



دهمین کنفرانس ملی تونل

"فضاهای زیرزمینی و اهداف هزاره سوم"

۱۳ تا ۱۶ آبان ماه ۱۳۹۲

پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

مطالعه موردی: تونل انتقال آب دز - قمرود

محمد توکلی^۱، نرگس طیرانی^۲، سامان رجب پور^۳

^۱ کارشناس ارشد مکانیک سنگ، شرکت سابیر؛ vahidmt1@yahoo.com

^۲ کارشناس ارشد مکانیک سنگ، شرکت طوس آب مشهد؛ n.tayaran@gmail.com

^۳ کارشناس ارشد مکانیک سنگ، شرکت سابیر؛ srajabpourk@gmail.com

چکیده

پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM از مهمترین مسائل طراحی و انتخاب نوع حفاری و نوع ماشین است که به عوامل متعددی از جمله عوامل زمین‌شناسی، هیدرولوژی، تنش‌های برجای زمین و نیز پارامترهایی در طراحی دستگاه وابسته است. در این مقاله سعی شده است با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و جمع‌آوری اطلاعات تونل انتقال آب قمرود، نرخ نفوذ TBM، مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این هدف، تعداد ۱۰۶۹ داده برای ۱۰۶۹ کورس حفاری از ۶ لایه زمین‌شناسی جمع‌آوری شده و با نرم افزار SPSS از نظر آماری بررسی و مطالعه شد. سپس با استفاده از نرم افزار Data Fit و بکارگیری رگرسیون غیر خطی چند متغیره، بین ورودی‌ها یعنی گشتاور، مقاومت تک محوره، شاخص کیفیت سنگ، درصد کوارتز، سرعت چرخش کله حفار و خروجی مدل یعنی نرخ نفوذ TBM رابطه‌ای بدست آمد که ضریب همبستگی آن ۰/۳۱ و خطای آن ۷/۵۷ محاسبه شد، این درحالی است که مقدار خطای بدست آمده با استفاده از شبکه عصبی ۵/۵۸ و ضریب همبستگی آن ۰/۷۵ محاسبه شد که نتایج آن به مراتب قابل قبول‌تر از نرم‌افزار Data Fit است. لذا شبکه عصبی با دقت و سرعت عمل بالای خود می‌تواند بطور موثری متخصصین را در امر تخمین نرخ نفوذ TBM یاری دهد.

واژه‌های کلیدی: TBM، تونل قمرود قطعه یک، نرخ نفوذ، شبکه عصبی مصنوعی.

۱- مقدمه

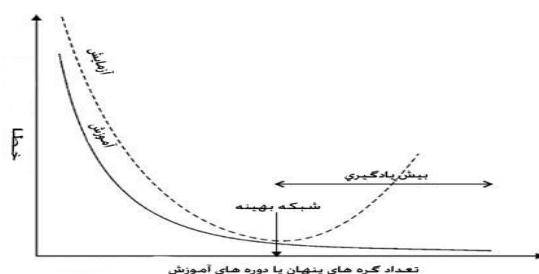
طول حفاری شده در طی یک بازه زمانی مشخص به صورت حفاری ممتد، نرخ نفوذ نامیده می‌شود. تحقیقات زیادی پیرامون ارتباط بین پارامترهای سنگ و سیستم‌های طبقه بندی آن با نرخ نفوذ TBM وجود دارد که نشان می‌دهد راه حل خاص یا روش واحدی برای مدل‌سازی اجرای TBM در واقعیت وجود ندارد. در این مقاله مدل‌سازی به کمک شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM در تونل انتقال آب دز - قمرود انجام شد. این روش توانایی تعمیم یک راه حل را به کمک الگو و ترکیبی که در طی آموزش شبکه بدست آمده را دارا می‌باشد. زمانی که شبکه با تعداد کافی از نمونه‌های موجود در مجموعه داده‌ها، آموزش داده شد، برای ورودی‌های جدید با آرایش‌بندی جدید، پیش‌بینی‌ها بر اساس یادگیری‌هایی که قبلاً انجام گرفته صورت می‌گیرد. فاکتورهای اصلی مورد استفاده برای این پیش‌بینی در تونل انتقال آب قمرود شامل: گشتاور، مقاومت

تک محوره، شاخص کیفیت سنگ، درصد کوارتز و سرعت چرخش کله حفار است. از شبکه طراحی شده می‌توان به عنوان ابزاری مناسب برای پیش بینی نرخ نفوذ در تونل‌های جدید با شرایط مشابه استفاده کرد.

۲- مبانی شبکه عصبی

شبکه عصبی برای حل مسائل سه مرحله را طی می‌کند الف: آموزش (Training) ب: ارزیابی (Validation) ج: اجرا (Operation). آموزش فرایندی است که طی آن شبکه می‌آموزد تا الگوی موجود در ورودی‌ها بشناسد، برای این منظور هر شبکه عصبی از مجموعه‌ای از قوانین یادگیری که نحوه یادگیری را تعریف می‌کنند استفاده می‌کند. تعمیم، توانایی شبکه برای ارائه جواب قابل قبول در قبال ورودی‌هایی که در مجموعه آموزشی نبوده‌اند، می‌باشد. استفاده از شبکه برای انجام عملکردی که به آن منظور طراحی شده است را اجرا می‌گویند. شبکه‌های عصبی از یک سری واحدهای ساختمانی اولیه تشکیل می‌شوند. این واحدهای ساختمانی را سلول عصبی، واحد پردازش یا گره می‌نامند. هر سلول عصبی دارای چندین ورودی است. بدنه سلول عصبی از دو بخش تشکیل شده است. ابتدا تابع ترکیب تمام ورودی‌ها را ترکیب و یک عدد تولید می‌کند. در بخش دوم تابع انتقال، مقدار تابع ترکیب را به خروجی سلول تبدیل می‌کند. شبکه‌های عصبی ساختار لایه‌ای داشته و به جز لایه ورودی تمام لایه‌های دیگر شبکه عصبی در کار پردازش شرکت می‌کنند و در نهایت خروجی به دست می‌آید. لایه‌های بین لایه ورودی و لایه خروجی را لایه‌های داخلی یا پنهان (Hidden Layers) می‌نامند [۱].

برمبنای مطالعات بشیر و نیلسن یک لایه پنهان برای اکثر مدل‌های عصبی کافی است ولی برای مدل‌هایی که تابع ناپیوسته دارند لایه دوم لازم است. مقدار خطاهای مدل نیز با تعداد گره‌های پنهان مانند تابع نمایی زیر است [۲].



شکل شماره (۱): مقدار بهینه تعداد گره پنهان - مقدار خطای مدل [۲].

۲-۱- اعتبار سنجی شبکه عصبی

استفاده از مجموعه اعتبارسنجی ضروری می‌باشد ولی استفاده از مجموعه تست اختیاری است به عبارتی پس از اتمام آموزش شبکه با ارائه داده‌های مجموعه اعتبارسنجی به شبکه قدرت تعمیم شبکه ارزیابی می‌شود. بدین صورت که هر چه اختلاف بین خروجی واقعی و مطلوب در سری اعتبارسنجی (که در آموزش شبکه شرکت نداشتند) کمتر باشد، شبکه از تعمیم پذیری خوبی برخوردار می‌باشد. به طور کل از دو آماره برای ارزیابی اختلاف دو مجموعه خروجی استفاده می‌گردد [۳].

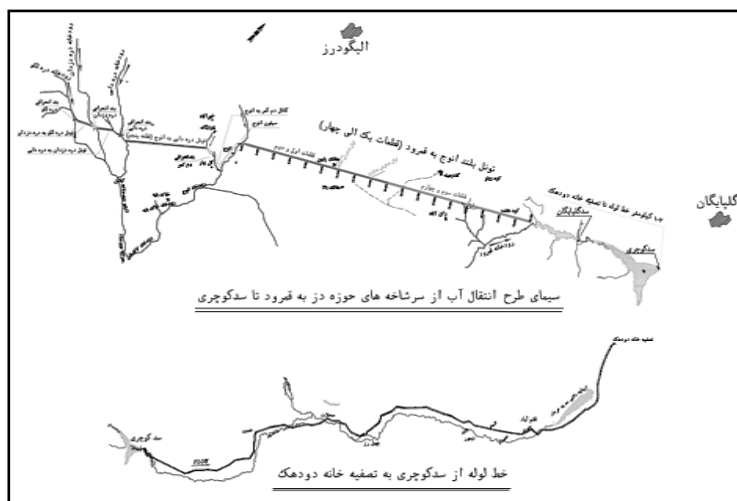
الف) ضریب همبستگی

ب) میانگین قدر مطلق اختلافات

منظور از توانایی خوب تعمیم پذیری شبکه، صحیح عمل کردن رابطه ورودی-خروجی محاسبه شده برای الگوی ورودی-خروجی اعتبارسنجی می‌باشد. زمانی که به شبکه تعداد زیادی از جفت‌های ورودی-خروجی به عنوان مثال‌های آموزشی داده می‌شود، شبکه آموزش را از بر می‌کند و دیگر قادر به انجام عمل درونیایی نخواهد بود و در نتیجه قدرت تعمیم آن کاهش می‌یابد [۳].

۳- موقعیت جغرافیایی

منطقه اجرای طرح بخشی از ناحیه آبریز سرشاخه‌های دز واقع در استان لرستان و بخشی از ناحیه قمرود واقع در استان‌های اصفهان و مرکزی می‌باشد. محل احداث تونل در استان لرستان، در فاصله تقریباً ۲۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان الیگودرز واقع شده است [۴]. منطقه مسیر تونل که در زون دگرگونی سندج - سیرجان قرار می‌گیرد تنوع قابل توجهی از دیدگاه شرایط سنگ‌شناسی دگرگونی دارد. سطح آب زیرزمینی به طور کلی در بالای خط پروژه قرار دارد. این شرایط از دیدگاه‌های گوناگون و با توجه به شرایط زمین‌شناسی ریسک‌های گوناگون را به وجود می‌آورد که مشکلاتی را در مناطق آبرفتی و در مناطق سنگ‌های سخت درزه‌دار ایجاد کرده است [۵].



شکل شماره (۲): سیمای طرح انتقال آب دز- قمرود [۵].

۴- پارامترهای مورد استفاده شبکه عصبی

جهت پیش بینی نرخ نفوذ با استفاده از شبکه عصبی عوامل متعددی چه در مورد دستگاه و چه مسائل ژئوتکنیکی بر روی مقدار نرخ نفوذ مؤثر می‌باشند. از بین این همه عوامل متعدد انتخاب تعداد محدود و قابل اندازه گیری دقیق جهت ارائه در نرم افزارهای شبکه عصبی برای مراحل آموزش و ارزیابی شبکه که از طرفی کمیت داده ها نیز قابل ملاحظه باشد، سخت به نظر می‌رسد. در این تحقیق تعدادی از پارامترهای مؤثر در نرخ نفوذ به عنوان ورودی و نرخ نفوذ به عنوان پارامتر هدف جهت آموزش شبکه بکار می‌رود.

۴-۱- جمع آوری داده ها

مجموعه داده‌های انتخابی جهت ورودی و خروجی به ۲ بخش عمده تقسیم گردید:

۱- داده‌های زمین شناسی: با نگاهی به مطالعات قبلی، RQD (درجه یکنواختی سنگ) و UCS (مقاومت تک محوره بر حسب مگا پاسکال) دو پارامتر اصلی مورد استفاده در اکثر شبکه های عصبی و دیگر روش‌های پیش‌بینی می‌باشند زیرا مشخصه عمده جهت نشان دادن شرایط فیزیکی ماده سنگ هستند. درصد کوارتز به عنوان پارامتری تعیین کننده در عملیات برش سنگ مورد استفاده است.

۲- داده‌های سیستم حفاری: گشتاور اعمالی (کیلو نیوتن بر متر) و سرعت چرخش کله حفار (بر حسب دور بر دقیقه) به عنوان ۲ پارامتر مؤثر در مقابل نرخ نفوذ بکار گرفته شده‌اند.

داده‌های زمین شناسی از گزارش مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده توسط شرکت سایبر قابل برداشت می‌باشند. در کنار این داده‌ها که به صورت لایه بندی زمین شناسی مشخص شده‌اند اطلاعات عملکرد دستگاه شامل گشتاور اعمالی و سرعت چرخش کله حفار و در نهایت نرخ نفوذ دستگاه برای هر کورس حفاری (۱/۳۰ متر حفاری) در گزارش های سیستم کنترل طراحی شده بر روی دستگاه ثبت می‌شود.

۴-۲- بررسی آماری داده ها

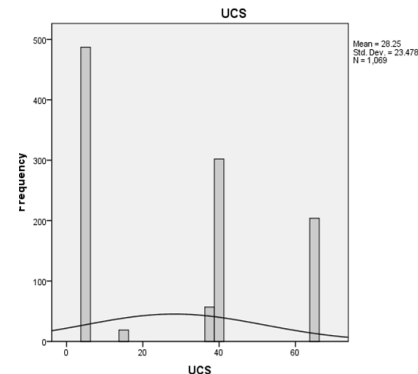
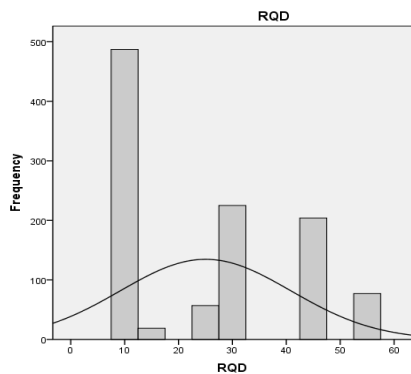
با استفاده از نرم افزار IBM SPSS 19 تعداد ۱۰۶۹ داده موجود در ۶ گروه شاخص یکنواختی ماده سنگ، مقاومت تک محوره، درصد کوارتز، سرعت چرخش کله حفار، گشتاور اعمالی به کله حفار و نرخ نفوذ مورد بررسی قرار گرفته و نمودارهای هیستوگرام آنها به ترتیب در شکل های (۳) تا (۸) آمده است، همان طور که مشاهده می‌شود داده‌ها تقریباً حالت نرمال داشته و حتی داده‌های گسسته مثل مقاومت تک محوره، شاخص یکنواختی از نظر تعداد و مقدار تقریباً حالت نرمال دارند. همچنین در جدول شماره (۱) بررسی اجمالی آماری داده ها آورده شده است. مقادیر ماکزیمم، مینیمم، میانگین حسابی و انحراف از معیار داده‌ها برای ورودی‌ها و خروجی شبکه آورده شده است.

جدول شماره (۱): پارامتر های آماری ورودی ها و خروجی

پارامتر	کل داده ها	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	انحراف از معیار
UCS (MPa)	۱۰۶۹	۶۵	۵	۲۸/۲۵	۲۳/۴۷۸
RQD	۱۰۶۹	۵۵	۱۰	۲۵/۰۲	۱۵/۸۴۱
کوارتز	۱۰۶۹	۴۰	۰/۵	۸/۶۲	۱۰/۵۱۲
گشتاور (کیلو نیوتن بر متر)	۱۰۶۹	۱۳۸/۷۴	۵/۵۶	۸/۶۲	۲۰/۹۵
سرعت چرخش (بر حسب دور بر دقیقه)	۱۰۶۹	۱۶/۴۰	۱/۲۷	۳/۶۶	۱/۰۶۵
نرخ نفوذ (میلیمتر بر دور کله حفار)	۱۰۶۹	۲۵/۰۵	۷/۰۰	۱۱/۳۱	۳/۳۲۸

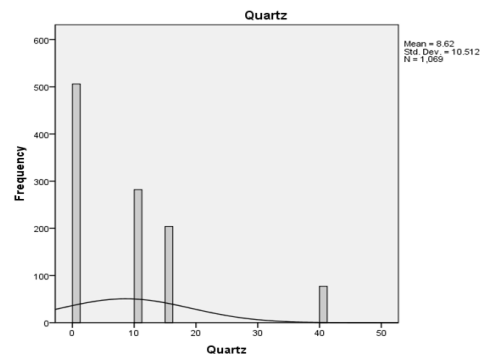
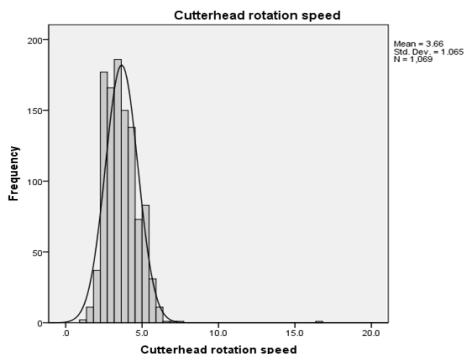
جدول شماره (۲): مقادیر UCS، RQD و درصد کوارتز برای ۶ لایه

ردیف	واحد زمین شناسی	RQD	UCS	درصد کوارتز
۱	an	۴۵	۶۵	۱۵
۲	gsch1	۳۰	۴۰	۱۰
۳	gsch2	۲۵	۳۸	۱۰
۴	all	۱۰	۵	۰/۵
۵	gsch7	۱۵	۱۵	۰/۵
۶	mq	۵۵	۴۰	۴۰



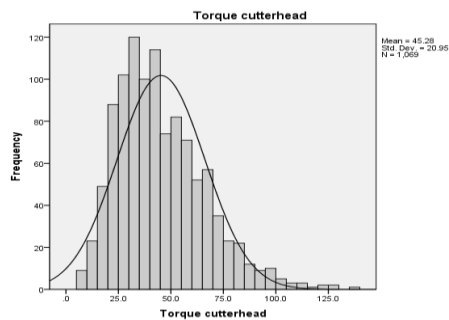
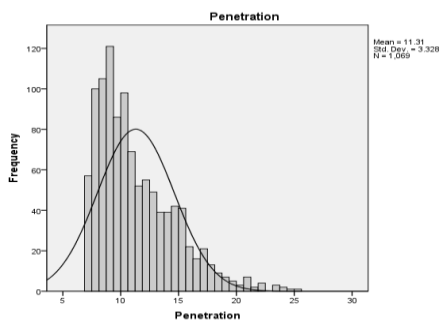
شکل شماره (۴) هیستوگرام شاخص کیفیت سنگ RQD

شکل شماره (۳) هیستوگرام مقاومت تک محوره سنگ UCS (MPa)



شکل شماره (۶) هیستوگرام سرعت چرخش کله حفار (بر حسب دور بر دقیقه)

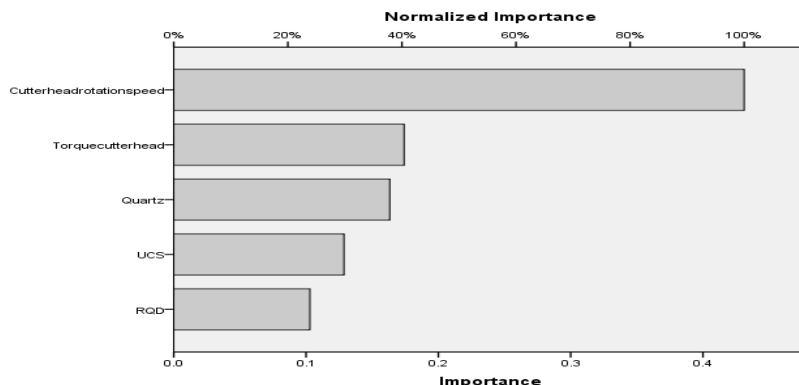
شکل شماره (۵) هیستوگرام درصد کوارتز



شکل شماره (۷) هیستوگرام گشتاور اعمالی به کله حفار (کیلو نیوتن بر متر) شکل شماره (۸) هیستوگرام نرخ نفوذ (میلیمتر بر دور کله حفار)

۳-۴- تحلیل حساسیت داده های ورودی

با تعیین مقدار اثر هر پارامتر مستقل، بر روی پیش بینی پارامتر وابسته می توان در صورت پایین یا معکوس بودن تأثیر هر کدام، اقدام به حذف آن کرد. نتایج تحلیل حساسیت با برنامه SPSS، همان طور که در شکل (۹) مشخص است: سرعت چرخش کله حفار تأثیر ۱۰۰ درصدی در پیش بینی داشته که احتمالاً به علت انتخاب واحد نرخ نفوذ بر مبنای میلیمتر بر دور کله حفار که تا حدودی به هم وابسته می باشند، این اتفاق افتاده است. پس از آن میزان گشتاور با ۴۰ و درصد کوارتز سنگ با حدود ۳۸ درصد تقریباً اهمیت یکسانی دارند. درجه یکنواختی سنگ با حدود ۲۴ درصد که نسبتاً قابل توجه بوده و قابل اغماض نمی باشد. در نتیجه هر ۵ پارامتر جمع آوری شده جهت انجام مدل سازی بکار گرفته شده اند.



شکل شماره (۹) میزان اهمیت پارامتر های مختلف در پیش بینی نرخ نفوذ

۴-۴- بکار گیری رگرسیون غیر خطی چند متغیره

در مرحله اول تحلیل، یک مجموعه تحلیل رگرسیونی بین متغیر های وابسته و متغیر های مستقل انتخاب شدند. این نتایج نشان می دهند بدست آوردن یک رابطه قابل اطمینان برای تخمین نرخ نفوذ، تنها با استفاده از یک متغیر، غیر ممکن است. زیرا برای فراهم کردن یک پیش بینی قابل اطمینان ساختن مدل های چند متغیره اجتناب ناپذیر است. با دقت در روابط بین نرخ نفوذ و متغیر های مستقل در اکثر موارد غیر خطی بودن این روابط مشخص است. لذا رگرسیون غیر خطی با استفاده از بسته نرم افزاری Data Fit نسخه ۱۱.۵ انجام شده است. بر خلاف رگرسیون خطی متداول که در برآورد روابط غیر خطی محدودیت دارد رگرسیون غیر خطی می تواند مدلی با روابط دلخواه بین متغیر های مستقل و وابسته ایجاد کند. ارتباط نرخ نفوذ پذیری با کل پارامترها با فرمول زیر نشان داده می شود:

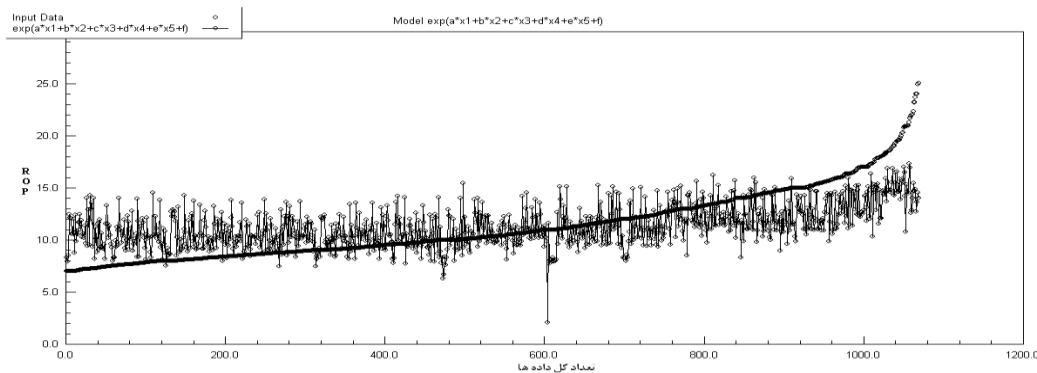
$$P = \exp(a*(\text{Torque}) + b*(S) + c*) + (RQD) + d*(UCS) + e*(Q) + f$$

جدول شماره (۳) مقادیر ثابت های معادله غیر خطی نرخ نفوذ

مقدار	ثابت	مقدار	ثابت
۸/۶۵۴۱۷E-۰۰۳	d	۳/۱۷۸۴۸E-۰۰۴	a
۲/۹۲۱۹E-۰۰۲	e	-۰.۱۳۹۵۷	b
۷۶۳۶.۳۳	f	-۳.۶۲۷۶۸۲E-۰۰۲	c

ارتباط بین کل داده های ورودی با نرخ نفوذ TBM، با در نظر گرفتن تأثیر تمامی پارامترهای ذکر شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

پیوسته بودن نمودار بیانگر مناسب بودن پارامترهای انتخابی و تاثیر این پارامترها بر نرخ نفوذ است. ضریب همبستگی بدست آمده با روش دیتافیت ۳۱ درصد و مقدار خطای میانگین مربعات آن ۷/۵۷ می باشد.



شکل شماره (۱۰) رابطه بین کل پارامترها و نرخ نفوذ

۵- معماری شبکه عصبی مصنوعی

در نرم افزار نورسلوشن ۸ تابع مختلف انتقال جهت لایه های میانی و لایه خروجی تعریف شده است که با توجه به اینکه قانون خاصی در مورد انتخاب نوع توابع وجود ندارد این انتخاب با تلاش سعی و خطا انجام شده است. این ۸ تابع شامل tanh, sigmoid, linear tanh, linear, bias, soft max, linearsigmoid و axon می باشد که با توجه به جایگشت ۸ تابع در لایه میانی و ۸ تابع در لایه خروجی ۶۴ مدل شبکه مختلف ساخته شد که مناسب ترین و نامناسب ترین نتایج آن در جدول (۴) آمده است. که بکارگیری تابع linear tanh برای لایه میانی و تابع ساده axon برای لایه خروجی بهترین نتیجه را برای پیش بینی نرخ نفوذ داشته است.

جدول شماره (۴) مقادیر ضریب همبستگی و مجموع مربعات خطا برای شبکه های متفاوت

ردیف	تابع انتقال لایه میانی	تابع انتقال خروجی	ضریب همبستگی	خطای میانگین مربعات
۱	linear tanh	axon	۰.۷۴۰۶۶	۴.۵۸۷۴۱
۲	bias	soft max	۹E-۱۶	۲۳۰.۱۶۲۹

۵-۱- مدل پس انتشار ANN

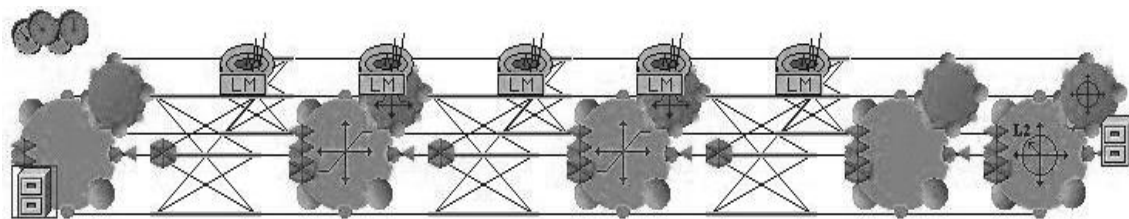
الگوریتم های متفاوتی برای آموزش شبکه موجودند که از میان آنها الگوریتم پس انتشار فراگیرتر بوده و از تکنیک قوی تری برخوردار است، چراکه راهکار آموزشی مناسبی را برای شبکه عصبی چند لایه ای فراهم می آورد. الگوی پس انتشار بوسیله تعمیم قانون یادگیری Widrow-Hoff برای شبکه های چند لایه و توابع انتقال غیر خطی متغیر به وجود می آید. در این مدل سازی شبکه با دو لایه مخفی که به ترتیب ۱۳ و ۳ نرون هستند انتخاب شد. قبل از آموزش و اجرای ANN، مجموعه داده ها بصورت تصادفی به زیرمجموعه های آموزشی، تعمیمی و آزمایشی تقسیم می شوند. در مورد مطالعاتی حاضر، از مجموع ۱۰۶۹ داده، ۲۵٪ برای آزمایش شبکه، ۱۵٪ برای ارزیابی و ۶۰٪ باقی مانده برای یادگیری انتخاب شده است. مرحله آزمایش برای جلوگیری از خطای بیش یادگیری (over-training) و تعیین نقاط بهینه یادگیری می باشد. الگوریتم Levenberg-Marquardt (تغییر یافته الگوریتم پس انتشار کلاسیک) برای یادگیری شبکه انتخاب شده است، این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم ها سریعتر آموزش می بیند. با هدف رسیدن به یک معماری مناسب، شبکه با تغذیه پیشرو انتخاب شده که این شبکه دارای ۲ لایه پنهان با تابع انتقال خطی تانزانت هایپربولیک و یک لایه خروجی متناظر با ROP با تابع انتقال ساده آکسون می باشد. معمولاً با سعی و خطا می توان به شبکه بهینه ای برای حل یک مسئله خاص رسید. در این پژوهش نیز چندین معماری شبکه امتحان شد که گزینه ای از نتایج بدست آمده در جدول (۵) آمده است.

جدول (۵) نتایج مقایسه بین بعضی مدل های ANN

قانون آموزش	تابع انتقال	نرون	لایه
Levenberg-Marquardt	linear tanh	۱۳	لایه میانی اول
Levenberg-Marquardt	linear tanh	۳	لایه میانی دوم
Levenberg-Marquardt	axon	۱	لایه خروجی

۶- نتایج شبکه عصبی در مراحل آموزش و ارزیابی

با مشاهده خطاهای بدست آمده بویژه در مرحله تست داده‌ها و مقادیر ضریب همبستگی، شبکه با معماری ۱-۳-۵ که دارای حداقل (MSE) و حداکثر ضریب همبستگی می‌باشد، بعنوان مدل بهینه انتخاب شد. این شبکه در شکل (۱۲) نشان داده شده است. تابع انتقال خطی تانژانت هایپربولیک در لایه‌های پنهان و تابع ساده آکسون در لایه خروجی به صورت شماتیک نشان داده شده است و در جدول (۶) شرح آن آمده است.



شکل شماره (۱۲) مدل بهینه شبکه عصبی

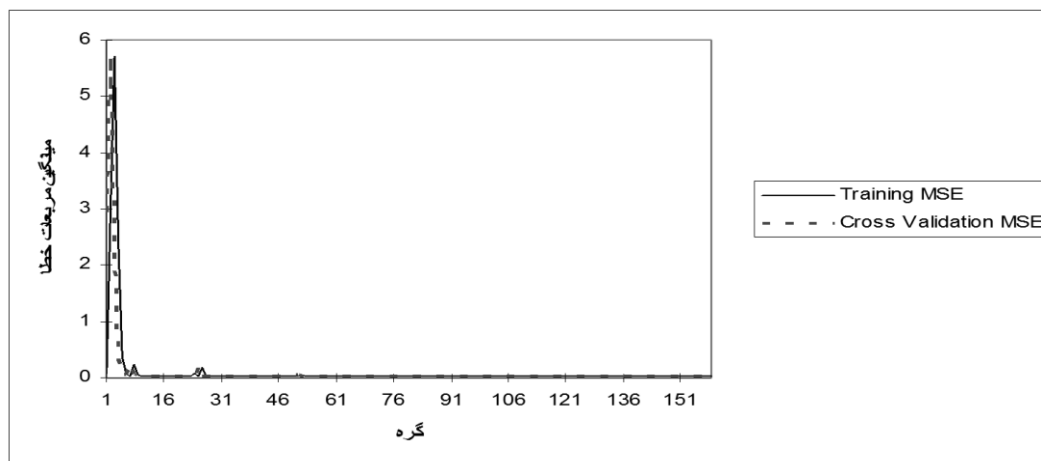
جدول (۶) نوع توابع انتقال و قانون آموزش شبکه

ردیف	مدل	خطای میانگین مربعات	ضریب همبستگی	ردیف	مدل	خطای میانگین مربعات	ضریب همبستگی
۱	۹-۸-۴	۰.۳۳۳۱	۰.۵۱۰۴	۹	۱۳-۹-۴	۹.۶۷۴۵	۰.۳۱۸۲
۲	۱۳-۹-۳	۰.۲۲۳۸	۰.۳۲۶۹	۱۰	۱۷-۱۳-۹-۴	۶.۲۲۲	۰.۶۵۱۶
۳	۶-۳	۳.۹۳۸۲۸	۰.۶۵۱۵	۱۱	۲۵-۹	۶.۳۳۵۰	۰.۷۱۴۲
۴	۱۳-۲	۷.۲۳۵۱	۰.۶۱۱۳	۱۲	۱۳-۹-۷-۴	۵.۹۶۹۰	۰.۶۷۷۷
۵	۵-۴-۳-۲-۱	۹.۷۶۸۲۷	۰.۵۸۰۱	۱۳	۱۵-۱۱-۹-۳	۵.۹۳۷	۰.۶۷۳۴
۶	۱۳-۹	۷.۸۴۲۹	۰.۶۴۸۰	۱۴	۱۱-۹-۷-۴	۶.۴۳۵۷	۰.۵۷۲۵
۷	۹-۵	۴.۶۳۳۲	۰.۷۳۲۴	۱۵	۲۵	۶.۲۸۷۰	۰.۶۵۴۱
۸	۱۳-۳	۵.۵۸۷۲	۰.۷۵۱۲	۱۶	۱۵-۱۳-۱	۶.۱۶۷۳	۰.۶۷۳۱

برای مرحله آموزش ۱۰۰۰ گره تعریف شد که با تنظیمات مربوطه در صورت عدم تغییر وزن‌ها پس از ۱۰۰ گره متوالی آموزش متوقف می‌شود. در این شبکه در مرحله آموزش پس از ۱۵۸ گره آموزش متوقف شده است یعنی وزن‌ها از گره ۵۹ به بعد تغییری نداشته‌اند. نتایج این مرحله در جدول شماره (۷) و شکل (۱۳) آمده است.

جدول (۷) نتایج شبکه در مراحل آموزش و ارزیابی

ارزیابی	آموزش	بهترین شبکه
۵۹	۱۵۸	تعداد گره
۰.۰۲۹۷۸۶۷۹۱	۰.۰۲۷۰۴۶۴۷۴	کمترین میانگین مربعات خطا
۰.۰۳۰۰۲۵۶۸۶	۰.۰۲۷۰۴۶۴۷۶	میانگین مربعات خطای نهایی



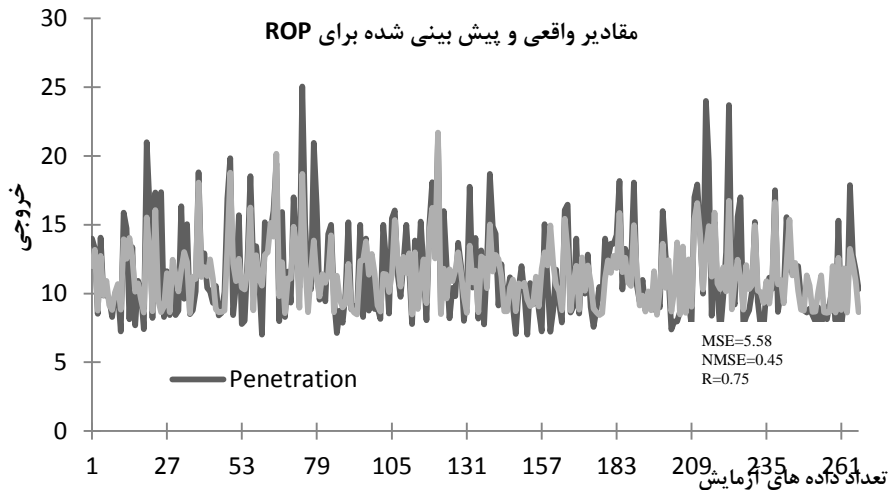
شکل شماره (۱۳) رابطه بین تعداد گره و میانگین مربعات خطا

۱-۶- نتایج نهایی شبکه عصبی در مراحل آزمایش

بر اساس تنظیمات اولیه، ۲۵ درصد داده‌های ورودی (۲۶۷ ورودی) برای مرحله آزمایش مورد استفاده قرار گرفته که نتایج آن در جداول ۸ و ۹ و شکل ۱۴ آمده است. در جدول (۸) تعداد ۱۰ ورودی از لایه‌های مختلف به صورت تصادفی انتخاب شد و به همراه نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در بعضی موارد مقدار پیش‌بینی با مقدار واقعی با توجه به واحد نرخ نفوذ (میلیمتر بر دور کله حفار) دقیقاً یکی است و در باقی موارد این اختلاف حداکثر به ۶ میلیمتر بر دور کله حفار می‌رسد. در شکل ۱۴ نیز مقایسه بین نرخ نفوذ واقعی و پیش‌بینی شده بصورت نموداری و شماتیک نشان داده شده است. نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده بر روی خط ممتد و نرخ نفوذ پیش‌بینی با نقاط سیاه مشخص شده است در این نمودار نیز مقادیر پیش‌بینی و واقعی بسیار به هم نزدیک است.

جدول (۸) نتایج شبکه در مراحل آزمایش

ردیف	نرخ نفوذ واقعی (mm/r)	نرخ نفوذ پیش‌بینی (mm/r)	ردیف	نرخ نفوذ واقعی (mm/r)	نرخ پیش‌بینی (mm/r)
۱	۱۴	۱۱.۹۸	۶	۹.۹۵	۱۰.۹۱۱
۲	۱۳.۲۷۰۹	۱۳.۱۸۸	۷	۹.۵۸	۹.۱۴۵۴
۳	۸.۵۲	۸.۷۶۴۵	۸	۸.۲۸۷	۸.۸۱۲۱
۴	۱۴.۰۵۷۶	۱۲.۷۲۴	۹	۱۰	۱۰.۰۹۰
۵	۹.۸۴	۹.۸۷۸۳	۱۰	۱۰.۲	۱۰.۶۹۳



شکل (۱۴) رابطه بین نرخ نفوذ واقعی و پیش‌بینی برای داده‌های آزمایش

در جدول (۹) مقادیر میانگین مربعات خطا، میانگین مربعات خطای نرمال شده، میانگین خطای مطلق، کمترین خطای مطلق، بیشترین خطای مطلق و در نهایت مقدار ضریب همبستگی برای داده‌های ورودی و خروجی در مرحله آزمایش محاسبه و به تفکیک آورده شده است.

جدول (۹) نتایج ضریب همبستگی و خطای شبکه در مراحل آزمایش

پارامترها	نتایج
میانگین مربعات خطا	۵.۵۸۷۲۵
میانگین مربعات خطای نرمال شده	۰.۴۰۲۳۳
میانگین خطای مطلق	۱.۷۳۱۹۵
کمترین خطای مطلق	۰.۰۰۲۰۴
بیشترین خطای مطلق	۱۰.۸۰۱۳۶
ضریب همبستگی	۰.۷۵۱۲۶

۷- نتیجه‌گیری

برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM در تونل قمرود از یک شبکه عصبی چندلایه با الگوریتم پس‌انتشار خطا استفاده شد. برای اطمینان از نتایج حاصل از شبکه عصبی، نتایج بدست آمده از این روش با نتایج حاصل از رگرسیون‌گیری با روش دیتافیت مقایسه شد و ضریب همبستگی بالای

بدست آمده از شبکه عصبی (75% r) در مقایسه با ضریب همبستگی روش دیتافیت (31% r)، مؤید کارا تر بودن استفاده از شبکه عصبی در تعیین نرخ نفوذ TBM در تونل مذکور است.

اگرچه در مدلسازی شبکه عصبی، هیچ محدودیتی در تعداد پارامترهای ورودی نیست، اما با استفاده از هیستوگرامها و تحلیل‌های حساسیت، پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر نرخ نفوذ دارند، انتخاب شد تا مقدار خطای بدست آمده کم‌تر باشد. با توجه به تعریف، 5 پارامتر به‌عنوان پارامتر-های ورودی و پارامتر نرخ نفوذ TBM، به‌عنوان پارامتر خروجی انتخاب شدند. پارامترهای ورودی شامل: درجه یکنواختی سنگ RQD، مقاومت تک محوره سنگ، درصد کواتز سنگ، گشتاور اعمالی به کله حفار و سرعت چرخش کله حفار است.

از آنجا که راه حل مستقیم و معینی برای تعیین تعداد مناسب لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌های واقع در هر یک از این لایه‌ها وجود ندارد، معمولاً با روش سعی خطا می‌توان به شبکه بهینه با کمترین MSE و بیشترین ضریب همبستگی رسید. بهترین شبکه با 5 نرون در لایه ورودی، دو لایه پنهان به ترتیب با 13 و 3 نرون با تابع انتقال خطی تانژانت و یک نرون در لایه خروجی با تابع انتقال آکسون برای نرخ نفوذ در تونل قمرود انتخاب شد.

با توجه به ضریب همبستگی (75% r) و ($MSE= 5.58$) بدست آمده با روش شبکه عصبی، می‌توان شبکه عصبی مصنوعی را به‌عنوان روشی مناسب برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM معرفی کرد.

از آنجا که شبکه عصبی این قابلیت را داراست که همزمان با آموزش دیدن داده‌ها، اطلاعات خود را به‌روز کند، نتایج بدست آمده با این روش از دقت و قدرت تحلیل بالایی برخوردار بوده و همچنین در مقایسه با روش‌های تجربی که اکثراً هزینه‌بر هستند، آسان‌تر و ارزان‌تر انجام می‌شوند.

مراجع:

[1] Basheer, IA and Hajmeer, M, "Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application", J Microbiol Meth; No. 43, pp. 3–31, 2000

[2] Sonmez, H., Gokceoglu, C.H. A and Nefeslioglu, A, "Estimation of rock modulus: For intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, No. 43, pp. 224–235, 2006

[3] حسنی پاک، علی اصغر، زمین آمار، انتشارات دانشگاه تهران، 1380

[4] شرکت سایبر، گزارشات زمین‌شناسی و مکانیک سنگی قطعات 1 و 2 تونل انتقال آب قمرود، 1384

[5] شرکت سایبر، گزارشات زمین‌شناسی و مکانیک سنگی قطعات 1 و 2 تونل انتقال آب قمرود، 1385