز از نظر زمین‌شناسی، شامل رسوبات قرمزرنگ دارای طبقات گچی و نمکی است که رایبین[۱] (۱۹۳۵) این رسوبات را جزء سازند قرمز فوقانی معرفی کرده است. این سازند غالباً از ماسه‌سنگ، مارن، سیلتستون و گنگلومرا همراه با طبقات گچی و نمکی تشکیل شده است. محدودهٔ بررسی شده به‌وسیله رسوبات آبرفتی جوان پوشیده شده است که در زیر رسوبات آبرفتی مذکور، طبقات مارنی و ماسه سنگی تا کنگلومرایی وجود دارد. شکل ۱ وضعیت زمین‌شناسی خط ۱ مترو تبریز را نشان می‌دهد [٤].



شکل ۱. وضعیت زمین‌شناسی مسیر تونل متروی خط ۱ تبریز [4]

تونل مترو تبریز به‌صورت دوقلو طراحی شده است که یکی از این دو تونل به‌عنوان مسیر رفت و دیگری درحکم مسیر برگشت است. بخشی از تونل که با TBM حفاری می‌شود دارای طول حدود ۸ کیلومتر و قطر۶/۸۸ متر است. شیب تونل از ٤/٤١ تا ۰/۲۹- درصد و عمق

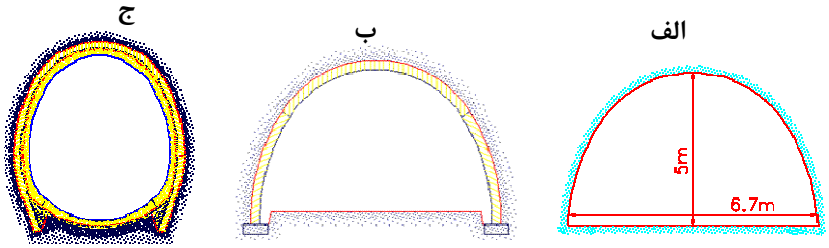
۱. Raibin

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

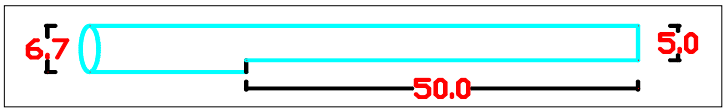
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

کف تونل بین ۱۲ تا ۲۰ متر از سطح زمین است که در طول مسیر متغیر است. پوشش در نظر گرفته‌شده به‌صورت قطعات بتنی پیش‌ساخته به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر است. قطر داخلی تونل، بعد از پوشش‌گذاری به ٦ متر می‌رسد.

قسمتی دیگری از تونل که به روش NATM حفاری می‌شود دارای طولی در حدود ۲۰۷ متر است. تونل این قسمت دارای ارتفاع و عرض ٦/٧ متر است و در دو مرحله حفاری می‌شود. این قسمت از تونل به‌صورت دو پله‌ای حفر می‌گردد. مشخصات تونل و ترتیب حفاری که با روش NATM انجام می‌شود، در شکل ۲ نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که مقطع ابتدایی تونل در حدود ۵۰ متر جلوتر از مقطع کامل‌شده تونل است (شکل ۳). حداقل روبارهٔ تونل ۸ متر و حداکثر آن ۱۲ متر است. شایان ذکر است که فاصلهٔ دو تونل از یک‌دیگر تقریباً ١٤ متر است و تونل دوم پس از حفر کامل تونل اول حفاری می‌شود [٥].



شکل۲. الف) حفر قسمت (پله) فوقانی ب) نگهداری و ایجاد تکیه‌گاه پوشش قسمت (پله) فوقانی ج) حفر قسمت (پله) تحتانی وایجاد نگه‌داری دائم در تونل



شکل۳. فاصلهٔ مقطع ابتدایی از مقطع کامل‌شده تونل

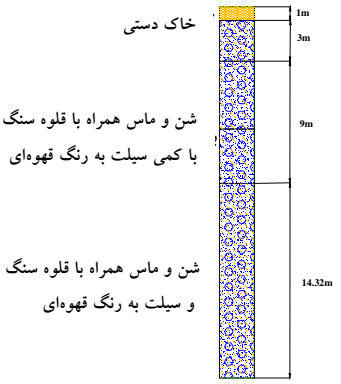
مدل‌سازی تونل خط ۱ متروی تبریز با استفاده از نرم افزار FLAC 2D

بر اساس بررسی‌های صحرایی و نتایج حفاری‌ها، زمین محدودهٔ پروژه از لایه‌های شن و ماسه همراه با قلوه‌سنگ و سیلت به‌رنگ قهوه‌ای با تراکم بسیار زیاد تشکیل شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

ضخامت خاک دستی در گمانه‌ها از ۰ تا ۲ متر متغیر است. شکل ٤ مقطع زمین‌شناسی استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد [٤].



شکل٤. مقطع زمین شناسی [٤]

بر اساس نتایج عمق‌سنجی، سطح آب زیرزمینی، پایین‌تر از کف تونل قرار گرفته است. از همین‌رو در تحلیل‌های انجام شده از وجود آب زیرزمینی و تأثیر آن بر سازه صرف‌نظر شده‌است. خصوصیات ژئومکانیکی مقطع بررسی شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول۱. خصوصیات ژئومکانیکی مقطع بررسی شده [٤]

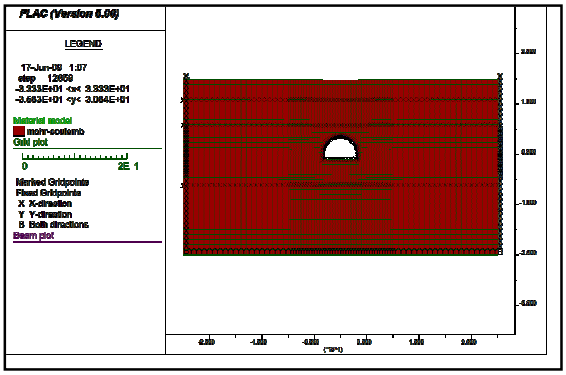
پارامتر	مقدار
چسبندگی (kg/cm^2)	۰/۰۲
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۸/۵
مدول الاستیسیته (kg/cm^2)	۲۵۰
چگالی (kg/m^3)	۱/۸
ضریب پواسون	./۳

برای مدل‌سازی تونل در مرحلهٔ اول، قسمت فوقانی آن مدل گردید. به این‌ترتیب که پس از ایجاد شبکه مدل، قسمت فوقانی تونل حفر و نگه‌داری موقت آن اعمال شد. شکل ۵ نشان‌دهندهٔ شکل هندسی محدودهٔ مدل ایجاد شده برای قسمت فوقانی تونل در نرم افزار FLAC 2D است.

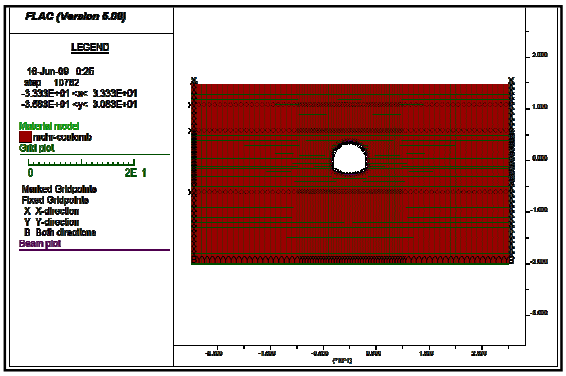
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

پس از مدل‌کردن قسمت فوقانی، قسمت تحتانی مدل شد. در این مرحله، قسمت تحتانی تونل حفر شده و پس از تکمیل مقطع، نگه‌داری دائمی تونل نصب شد. شکل ٦ نشان‌دهندهٔ مدل ساخته‌شده از مقطع تکمیل شده تونل در نرم‌افزارFLAC 2D است.



شکل ۵. مدل ساخته شده از قسمت فوقانی تونل



شکل٦. مدل ایجاد شده از قسمت تحتانی تونل

بر اساس تحلیل نتایج، بیش‌ترین میزان جابه‌جایی در سقف تونل به مقدار mm ۱۰۱ به‌دست آمده است. در جدول ۲ میزان جابه‌جایی‌ها در سطح زمین و دیواره‌های تونل حاصل از تحلیل عددی با نرم‌افزار عددی FLAC 2D با مقدار واقعی اندازه‌گیری شده با ابزار دقیق نصب شده در مقطع مورد نظر در تونل با یک‌دیگر مقایسه‌شده‌اند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

جدول۲. مقایسه نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار FLAC 2D با مقدار واقعی

	میزان هم‌گرایی در دیواره سمت راست (*mm*)	میزان هم‌گرایی در دیواره سمت چپ (*mm*)	میزان هم‌گرایی در سقف (*mm*)	میزان نشست (*mm*)
مقدار واقعی (اندازه‌گیری شده با ابزار)	۷/٤٦	٦/۰۲	٥	٤١
مقدار محاسبه شده (با نرم‌افزار)	۲۱/٥	۲۱/٥	۱۰۱	۳۷

چنان که از جدول ۲ ملاحظه می‌شود، اختلاف مقدار نشست به‌دست آمده از نرم‌افزار عددی و مقدار واقعی ٤ میلی‌متر است.این میزان ۱۰٪ مقدار کل (٤١ میلی‌متر) است که در حد مجاز است. این امر، کمک شایانی در طراحی مناسب تونل، قبل از مرحله حفاری و کنترل نشست می‌کند. پروفیل عرضی نشست به‌دست‌آمده از نرم‌افزار FLAC 2D دارای شکل گوسی است که با روابط تجربی تابع پروفیل نشست ارائه‌شده به‌وسیله پک و اشمیت مطابقت دارد. بیش‌ترین میزان نشست در مرکز تونل است. با توجه به نتایج حاصل از پردازش نرم‌افزار، میزان شعاع تأثیر نشست در سطح زمین ۲۰ متر و میزان مشاهده‌ای آن ۲۳ متر است.

چنان که از جدول ۲ ملاحظه می‌شود، میزان هم‌گرایی به‌دست آمده از نرم‌افزار و مقدار واقعی، اختلاف زیادی دارند که از دلایل عمدهٔ این امر نصب دیرهنگام ابزار است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار و نمودار جابه‌جایی مقطع طولی تونل (مربوط به رفتارنگاری نشست مقطع بررسی شده)، میزان نشست در مسافتی در حدود ۵۳ متری از سینه‌کار تونل ثابت شده و به حداکثر خود رسیده است (شکل ۷). همچنین با توجه به فاصلهٔ ۵۰ متری دو مقطع (پله) تونل از هم می‌توان این مطلب را بیان کرد که حداکثر نشست در مرحلهٔ ابتدایی حفر تونل اتفاق می‌افتد و نشست به‌وجود آمده در هنگام حفاری مقطع (پله) تحتانی بسیار ناچیز است. این امر، حاکی از نقش مؤثر تکیه‌گاه ایجاد شده برای پوشش بتنی در مرحله اول حفاری است (شکل۳).

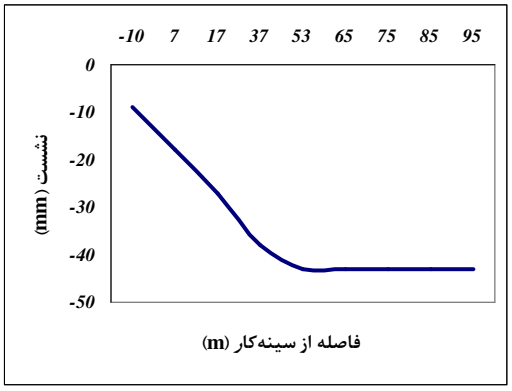
با توجه به منحنی GRC[1] به‌دست آمده از نرم‌افزار FLAC 2D و همچنین با توجه به چسبندگی کم مقطع مورد نظر، برای کاهش نشست، لازم است تا میزان گام حفاری کاهش یابد. همچنین با توجه به رهایی سریع تنش در این مقاطع، بهتر است تا نگه‌داری موقت سریع‌تر

۱. Ground Reaction Curve

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

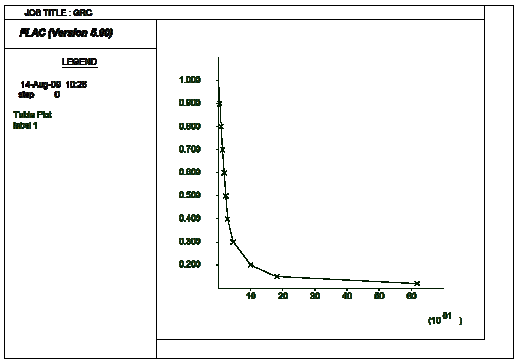
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

سریع‌تر اعمال شود. مقدار ضریب ایمنی به‌دست آمده با نرم‌افزار ۲/۳۰ است که حاکی از پایداری تونل پس از تکمیل حفاری و ایجاد نگه‌داری دائم است. منحنی GRC به‌دست آمده از نرم‌افزار FLAC 2D در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل۷. جابه‌جایی در مقطع طولی تونل طولی تونل در مقطع بررسی شده

با توجه به مقادیر به‌دست آمده از نرم‌افزار و مقایسه آن با مقادیر واقعی، ملاحظه می‌شود که بین بعضی از این مقادیر، اختلاف زیادی وجود دارد (جدول ۲). لذا در این بخش از تحلیل به پیش‌بینی نشست با استفاده از مقادیر واقعی موجود با استفاده از شبکهٔ عصبی‌مصنوعی پرداخته شده است. همچنین با توجه به مقادیر به‌دست آمده از نرم‌افزار عددی مقدار ضریب β در رابطهٔ پک[۱] ($S_s/S_c=1-\beta(Z-D)$) بین نشست سطحی و حرکت قائم تاج تونل برای تونل خط یک مترو ۰/۳ به‌دست‌آمده است.



شکل۸. منحنی GRC به‌دست آمده از نرم‌افزار FLAC 2D

۱. Peck

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

پیش‌بینی نشست با استفاده از شبکه‌عصبی‌مصنوعی

اساس ابداع شبکهٔ عصبی، شبیه‌سازی رفتار مغز انسان است. در بین تمام خواص مهم شبکه‌های عصبی، خاصیت یادگیری شبکه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. شبکهٔ عصبی به‌دلیل انعطاف و قابلیت یادگیری بالا، به‌عنوان سیستم‌های یادگیر دارای توانایی هستند که از گذشته بیاموزند و رفتار خود را در حین یادگیری بهبود ببخشند. به همین سبب می‌توان از این تکنیک به‌منظور پیش‌بینی نشست متناسب با خصوصیات هندسه تونل و ژئومکانیکی زمین پیرامون تونل کمک گرفت. با به‌کار بردن این تکنیک و با استفاده از موارد اجرایی مشابه، شبکه جهت تعیین الگوی مناسب آموزش یافته و در محل اجرا با توجه به پارامترهای ساختگاه فضا، نشست حداکثر پیش‌بینی می‌شود. از مزایای این تکنیک می‌توان به بررسی پیروی محیط پیرامون تونل با معیار انتخاب شده جهت تحلیل‌های عددی نام برد [٦]–[٧].

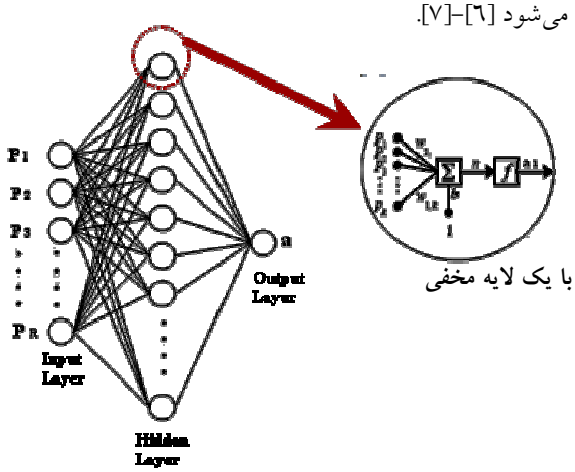
یکی از کابردی‌ترین انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی در جهت حل مسائل مهندسی و ژئوتکنیکی، شبکه‌های چند لایه پرسپترون[۲] (MLP) هستند که رمرهات[۳] در سال ۱۹۸٦ برای بالابردن کارآیی پرسپترون (به‌وسیله روزنبلات[٤] در سال ۱۹۵۸ ارائه شد) معرفی کرد. یک شبکهٔ عصبی از عناصر پردازش (نرون) تشکیل شده است. شبکه‌های MLP از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه مخفی و یک لایه خروجی تشکیل شده‌اند. نرون‌های سازمان یافته در شبکه‌های MLP دارای وزن و بایاس هستند. وزن در شبکه‌های عصبی مصنوعی معادل شدت سیناپس مجموعه جمع‌کننده و تابع محرک، هم‌ارز هسته سلول در شبکه‌های بیولوژیکی است. تأثیر جمله بایاس b را می‌توان مانند وزن w در نظر گرفت. با این تصور که میزان تأثیر ورودی ثابت را روی نرون منعکس می‌سازد. پارامترهای b و w قابل تنظیم هستند و تابع محرک f، طراح، انتخاب می‌کند. بر اساس انتخاب f و نوع یادگیری، پارامترهای b و w تعیین می‌شوند. این دو فاکتور، طوری تغییر می‌کنند که رابطهٔ ورودی و خروجی نرون با هدف خاصی مطابقت کند. شکل ۹ ساختار یک شبکه MLP را نشان می‌دهد. اسکالرهای a و p به‌ترتیب ورودی و خروجی را نشان می‌دهند. میزان تأثیر p روی a با مقدار اسکالر w تعیین می‌شود. ورودی دیگر که مقدار ثابت ۱ است در جمله بایاس b ضرب شده و سپس با wp

۱. Multi-layer Perceptron ۲. Rummerhurt ۳. Rosenblalt

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

جمع می‌شود. این حاصل جمع، ورودی خالص n برای تابع محرک f خواهد بود و بدین‌ترتیب خروجی تعیین می‌شود. خروجی می‌تواند محصول نهایی باشد یا این‌که به‌عنوان ورودی برای نرون دیگر استفاده می‌شود [٦]-[٧].



شکل۹. نمونه‌ای از شبکه MLP با یک لایه مخفی

قانون یادگیری در واقع روندی است که با آن ماتریس وزن‌ها و بردار بایاس شبکه عصبی، تنظیم می‌شوند. هدف قانون یادگیری، آموزش شبکهٔ عصبی برای کار مشخصی است. شبکه‌های عصبی در حین آموزش، پس از هربار تکرار الگوریتم یادگیری از محیط، شرایط و هدف کار خود بیش‌تر مطلع می‌شوند. از آن‌جا که مقدار خروجی متناظر با بردار ورودی تعیین شده و مشخص است و در شبکه وارد می‌شود، بهترین نوع یادگیری، یادگیری با ناظر است. در میان قوانین یادگیری با ناظر، الگوریتم پس‌انتشار خطا از طریق لایه‌های شبکه و در خلاف مسیر ارتباطی وزن نرون‌ها، مقدار خطای حاصل از محاسبه رفت را در مسیر برگشت توزیع کرده و با ایجاد یک روش محاسباتی کارآ، کاربرد ANNS در محاسبات مهندسی را به طور قابل توجهی تقویت و وسیع کرده است. با توجه به معلوم بودن تابع هدف و استفاده از یادگیری با ناظر، بهترین قانون جواب‌گوی این سیستم، پس‌انتشار خطا محسوب می‌شود که بر این اساس در این تحقیق قانون یادگیری شبکه‌ها به‌کار گرفته شده است [٧]. مناسب‌ترین شبکهٔ بهینه به‌دست آمده در این بخش از تحقیق، شبکه‌ای با یک لایهٔ مخفی با تعداد ۱۰ نرون است و بهترین تابع انتقال آن، تابع انتقال TANSIG است که با آزمون و خطا به‌دست آمده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

است. جدول‌های ۳ و ٤ به‌ترتیب پارامترهای ورودی و مشخصات شبکه ساخته شده برای این تحقیق را ارائه می‌کنند.

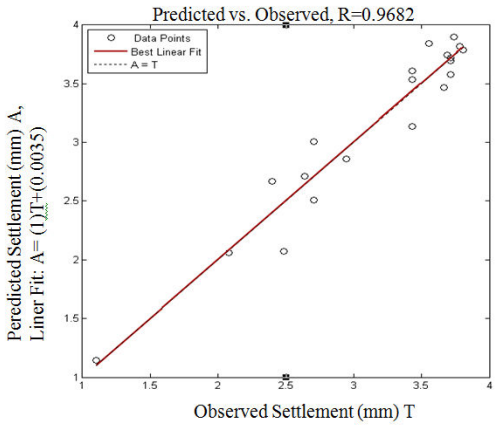
ارتباط بین نتایج اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده توسط شبکه در مجموعه داده‌های آموزش در شکل ۱۰ ارائه شده است.

جدول۳. معرفی پارامترهای ورودی و پارامتر هدف در مدل‌سازی

شماره ورودی	توصیف پارامتر ورودی
۱	چسبندگی
۲	زاویه اصطکاک
۳	هم‌گرایی تونل
٤	قطر تونل
۵	روباره
خروجی	نشست

جدول٤. مشخصات شبکهٔ بهینه

تابع انتقال	(٪)درصد خطای مطلق	خطای مطلق	(٪) جذر متوسط مربعات خطا
T-T-P	۰/۲۰۵۹	۰/۰۰٦٤٦	۰/۲۲۳۳



شکل۱۰. ارتباط نتایج حاصل از شبکهٔ عصبی و داده‌های واقعی در مجموعه داده‌های آموزش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

بررسی معیار شکست انتخاب شده در روش عددی با استفاده از شبکهٔ عصبی

در این تحقیق به‌منظور نرمالیزه کردن داده‌ها، عمق تونل بر قطر تونل تقسیم شده (H/D) و به‌جای استفاده از چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک از رابطهٔ $\sigma c =(2CCos\phi)/(1-sin\phi)$ که نشان‌دهندهٔ مقاومت فشاری است، استفاده شده است. در حالت دیگر نیز از چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک در ورودی شبکه استفاده شد که نتایج، تفاوت چشم‌گیری را با یک‌دیگر نشان ندادند. این مطلب مؤید تبعیت محیط پیرامون تونل از معیار موهر- کلمب است.

در ادامه از مقادیر واقعی نشست، لگاریتم در پایه نپرین گرفته شد و به‌عنوان ورودی به شبکه‌عصبی داده شد که این امر، منجر به بهبود نتایج شبکه عصبی شد. در جدول ۵ مقادیر نشست به دست آمده توسط روش‌های مختلف مقایسه‌شده‌اند.

جدول۵. مقایسهٔ مقادیر به‌دست آمده نشست با روش‌های مختلف

مقدار نشست (**mm**)			
مقدار واقعی	روش تجربی	روش عددی	شبکه عصبی
٤١	١٥/٥	٣٧	٤١/٧٢

پیش‌بینی میزان نفوذپذیری TBM با استفاده از شبکهٔ عصبی‌مصنوعی

چنان که قبلاً اشاره شد قسمتی از تونل مترو خط یک تبریز با استفاده TBM حفاری شده است که پیش‌بینی میزان نفوذپذیری دستگاه، کمک شایانی در انجام مراقبت و دقت بیش‌تر در برخورد با مناطق دردسرساز (با دانستن زمان رسیدن به این مناطق) می‌کند. از همین رو در این قسمت به پیش‌بینی میزان نفوذ TBM با استفاده از شبکهٔ عصبی‌مصنوعی پرداخته شده است.

به‌منظور تهیهٔ مدل، از اطلاعات رفتارنگاری TBM و خصوصیات زمین‌شناسی منطقه استفاده می‌شود که شامل پارامترهای مؤثر در مسئله مورد نظر و پارامترهای هدف است. پارامترهایی که برای استفاده در مدل‌سازی برای پیش‌بینی میزان نرخ نفوذ در نظر گرفته شده، شامل ۵ پارامتر به‌عنوان عوامل مؤثر در میزان نرخ پیش‌روی است. پارامترها و دامنه تغییرات آن‌ها در جدول ٦ ارائه شده است.

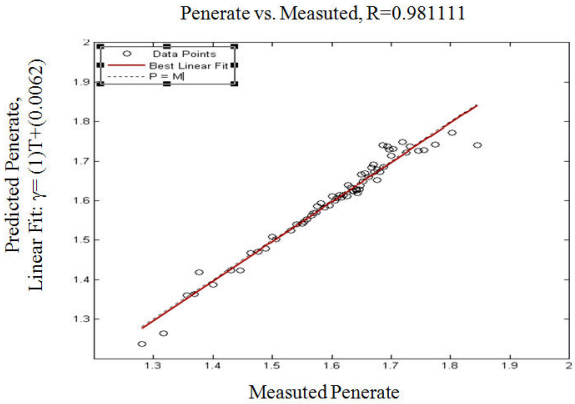
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

جدول٦. کم‌ترین و بیش‌ترین مقایر پارامترهای ورودی مدل‌سازی نشست

ورودی	کم‌ترین مقدار	بیش‌ترین مقدار
نیروی محوری وارد بر صفحه حفار (kN)	۲۰/۸۳۵	۲٤٥۱۸
زاویه پیچ دستگاه (d)	-٤/٤	٤/۲
میانگین فشار وارد بر سینه‌کار (Bar)	۰/٤۸٦	۱/۸۸
روباره (m)	٥/٥	۱۳/۱٥
مقاومت فشاری زمین مقابل صفحه حفار (kPa)	۰	٦٥/٦
میانگین نفوذ (mm/min)	۱۰	۹۰

شکل ۱۱ ارتباط بین نتایج اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی به‌وسیلهٔ شبکه در مجموعه داده‌های اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. ارزیابی نتایج حاصل از شبکهٔ عصبی و داده‌های واقعی در مجموعه داده‌های اعتبارسنجی

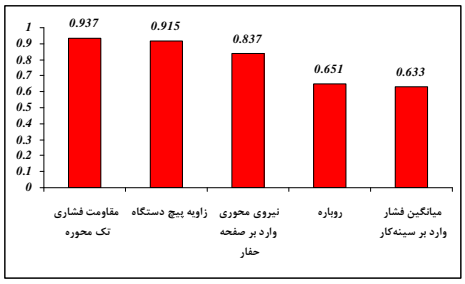
۱. آنالیز حساسیت

یکی از اقدامات اساسی پس از مدل‌سازی، تعیین میزان حساسیت هدف مدل‌سازی شده نسبت به پارامترهای ورودی است. به‌طور معمول به‌منظور تعیین مقدار تأثیر پارامترهای ورودی بر روی هدف مورد نظر با حذف یکی از پارامترهای ورودی، تغییرات مقدار خطای داده‌های آزمون بررسی می‌شود [۸]. وجود اختلاف چشم‌گیر، بین مقادیر واقعی (به‌عبارتی افزایش خطا) نشان از تأثیر بیش‌تر پارامتر حذف شده بر نتایج حاصل دارد. بر این اساس، میزان تأثیر پارامترهای مختلف محاسبه شد.

به‌طور معمول، مقادیر بیش از ۰/۹ نشان از تأثیر قابل توجه پارامتر به خروجی دارد و مقادیر کم‌تر از ۰/۸ نشان‌دهندهٔ تأثیر ضعیف بر پارامتر خروجی است [۹]-[۱۰]. شکل ۱۲ نشان دهندهٔ آن است که مقاومت فشاری تک‌محوره، زاویهٔ پیچ دستگاه (زاویهٔ جابه‌جایی قائم محور دستگاه حفار)، نیروی محوری وارد بر صفحه حفار بیش‌ترین تأثیر را در بین پارامترهای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

ورودی بر میزان نرخ نفوذ دارد. دو پارامتر زاویه پیچ و نیروی محوری وارد بر صفحه حفار، برخلاف پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره (غیرقابل کنترل) قابل کنترل (در اختیار طراح و اپراتور دستگاه) است. از همین رو با توجه به تأثیر چشم‌گیر این دو پارامتر می‌توان مقدار زاویهٔ پیچ و نیروی محوری وارد بر صفحه حفار را بر اساس شرایط موجود بهینه کرد.



شکل۱۲. آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی بر تابع هدف

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت نشست و تأثیر آن بر سازه‌های کم‌عمق، در این تحقیق، ضمن تعیین پارامترهای مؤثر بر نشست با توجه به شرایط ژئومکانیکی محیط بررسی شده، تحلیل پایداری و پیش‌بینی نشست تونل خط یک مترو تبریز با استفاده از روش تجربی، عددی و شبکهٔ عصبی مصنوعی بررسی شد و نتایج زیر به‌دست آمد:

۱. مقدار حداکثر نشست به‌دست آمده از نرم‌افزار FLAC 2D برابر ۳۷ میلی‌متر بود که دارای اختلاف قابل قبولی با مقدار واقعی (٤١ mm) است.

۲. بیش‌ترین میزان هم‌گرایی برابر ۱۰۱ میلی‌متر به‌دست آمده است. همچنین میزان شعاع تأثیر نشست در سطح زمین به‌دست آمده از نرم‌افزار عددی برابر ۲۰ متر بود که دارای اختلاف قابل قبولی با مقدار واقعی (۲۳ متر) است.

۳. میزان هم‌گرایی به‌دست آمده از نرم‌افزار و مقدار واقعی، اختلاف زیادی دارند که دلیل عمدهٔ این اختلاف، عدم امکان نصب بلافاصله ابزار است.

٤. نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار FLAC 2D و نمودار جابه‌جایی در مقطع طولی تونل (مربوط به رفتارنگاری نشست مقطع بررسی شده) نشان می‌دهند که میزان نشست در مسافتی در حدود ۵۳ متری از سینه‌کار تونل ثابت شده و به حداکثر خود رسیده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

با توجه به فاصلهٔ ۵۰ متری دو مقطع (پله) تونل از هم، می‌توان این نتیجه را بیان کرد که حداکثر نشست در مرحلهٔ ابتدایی حفر تونل اتفاق می‌افتد. به‌دلیل استفاده از تکیه‌گاه، قبل از حفاری مرحلهٔ بعدی، نشست در مرحلهٔ بعدی ناچیز است که سبب افزایش ضریب ایمنی و کنترل نشست در این مرحله می‌شود.

۵. منحنی GRC به‌دست آمده از نرم‌افزار FLAC 2D و همچنین چسبندگی کم مقطع مورد نظر، بیان‌گر بالابودن میزان گام حفاری در این مقاطع است. از همین رو برای کاهش نشست، گام حفاری را باید تا حد امکان کاهش داد و با توجه به رهایی سریع تنش در این مقاطع نگه‌داری موقت را سریع‌تر انجام داد.

۶. در این تحقیق در پیش‌بینی نشست با شبکهٔ عصبی به‌منظور نرمالیزه کردن داده‌ها عمق تونل بر قطر تونل تقسیم (H/D) شد که نتایج به‌دست آمده دارای خطای کم‌تری نسبت به استفاده عمق تونل به‌تنهایی است. همچنین به‌جای استفاده از چسبندگی و زاویه اصطکاک از رابطهٔ $\sigma c =(2C\cos\phi)/(1-\sin\phi)$ که نشان‌دهندهٔ مقاومت فشاری بر اساس معیار شکست موهر-کولمب است، استفاده شد. شایان ذکر است که استفاده از چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک در ورودی شبکه تغییر چشم‌گیری نداشت و نتایج نیز تغییر محسوسی نداشتند. این امر، نشان‌دهندهٔ تبعیت محیط پیرامون تونل خط یک مترو تبریز از معیار موهر-کولمب است.

۷. با توجه به نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار Flac 2D، مقدار ضریب β در رابطهٔ پیشنهادی پک برای شرایط ژئوتکنیکی متروی تبریز ۰/۳ است.

۸. پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوره، زاویهٔ پیچ دستگاه و نیروی محوری وارد بر صفحه حفار، بیش‌ترین تأثیر را در بین پارامترهای ورودی بر میزان نرخ نفوذ TBM دارند.

منابع

1. Peck. R.B., Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, state of the art report, In: 7th Int. Conf. Mechanics and Rock Engineering, 30 (4) (1997) 207-22.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]

2. Kim. C. Y., Bae. G. J., Hong. S. W., Park. C. H., Moon. H. K., Shin. H. S., Neural Network Based Prediction of Ground Surface Settlements due to Tunneling. Computers and Geotechnics, 28 (2001) 517-547.

3. Sagaseta. C., Surface Settlements due to Defomation of a Tunnel in an Elastic half Plane-discussion. Geotechnique, 48 (5) (1998) 709-13.

٤. سازمان قطار شهری تبریز، گزارش نتایج بررسی‌های زمین شناسی و ژئوتکنیکی خط شماره یک قطار شهری تبریز (١٣٨٤) ١٢٠ ص.

٥. اتحادیه شرکت های قطار شهری، خبرنامه اتحادیه شرکت های قطار شهری، شماره ٨ (١٣٨٦).

6. Hagan. M. T., Demuth. H. B., Bael. M., Neural Networks Design, Pws NewYork (1995) 1-50.

7. Ovı´dio. J., Santos. J. R., Tarcı´sio. B., Artificial Neural Networks Analysis of Sa˜o Paulo Subway Tunnel settlement data. Tunneling and Underground Space Technology, 23 (2008) 481-491.

8. Eberhardta. E., Steadb. D., Congganc. J. S., Numerical Analysis of Initiation and Progressive Failure in Natural Rock Slope, Randal Rockslide, Sweden (2003).

9. Barla. C., Continuum and Discontinuum Modeling in Tunnel Engineering, Italian Ministry for University and Technological Research (M.U.R.S.T) as part of the Research Program "Tunneling in Difficult Condition" (2000).

10. Jing. L., A review of Techniques, Advances and Outstanding Issues in Numerical Modeling for Rock Mechanics and Rock Engineering, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40 (2003) 283-353.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.2.0]