

تخمین نرخ تولید ماشین حفاری بر اساس خواص سنگ و پارامترهای دستگاهی با پیش‌بینی سرعت نفوذ سرمته

علی دولتی^۱، حسین ثمره^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سیرجان، سیرجان
۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بافت، بافت

(دریافت ۱۳۹۸/۰۶/۰۴، پذیرش ۱۳۹۸/۱۲/۱۴)

چکیده

حفر تعداد مشخصی چال انفجاری در هر ساعت، نقش تعیین‌کننده‌ای در نرخ تولید ماشین حفاری دارد. بنابراین با توجه به قیمت دستگاه حفاری و بالا بودن هزینه‌های عملیاتی آنها، استفاده مفید از زمان در دسترس بودن دستگاه برای حفر حداکثر چال‌های انفجاری ممکن، از اهمیت زیادی برخوردار است. سرعت حفر چال انفجاری تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله خواص سنگ و ویژگی‌های دستگاه حفاری است. بنابراین با شناخت و تعیین میزان اثرگذاری عوامل موثر بر سرعت نفوذ سرمته، علاوه بر افزایش راندمان ماشین می‌توان هزینه حفاری را نیز کاهش داد. در این تحقیق برای پیش‌بینی نرخ نفوذ سرمته ابتدا در معدن مورد مطالعه شاخص‌های مورد نظر مربوط به ۹۱ چال از ۲۸ بلوک انفجاری در ۹ پله استخراجی مختلف برداشت شد. سپس با استفاده از روش میدان کسینوسی، میزان حساسیت تغییرات تک‌تک شاخص‌های ورودی بر سرعت نفوذ سرمته مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت با کمک آنالیز رگرسیون غیرخطی، شبکه عصبی مصنوعی و منطق استنتاج فازی مدل‌هایی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ سرمته ایجاد شد. اعتبارسنجی مدل‌ها با استفاده از ۱۲ سری داده آزمایشی نشان داد که مدل شبکه عصبی با ضریب تعیین ۰/۶۸ و میانگین مطلق درصد خطا ۱۲/۱۵ نسبت به مدل غیرخطی چند جمله‌ای درجه دوم، با دقت جزئی بیشتری می‌تواند سرعت نفوذ سرمته را پیش‌بینی کند. در ادامه با استفاده از مدل چند جمله‌ای درجه دوم، درصد بازدهی عملیاتی، قابلیت دسترسی و نرخ تولید ماشین حفاری برای یک روز کاری در سنگ‌ها با مقاومت کم، متوسط و زیاد تخمین زده شد.

کلمات کلیدی

سرعت نفوذ سرمته، منطق استنتاج فازی، شبکه عصبی مصنوعی، آنالیز رگرسیون چند متغیره، نرخ تولید.

۱- مقدمه

بود. آنها در این تحقیق، به‌طور جداگانه بین نرخ نفوذ سرمته و هر یک از شاخص‌های بارپشت سرمته و سرعت چرخش سرمته یک مدل رگرسیونی تک‌متغیره ایجاد کردند [۱۴]. "ایکساوو" و همکاران نیز مطالعه‌ای برای ارزیابی کارایی سیستم حفاری چرخشی و عکس‌العمل سرمته هنگام تماس با سطح سنگ با استفاده از ثبت مشخصات امواج لرزه‌ای الاستیک از طرف دستگاه حفاری و سرمته هنگام حفر چال انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که با کاهش دامنه امواج لرزه و پهنای باند فرکانسی، کارایی سیستم حفاری افزایش پیدا می‌کند [۱۵].

امروزه با توجه به دانش بالای ساخت دستگاه‌های حفاری و نیز آلیاژهای پیشرفته مورد استفاده در سرمته‌ها به‌دلیل نیاز به تولید بالا و حفر چال‌های انفجار با قطر متوسط تا بزرگ در معادن روباز، سیستم حفاری چرخشی و چرخشی-ضربه‌ای از مقبولیت بیشتری نسبت به سایر سیستم‌ها برخوردارند. بنابراین تحقیق حاضر بر روی دو سیستم حفاری چرخشی مشابه مدل (OMZ^۱) موجود در معدن مس سرچشمه انجام شد.

هدف اصلی از این مطالعه ایجاد مدلی کاربردی برای پیش‌بینی سرعت نفوذ سرمته حفاری (PR) بر حسب متر در دقیقه با تلفیقی از شاخص‌های دستگاهی و زمین‌شناسی موثر است که از یک طرف مقادیر آنها برای انواع بلوک‌های حفاری توسط واحد زمین‌شناسی و ژئوتکتونیک معدن مس سرچشمه تعیین شده باشند و از طرف دیگر، در طول زمان حفر هر چال، توسط واحد حفاری قابل اندازه‌گیری باشند و مورد استفاده قرار گیرند. بر این اساس از فشار سیال حفاری (Pa) بر حسب مگاپاسکال، سرعت چرخش سرمته (RPM) بر حسب دور بر دقیقه، فشار پشت سرمته (Th) بر حسب مگاپاسکال، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) بر حسب مگاپاسکال، دانسیته (γ) بر حسب تن بر مترمکعب و درصد سیلیس یا محتوای کوارتز سنگ (Si) برای تخمین نرخ نفوذ سرمته و نرخ تولید ماشین مذکور استفاده شد. البته عوامل دیگری نیز مرتبط با دستگاه و خواص سنگ‌ها بر نرخ نفوذ سرمته تاثیرگذار هستند. اما در تحقیق حاضر سعی شد شاخص‌هایی در نظر گرفته شوند که از یک سو در راستای دسترسی به هدف اصلی این تحقیق باشند و از سوی دیگر علاوه بر فراوانی آنها در تحقیقات مشابه انجام‌شده، مقادیرشان در توده سنگ‌های مربوط به ۲۸ بلوک انفجاری برداشت‌شده تفاوت محسوسی داشته باشند. به‌عنوان مثال در این تحقیق چون در مدت زمان حفر حدود ۱۳۰۰

سرعت حفر یک چال انفجاری در معدن تحت تاثیر مستقیم خواص فیزیکی و ژئومکانیکی سنگ‌ها، شاخص‌های دستگاهی در هنگام حفر و عوامل پشتیبانی مانند تعمیر و نگهداری است [۲۱]. به‌همین دلیل آگاهی از چگونگی تاثیرگذاری خواص سنگ و معیارهای عملکردی دستگاه حفاری بر سرعت نفوذ سرمته، کمک بزرگی به انتخاب نوع سیستم حفاری، تعداد مورد نیاز دستگاه و دسترسی به میزان تولید سالانه معدن می‌کند. از طرف دیگر، با توجه به حجم بالای عملیات حفاری در معادن روباز کاواکی، پیش‌بینی سرعت حفاری در هر توده سنگ و تعیین کارایی دستگاه می‌تواند شرایط اقتصادی و عملیاتی معدن را به‌طور جدی تحت تاثیر و بهبود قرار دهد. به‌عبارت دیگر برای دستیابی به یک تولید سالانه معین در معادن روباز کاواکی، تعیین کارایی دستگاه حفاری بر اساس کیفیت و کمیت چال‌خوری سنگ‌ها در معدن از اهمیت حیاتی برخوردار است.

برای بهبود شرایط عملیاتی و اقتصادی در معادن و دستیابی به عملکرد بهتر واحد استخراجی، مطالعات زیادی توسط محققان بر روی ماشین‌آلات حفاری در معادن مختلف دنیا انجام شده است. برخی از این تحقیق‌ها به تاثیر خواص ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ، خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ و استفاده از شاخص قابلیت حفاری توده‌سنگ برای پیش‌بینی سرعت حفاری ماشین‌آلات ضربه‌ای، ضربه‌ای-چرخشی و یا چرخشی با ابزارهای متعددی مانند سیستم مهندسی سنگ یا آنالیز رگرسیون پرداخته‌اند [۳-۸] در همین ارتباط پژوهشگران مطالعات زیادی برای تعیین قابلیت حفاری باتوجه به خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ در معادن انجام داده‌اند. هدف از این تحقیق‌ها موارد مختلفی مانند طبقه‌بندی سنگ‌های معدن از نظر قابلیت حفاری، تعیین نرخ نفوذ سرمته، انتخاب تجهیزات حفاری برای معدن و یا تعیین شاخص‌های حفاری برای توده سنگ‌ها در معدن بوده و از ابزارهای مختلفی مانند منطق‌فازی، ابزار هوش مصنوعی و آنالیز رگرسیون چند متغیره برای مدل‌سازی استفاده شده است [۹-۱۳]. "چنیانی و همکاران" برای پیش‌بینی قابلیت حفاری ویژه توده سنگ‌ها در معدن مس سرچشمه، تحقیقی را براساس ۷ معیار فیزیکی و مکانیکی سنگ انجام دادند. نتیجه این تحقیق، آرایه دو مدل رگرسیون، یک مدل خطی و یک مدل غیرخطی چندمتغیره، برای پیش‌بینی قابلیت حفاری سنگ‌ها در معدن مورد مطالعه

گرانودیوریت و آندزیت به ترتیب در حاشیه و مرکز پیت معدن قرار گرفته‌اند. این سنگ‌ها در زمان کانی‌زایی توسط محلول‌های گرمابی اولیه و ثانویه، تحت تاثیر دگرسانی‌های مختلفی مانند پتاسیک، بیوتیت، فیلک و پروپیلیتیک با شدت‌های مختلف قرار گرفته‌اند. همچنین سه نوع دایک شامل، هورنبلند، بیوتیت و فلدسپار بعد از کانی‌زایی به صورت توده‌های نفوذی با ضخامت و شدت هوازگی متفاوت و شیب‌های به نسبت قایم و روند شمال غربی و جنوب-جنوب شرقی توده سنگ‌های اصلی را قطع کرده‌اند. در ادامه روند تحولات زمین‌شناسی، یک سری گسل با روند شرقی-جنوب غربی و شمالی-جنوبی توده سنگ‌های اصلی و دایک‌ها را تحت تاثیر قرار داده‌اند. بدین ترتیب ساختار زمین‌شناسی در این توده پورفیری بسیار پیچیده است. به همین دلیل برای دسترسی به خردشدگی مناسب سنگ‌ها، هنگام انفجار از چال‌های انفجاری با قطرهای مختلف ۶،۵، ۸،۵، ۹ و ۱۰ اینچ استفاده می‌شود. تعداد چال‌های حفر شده در هر بلوک انفجاری به طور معمول بین ۶۰ تا ۱۳۰ چال است که در ۳ تا ۵ ردیف حفر می‌شوند. ارتفاع پله‌ها در این معدن، ۱۲،۵ متر است که با احتساب حدود ۲،۵ متر اضافه حفاری در حالت معمول، عمق چال‌ها به ۱۵ متر می‌رسد. مشخصات چال‌های برداشت-شده، خواص فیزیکی و ژئومکانیکی مربوط به سنگ‌های حفاری شده و مقادیر مربوط به شاخص‌های دستگاهی این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است. جدول ۲ مشخصات فنی دستگاه حفاری دورانی مدل (OMZ)، مورد مطالعه در این تحقیق، را نمایش می‌دهد.

۳- روش تحقیق

امروزه بسته به روش معدن‌کاری و حجم تولید سالانه مورد نیاز هر معدن، نوع و تعداد ماشین‌آلات حفاری متفاوت است. در معدن‌کاری روباز به دلیل بالا بودن تولید سالانه، لزوماً چال‌های انفجاری با قطر متوسط تا بزرگ حفر می‌شوند و استفاده از ماشین‌آلات حفاری چرخشی در اولویت قرار دارند. از آنجاکه یکی از راه‌های موثر برای حفر حداکثر تعداد چال در هر ساعت، افزایش سرعت نفوذ سرتمه است، بنابراین در این تحقیق تصمیم گرفته شد سرعت نفوذ سرتمه در دو دستگاه حفاری چرخشی معدن بررسی شود.

برای استفاده بهینه از طول عمر مفید سرتمه، در ابتدا لازم بود عوامل موثر مربوط به سنگ و دستگاه حفاری که بر سرعت نفوذ سرتمه تاثیرگذار بودند، شناسایی می‌شدند. برای

متر چال حفاری، سرتمه‌های دو دستگاه تعویض نشدند و مقاومت فشاری تک محوره و درصد سیلیس سنگ‌های حفاری شده، به عنوان دو عامل تاثیرگذار بر سایش سرتمه [۱۶،۸،۱۸] بر اساس سیستم طبقه‌بندی شاخص قابلیت حفاری سنگ (RDI) به ترتیب در طبقه متوسط و ضعیف تا متوسط قرار داشتند [۱۶،۱۲]، از تاثیر این عامل بر سرعت نفوذ سرتمه صرف نظر شد. همچنین از آنجا که قطرهای ۹۱ چال حفر شده یکسان بودند، تاثیر این عامل نیز در نظر گرفته نشد. با توجه به مطالب بالا می‌توان شکل ساده مدل ایجاد شده با حداقل شاخص‌های موثر را که دقت و کارایی آن برای پیش‌بینی نرخ نفوذ سرتمه حفاری در حد و اندازه‌های یک مدل هوش مصنوعی است و می‌تواند جنبه عملیاتی پیدا کند از مزایای این تحقیق به‌شمار می‌رود.

مقادیر مربوط به شاخص‌های دستگاهی مورد نظر این تحقیق توسط ابزار تعبیه شده از طرف کارخانه سازنده در ماشین‌های حفاری به ازای هر یک دقیقه، در طول مدت زمان حفر هر یک از ۹۱ چال به وسیله اپراتور دستگاه ثبت شدند. سپس با گرفتن میانگین مقادیر ثبت شده در طول حفر هر چال، مقادیر مربوط به هر شاخص مشخص شد. مقادیر مربوط به خواص فیزیکی و ژئومکانیکی سنگ‌های هر بلوک انفجاری نیز بر اساس اطلاعات واحد زمین‌شناسی و ژئوتکتونیک معدن تعیین شدند. بعد از برداشت و پالایش داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از ابزار آنالیز حساسیت به روش میدان کسینوسی (CAM)، میزان حساسیت معیارهای دستگاهی و مکانیک سنگی در نظر گرفته شده بر سرعت حفاری مشخص شد [۱۹،۱۸]. سپس با ابزار رگرسیون غیرخطی چندمتغیره، شبکه عصبی مصنوعی و منطق استنتاج فازی، مدل‌هایی برای پیش‌بینی سرعت نفوذ سرتمه ایجاد شد. در نهایت با اعتبارسنجی هر یک از مدل‌ها توسط ۱۲ داده آزمایش، بهترین مدل برای پیش‌بینی تعیین شد.

۲- اطلاعات تحقیق مربوط به معدن

با توجه به شرایط پیچیده کانی‌سازی رخ داده طی دوران‌های زمین‌شناسی در منطقه سرچشمه رفسنجان، ساختار زمین‌شناسی و لیتولوژی محدوده پیت معدن مس سرچشمه شامل توده سنگ‌های آندزیت، گرانودیوریت، سرچشمه پورفیری، کوارتزهای چشمی و لیت‌فین پورفیری با خواص فیزیکی و ژئومکانیکی متفاوت است که توده‌های

جدول ۱: مشخصات چال‌های حفاری شده، خواص سنگ‌ها در بلوک‌های انفجاری و مقادیر پارامترهای دستگاهی مورد استفاده‌ی تحقیق

ردیف	شاخص‌ها	نماد	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
۱	دانسیته سنگ	γ	تن بر متر مکعب	۲٫۵	۲٫۷	۲٫۶	۰٫۰۷
۲	مقاومت فشاری تک محوره	UCS	مگاپاسکال	۳۱	۷۸	۵۴٫۳	۱۱٫۴
۳	شاخص مقاومت زمین‌شناسی	GSI	-	۳۷٫۶	۷۱	۵۰٫۳	۱۲٫۲
۴	سیلیس	Si	درصد	۴۷	۷۵	۵۴٫۷۸	۶٫۶
۵	ارتفاع چال	L	متر	۱۲٫۴	۲۰٫۳	۱۴٫۳	۱٫۰۱
۶	قطر چال	D	میلیمتر	۲۵۱	۲۵۱	-	-
۷	زمان حفر هر چال	t	دقیقه	۶	۲۴	۱۱٫۹	۳٫۳
۸	فشار بار پشت سرتمه	Th	مگاپاسکال	۱۰٫۲	۲۸٫۳	۲۱٫۱	۳٫۵
۹	سرعت چرخش سرتمه	RPM	دور بر دقیقه	۶۸٫۳	۹۸٫۳	۸۵٫۶	۷٫۴
۱۰	فشار هوای سیال حفاری	Pa	مگاپاسکال	۰٫۴	۰٫۵	۰٫۴۴	۰٫۰۲
۱۱	سرعت نفوذ سرتمه	PR	متر بر دقیقه	۰٫۷۷	۲٫۱	۱٫۲۶	۰٫۲۳

رابطه خطی قوی بین شاخص‌های ورودی با شاخص هدف، از شاخص‌های آماری حاصل از انجام رگرسیون خطی چند متغیره و آنالیز حساسیت استفاده شد.

۳-۱-۱- آنالیز حساسیت و رگرسیون چندمتغیره

برای تعیین میزان حساسیت شاخص تاثیرپذیر نسبت به تغییرات عوامل تاثیرگذار، روش‌های زیادی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، روش میدان کسینوسی است. در این روش یک فضای m بعدی که حاوی m عامل تاثیرگذار یا ورودی است، فرض می‌شود (رابطه ۱). هر عامل ورودی مانند X به‌وسیله یک بردار طول با مختصات مشخص به شاخص تاثیرپذیر یا هدف متصل می‌شود (رابطه ۲). سپس میزان تاثیر هر کدام از شاخص‌های ورودی X بر روی شاخص هدف از رابطه ۳ تعیین می‌شود.

$$X = X_1, X_2, X_3, \dots, X_m \quad (1)$$

$$X_i = X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{im} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m X_{ik} \cdot X_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m X_{ik}^2 \cdot \sum_{k=1}^m X_{jk}^2}} \quad (3)$$

که در این روابط:

i, j, k : به ترتیب شماره‌ی تعداد شاخص ورودی در هر سری داده، شاخص یا عامل خروجی مربوط به هر سری داده و

جدول ۲: مشخصات فنی دستگاه حفاری چرخشی (OMZ)

شاخص‌های طراحی	واحد شاخص	میزان شاخص
قطر اسمی سرتمه	میلیمتر	۲۷۰؛ ۲۵۰
ماکزیمم عمق حفاری عمودی	متر	۲۸٫۵
ماکزیمم عمق یک لوله حفاری	متر	۱۹٫۵
قطر لوله مته	میلیمتر	۲۰۳
زاویه انحراف دکل نسبت به محور چال	درجه	۳۰؛ ۱۵؛ ۰
سرعت چرخشی اسمی سرتمه	دور بر دقیقه	۱۱۲
گشتاور اسمی مکانیزم چرخش	کیلونیوتن در متر	۸
فشار هوا در سیستم هوارسانی	مگاپاسکال	۰٫۷۸۵
ولتاژ تامین شده	ولت	۶۳۰۰

این منظور بعد از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، با استفاده از ابزار آنالیز حساسیت، میزان اثرگذاری تغییرات شاخص‌های در نظر گرفته شده مربوط به سنگ بلوک‌های مورد حفاری بر نرخ نفوذ سرتمه مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳-۱-۱- جمع‌آوری داده‌ها و آنالیز حساسیت

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از ۹۱ چال حفر شده مربوط به ۲۸ بلوک انفجاری واقع در ۹ پله از سطوح استخراجی معدن برداشت شدند. داده‌های جمع‌آوری شده پس از پالایش با ابزار خوشه‌بندی^۲، به‌روش میانگین K به ۶۰ سری داده کاهش یافتند. سپس برای تعیین میزان شدت و چگونگی تاثیرگذاری شاخص‌های در نظر گرفته شده بر نرخ نفوذ سرتمه و همچنین عدم وجود

تعداد سری داده جمع آوری شده است.

هرچه میزان تاثیر شاخص ورودی بر شاخص هدف بیش تر باشد، r_{ij}^2 به عدد یک نزدیک تر می شود. در صورت عدم تاثیر، مقدار r_{ij}^2 صفر است. به طور معمول، میزان r_{ij}^2 بالای ۰٫۹ نشان از تاثیر قابل توجه متغیر تاثیرگذار بر متغیر تاثیرپذیر دارد و مقادیر زیر ۰٫۸، بیانگر تاثیر ضعیف متغیر مستقل بر وابسته است [۲۰-۲۲].

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت انجام شده با روش میدان کسینوسی در جدول ۳ نشان داده شده است. مقادیر درج شده در این جدول، مشخص کرد تغییرات تمامی شاخص های تاثیرگذار در نظر گرفته شده بر نرخ نفوذ سرمته در این تحقیق، از درجه اهمیت بالایی برخوردار هستند. بنابراین می توان نتیجه گرفت، مدل هایی که با این شاخص ها ایجاد خواهند شد، با دقت خوبی قابلیت پیش بینی نرخ نفوذ سرمته در معدن را دارند.

در ادامه برای تجزیه و تحلیل شدت تاثیرگذاری تغییرات متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته و بررسی امکان وجود یک

رابطه خطی قوی بین آنها، از شاخص های آماری حاصل از انجام رگرسیون خطی استفاده شد. برای انجام این فرایند، بعد از وارد کردن ۶۰ سری داده پالایش شده در نرم افزار SPSS با استفاده از روش وارد کردن هم زمان داده ها، شاخص های آماری و ماتریس همبستگی محاسبه شد که به ترتیب در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است. هم چنین برای تحلیل بهتر وجود یا عدم وجود رابطه خطی قوی بین متغیرهای تاثیرگذار با متغیر تاثیرپذیر، نمودارهای همبستگی به طور جداگانه رسم شدند. نتایج حاصل از رسم نمودارها در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که در جدول ۴ ملاحظه می شود، به دلیل اینکه مقادیر مربوط به آماره های هم خطی شامل، ضریب تورم

جدول ۳: نتایج آنالیز حساسیت حاصل از روش میدان کسینوسی

متغیر	Si	UCS	RPM	Th	Pa	GSI	γ
r_{ij}^2	۰٫۹۷	۰٫۹۵	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۶	۰٫۹۸

جدول ۴: شاخص های آماری حاصل از انجام رگرسیون خطی چند متغیره

شاخص ها	ضرایب استاندارد شده	آزمون (t)	سطح معنی دار آزمون (t)	همبستگی جزئی	آماره هم خطی	
					تولرانس	ضریب تورم واریانس
Constant	-	۰٫۱۵۶	۰٫۸۷۶	-	-	-
Si	-۰٫۲۳۷	-۲٫۵۳۴	۰٫۰۱۴	-۰٫۳۳۲	۰٫۶۴	۱٫۵۶۲
UCS	-۱٫۱۰۵	-۶٫۳۳۷	۰٫۰۰۰۱	-۰٫۶۶	۰٫۱۸۴	۵٫۴۳۴
Pa	۰٫۱۴۹	۱٫۷۸۳	۰٫۰۰۸	۰٫۲۴	۰٫۸	۱٫۲۵۱
Th	۰٫۳۱۲	۳٫۷۷۸	۰٫۰۰۰۱	۰٫۴۶۴	۰٫۸۲	۱٫۲۲
RPM	۰٫۱۶۳	۱٫۷۸۴	۰٫۰۰۸	۰٫۲۴	۰٫۶۶۸	۱٫۴۹۷
GSI	۰٫۵۲۱	۲٫۵۸۷	۰٫۰۱۳	۰٫۳۳۸	۰٫۱۳۸	۷٫۲۴۲
γ	۰٫۰۴۱	۰٫۳۴۲	۰٫۷۳۴	۰٫۰۴۷	۰٫۳۸۴	۲٫۶۰۴

جدول ۵: ماتریس همبستگی بین متغیرهای مستقل با متغیر وابسته حاصل از رگرسیون خطی چند متغیره

متغیرها	Si	UCS	RPM	GSI	Th	γ	Pa	PR
PR	-۰٫۳۹۶	-۰٫۵۳۷	۰٫۱۸۹	-۰٫۲۷۴	۰٫۱۰۴	-۰٫۰۲۵	۰٫۴۲	۱
Pa	-۰٫۲۷	-۰٫۱۲۸	۰٫۳۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۴۱	-۰٫۱۸۴	۱	
γ	۰٫۳۵۴	-۰٫۴۰۷	-۰٫۴۷۱	-۰٫۶۹۴	۰٫۰۳۳	۱		
Th	-۰٫۱۳۹	۰٫۳۰۸	-۰٫۰۶۸	۰٫۱۹۶	۱			
GSI	-۰٫۳۳۵	۰٫۸۵	۰٫۱۷۲	۱				
RPM	-۰٫۰۰۶	۰٫۰۶۳	۱					
UCS	-۰٫۰۷۸	۱						
Si	۱							

جدول ۶: مقادیر ضریب تعیین و میانگین مربعات خطا حاصل از مدل سازی های رگرسیونی غیرخطی چندمتغیره

مدل	ضریب تعیین	میانگین مربعات خطا
چند جمله ای درجه دوم	۰٫۷۵۵	۰٫۰۱۷
توانی	۰٫۶۵۹	۰٫۰۲۴
نمایی	۰٫۷۱۲	۰٫۰۲

مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری شده، رسم شد (شکل ۲). با توجه به آماره ها در جدول ۶ و ضرایب همبستگی به دست آمده در شکل ۲، مشخص شد که مدل چندجمله ایی درجه دوم نسبت به دو مدل غیرخطی دیگر از دقت بالاتری برای پیش بینی نرخ نفوذ سرمته حفاری چرخشی در معدن مورد مطالعه برخوردار است.

$$PR = (10.143(Pa) - 4.4)^2 + (-0.41(\gamma) + 1.29)^2 + (0.02(Th) + 0.56)^2 + (-0.004(GSI) - 0.01)^2 + (-0.04(Si) + 2.16)^2 + (-0.02(UCS) + 1.5)^2 + ((-9.03E - 6)RPM + (-7.7E - 6))^2 \quad (4)$$

$$PR = (-0.43(Pa)^{-1.01}) + (0.33(\gamma)^{-0.37}) + (0.54(Th)^{0.36}) + (0.33(GSI)^{0.4}) + (0.23(RPM)^{0.27}) + (1.16(Si)^{-0.24}) + (-0.28(UCS)^{0.54}) \quad (5)$$

$$PR = ((1.2E - 19)e^{86.6Pa}) + (6.03(e^{-0.07\gamma})) + (11.8(e^{0.002Th})) + ((2.2E - 7)e^{0.2GSI}) + (8.59(e^{(3.7E-4)RPM})) + (-3.42(e^{0.002Si})) + (-20.1(e^{0.001UCS})) \quad (6)$$

که در این روابط:

PR: سرعت نفوذ سرمته حفاری بر حسب متر در دقیقه

Pa: فشار سیال حفاری بر حسب مگاپاسکال

RPM: سرعت چرخش سرمته بر حسب دور بر دقیقه

Th: فشار پشت سرمته بر حسب مگاپاسکال

GSI: شاخص مقاومت زمین شناسی

UCS: مقاومت فشاری تک محوره بر حسب مگاپاسکال

γ : دانسیته بر حسب تن بر متر مکعب

Si: درصد سیلیس یا محتوای کوارتز سنگ است.

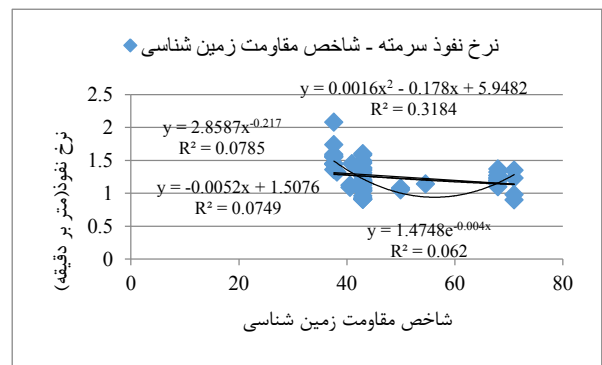
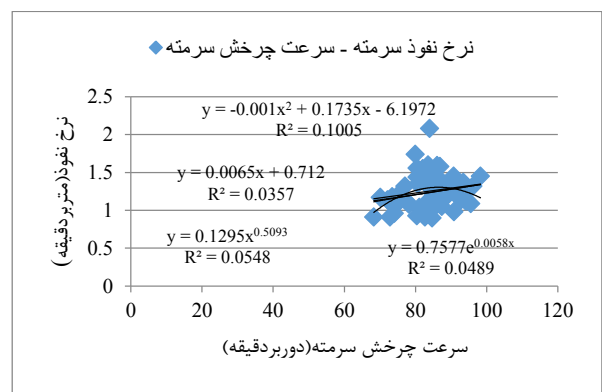
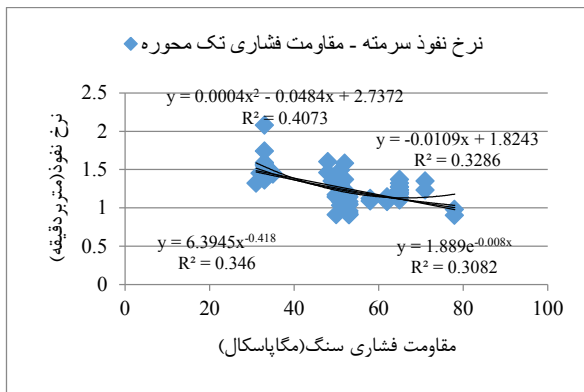
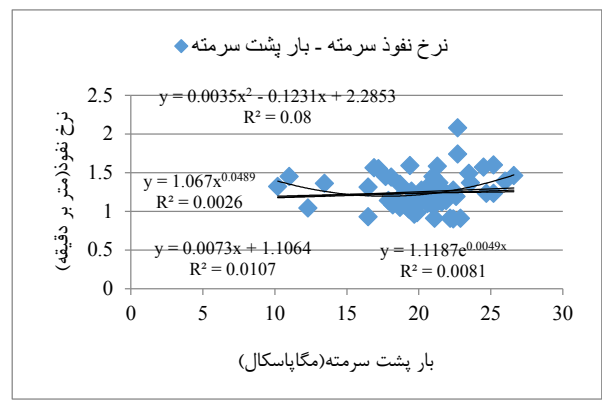
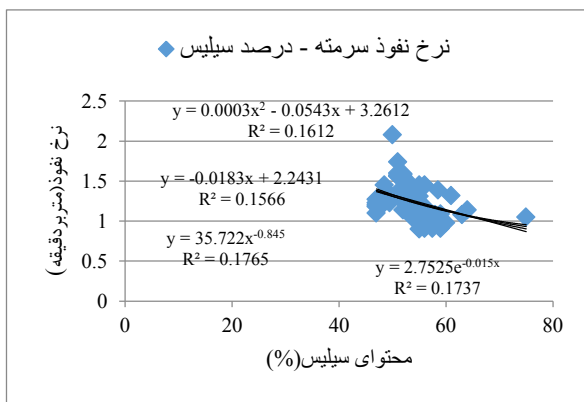
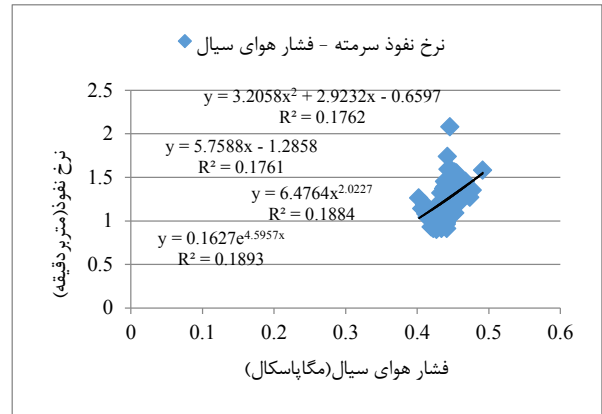
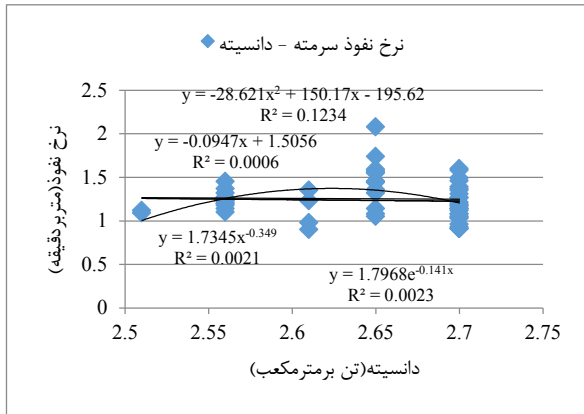
واریانس^۵ (VIF) و تولرانس^۶ به ترتیب کمتر از ۱۰ و بیشتر از ۰٫۱ است، هم خطی بودن بین متغیرهای مستقل از احتمال پایداری برخوردار است. همچنین کم بودن مقادیر همبستگی جزئی^۷ و سطح معنی دار t بین هریک از متغیرهای مستقل با متغیر وابسته، دلالت بر پایین بودن احتمال یک رابطه خطی قوی بین آنها دارد [۲۲، ۲۱]. ضرایب همبستگی به دست آمده در جدول ۵ نیز نشان می دهد بین اکثر متغیرهای مستقل با یکدیگر و با متغیر وابسته، رابطه خطی قوی وجود ندارد. این مساله در ضرایب تعیین به دست آمده از رسم نمودارهای همبستگی خطی بین شاخص های تاثیرگذار و شاخص تاثیرپذیر نیز مشخص است. نکته قابل توجه در نمودارهای همبستگی رسم شده این است که، با مقایسه بین ضرایب تعیین به دست آمده در هر یک از نمودارها، بهترین رابطه بین هر یک از متغیرهای مستقل با متغیر وابسته رابطه غیرخطی چند جمله ایی درجه دوم است (شکل ۱).

در نهایت از مقادیر استاندارد شده به دست آمده برای هر یک از معیارهای مستقل (جدول ۴) مشخص شد که به ترتیب مقاومت فشاری تک محوره، شاخص مقاومت زمین شناسی، بارپشت سرمته، درصد سیلیس، فشار سیال حفاری، سرعت چرخش سرمته و دانسیته بیشترین تاثیر را بر سرعت نفوذ سرمته دارند که از این طبقه بندی هنگام مدل سازی با منطق استنتاج فازی در مرحله نوشتن قوانین استنتاجی استفاده شد.

۳-۲- مدل سازی رگرسیون غیرخطی

با توجه به نتایج به دست آمده از فرایند رگرسیون خطی و مشخص شدن وجود رابطه غیرخطی بین شاخص های تاثیرگذار و تاثیرپذیر، در این مرحله ابتدا از بین ۶۰ سری داده پالایش شده، به طور تصادفی تعداد ۱۲ و ۳ سری داده به ترتیب برای آزمایش مدل های ایجاد شده و اعتبارسنجی مدل عصبی، انتخاب و با ۴۵ سری داده باقی مانده، سه مدل رگرسیونی غیرخطی چندمتغیره توانی، نمایی و چند جمله ایی درجه دوم با نرم افزار SPSS ایجاد شد (روابط ۴ الی ۶). نتایج مربوط به ضریب تعیین (R^2) و میانگین مربعات خطا^۸ حاصل از این مدل سازی در جدول ۶ ارایه شده است.

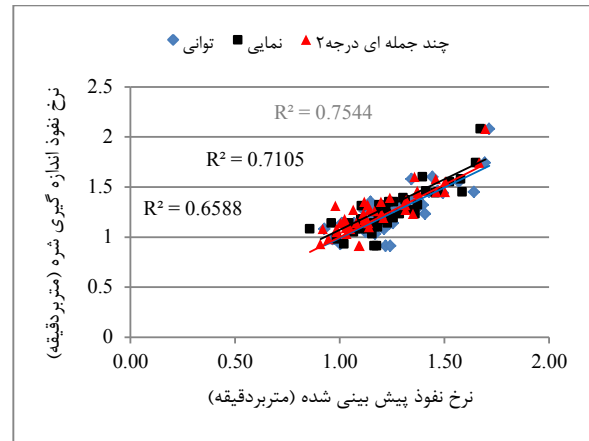
در ادامه برای بررسی دقت مدل های ایجاد شده ابتدا با استفاده از رابطه مربوط به هر مدل، مقادیر نرخ نفوذ سرمته برای ۴۵ سری داده، پیش بینی و سپس نمودار همبستگی بین



شکل ۱: نمودارهای همبستگی بین هر یک از شاخص‌های تأثیرگذار با سرعت نفوذ سرمته حفاری

تابع عضویت فازی تعریف شده برای هر متغیر، در جدول ۷ نشان داده شده است.

برای شاخص‌های دانسیته سنگ و فشار سیال حفاری، به دلیل کم بودن اختلاف بین مقادیر حداقل و حداکثر مربوط به آنها در ۴۵ سری داده آموزش، نوع تابع عضویت فازی ترکیبی از دوزنقه و مثلث در نظر گرفته شد. به طوری که نوع تابع عضویت برای سطوح کیفی کم و زیاد، دوزنقه و برای سطح متوسط، مثلثی در نظر گرفته شد. در شکل ۳، توابع عضویت تعریف شده مربوط به هر یک از شاخص‌ها برای مدل سازی ارایه شده است. باتوجه به سطوح کیفی در نظر گرفته شده برای هر یک از شاخص‌ها، در مجموع تعداد ۲۸۱۲۵ گزاره "اگر-آنگاه" به صورت ترکیب عطفی اشتراک، قابل نوشته شدن بود که بخش زیادی از آنها به دلایل منطقی و عملیاتی قابلیت اجرایی نداشتند. به عنوان نمونه، زمانی که فشار بار پشت سرمته در سطح کیفی زیاد یا خیلی زیاد قرار داشته باشد، سرعت چرخش سرمته حفاری به دلیل اینکه با فشار بار پشت سرمته رابطه عکس دارد، نباید در سطح کیفی زیاد یا خیلی زیاد قرار بگیرد [۲۵]؛ زیرا در چنین شرایطی هنگام حفاری چال، ریسک آسیب دیدن رشته لوله‌های حفاری و سرمته به شدت افزایش خواهد یافت. هم چنین شرایط شکل گیری توده سنگ‌ها در دوران‌های مختلف زمین‌شناسی به نحوی است که برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها به طور ذاتی در ارتباط با یکدیگر هستند. اما این مساله الزاماً به معنای وجود یک رابطه خطی بین آنها نیست. به عنوان مثال وقتی که توده سنگ از نظر شاخص مقاومت زمین‌شناسی در رده خوب یا خیلی خوب طبقه بندی می‌شود، مقاومت فشاری چنین سنگی نمی‌تواند در طبقه ضعیف یا خیلی ضعیف از نظر رده بندی مهندسی سنگ قرار گیرد. زیرا بین این دو ویژگی همواره روابط غیرخطی قوی وجود دارد [۲۶]؛ و یا با بالا بودن درصد محتوای کوارتز سنگ، مقاومت فشاری آن نمی‌تواند پایین باشد و همواره یک رابطه غیرخطی بین آنها وجود دارد [۲۷]. بنابراین، با در نظر گرفتن این شرایط، برای مدل سازی انجام شده در این تحقیق، ۱۹۸۹



شکل ۲: نمودار همبستگی بین مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده نرخ نفوذ سرمته توسط مدل‌های رگرسیونی غیرخطی

۳-۳- مدل سازی با استفاده از منطق استنتاج فازی و شبکه عصبی

باتوجه به مقادیر تقریباً پایین ضرایب تعیین به دست آمده از انجام رگرسیون غیرخطی چندمتغیره، برای دسترسی به مدل‌های پیش‌بینی کننده با دقت بیشتر، از ابزار منطق استنتاج فازی و شبکه عصبی تحت نرم افزار MATLAB نیز در این تحقیق استفاده شد. در دومین مرحله از مدل سازی ابتدا با استفاده از منطق استنتاج فازی و روش میدانی با تابع غیرفازی سازی، گرانی گاه یک مدل پیش‌بینی کننده ساخته شد. در این مدل برای فازی سازی متغیرهای مستقل با توجه به اختلاف بین مقادیر حداقل و حداکثر شاخص‌ها (جدول ۱)، متغیرهای دانسیته و فشار سیال حفاری به سه سطح کیفی کم، متوسط و زیاد و سرعت نفوذ سرمته و دیگر متغیرهای مستقل به پنج سطح خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم بندی شدند. هدف از این سطح بندی علی‌رغم افزایش تعداد قوانین استنتاجی، بررسی دقیق تر تغییرات هر یک از عوامل تاثیر گذار در پیش‌بینی نرخ نفوذ سرمته بود. دامنه‌های در نظر گرفته شده برای تمامی شاخص‌های این تحقیق و نوع

جدول ۷: محدوده تغییرات مربوط به پارامترها در مدل سازی با استنتاج فازی

نوع متغیر	ورودی						
	RPM	Th	Pa	UCS	Si	γ	GSI
متغیر							
دامنه تغییرات	(۶۸,۳-۹۸,۳)	(۱۰,۲-۲۸,۳)	(۰,۴-۰,۵)	(۳۱-۷۸)	(۴۷-۷۵)	(۲,۵-۲,۷)	(۳۷,۶-۷۱)
خروجی	PR						
	(۰,۷۷-۲,۱)						

تک‌محوره کم باشد، "آنگاه" سرعت نفوذ سرمته متوسط خواهد بود.

- "اگر" فشار هوا متوسط و دانسیته متوسط و فشار پشت سرمته متوسط و شاخص مقاومت زمین‌شناسی خیلی کم و سرعت چرخش سرمته متوسط و درصد سیلیس زیاد و مقاومت فشاری تک‌محوره خیلی کم باشد، "آنگاه" سرعت نفوذ سرمته خیلی زیاد خواهد بود.

- "اگر" فشار هوا زیاد و دانسیته کم و فشار پشت سرمته متوسط و شاخص مقاومت زمین‌شناسی کم و سرعت چرخش سرمته خیلی زیاد و درصد سیلیس کم و مقاومت فشاری تک‌محوره متوسط باشد، "آنگاه" سرعت نفوذ سرمته زیاد است.

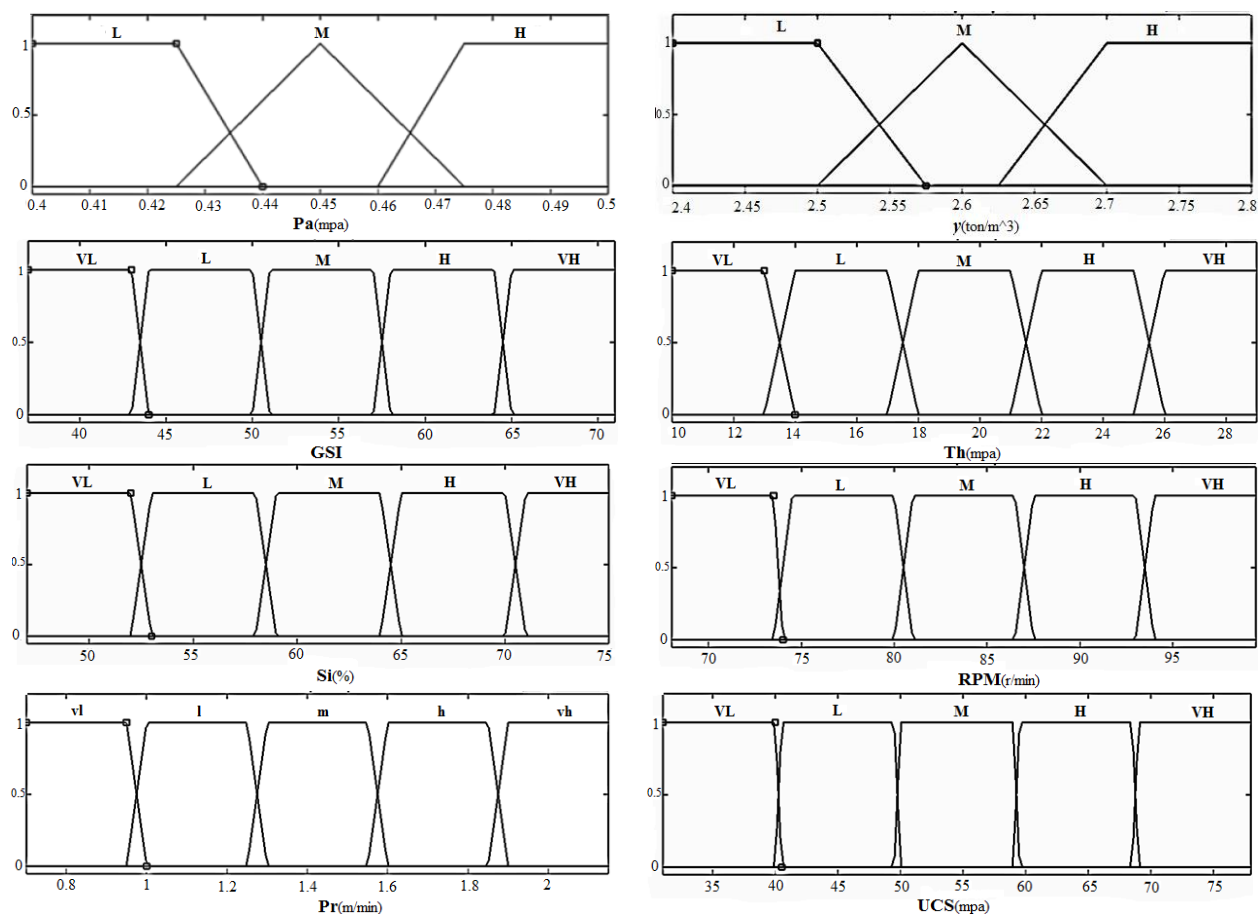
در سومین مرحله از مدل‌سازی برای پیش‌بینی سرعت نفوذ سرمته از ابزار شبکه عصبی استفاده شد که هدف آن احتمال دسترسی به یک مدل با دقت پیش‌بینی بالاتر بود. برای این منظور از ۴۵ سری داده‌ای که در مراحل مدل‌سازی

گزاره به‌صورت "اگر- آنگاه" براساس نظر خبره نوشته شد. چند نمونه از این گزاره‌ها در ادامه بیان شده است:

- "اگر" فشار هوا کم و دانسیته زیاد و فشار پشت سرمته خیلی زیاد و شاخص مقاومت زمین‌شناسی کم و سرعت چرخش سرمته خیلی کم و درصد سیلیس متوسط و مقاومت فشاری تک‌محوره کم باشد "آنگاه" سرعت نفوذ سرمته کم خواهد بود.

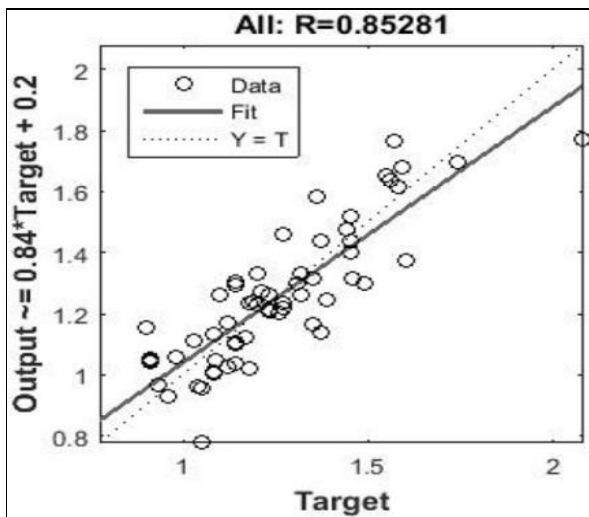
- "اگر" فشار هوا کم و دانسیته زیاد و فشار پشت سرمته خیلی زیاد و شاخص مقاومت زمین‌شناسی خیلی زیاد و سرعت چرخش سرمته خیلی کم و درصد سیلیس متوسط و مقاومت فشاری تک‌محوره خیلی زیاد باشد، "آنگاه" سرعت نفوذ سرمته خیلی کم است.

- "اگر" فشار هوا متوسط و دانسیته کم و فشار پشت سرمته خیلی زیاد و شاخص مقاومت زمین‌شناسی متوسط و سرعت چرخش سرمته کم و درصد سیلیس متوسط و مقاومت فشاری

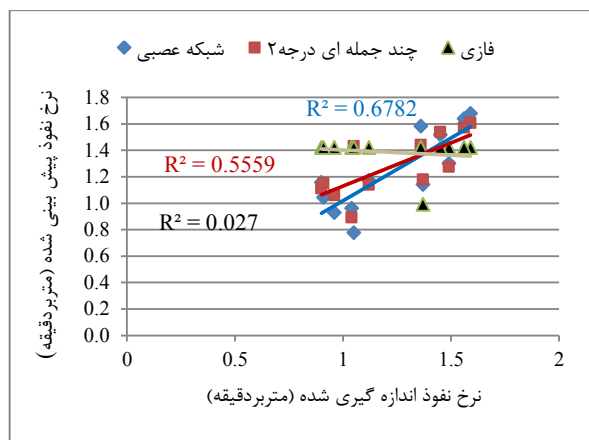


شکل ۳: توابع عضویت تعریف شده برای شاخص‌های ورودی و خروجی در مدل‌سازی با ابزار استنتاج فازی

برای این منظور مقادیر مربوطه هر یک از شاخص‌ها در ۱۲ سری داده‌های مذکور به ترتیب وارد مدل‌های رگرسیونی غیرخطی چندجمله‌ای درجه دوم، فازی و شبکه عصبی شد. سپس مقادیر پیش‌بینی شده توسط هر یک از این مدل‌ها، برای هر سری داده محاسبه و نتایج آن در جدول ۹ ارائه شد. در نهایت برای انتخاب بهترین مدل بین مقادیر پیش‌بینی شده سرعت نفوذ سرمته توسط هر سه مدل و برداشت‌شده هنگام حفر چال‌های انفجاری، نمودارهای همبستگی رسم شد (شکل ۶).



شکل ۵: نمودار همبستگی کلی مربوط به ۶۰ سری داده بعد از ایجاد مدل توسط شبکه عصبی



شکل ۶: نمودار همبستگی بین نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها بر اساس داده‌های آزمایش

با رگرسیون غیرخطی و استنتاج فازی استفاده شده بود، به‌عنوان داده‌های آموزش شبکه و به ترتیب از ۱۲ و ۳ سری داده باقی‌مانده به‌عنوان داده‌های آزمایش و اعتبارسنجی مدل استفاده شد. در این مدل‌سازی علاوه بر ۷ لایه ورودی و یک لایه خروجی، از ۱۰ لایه پنهان نیز استفاده شد.

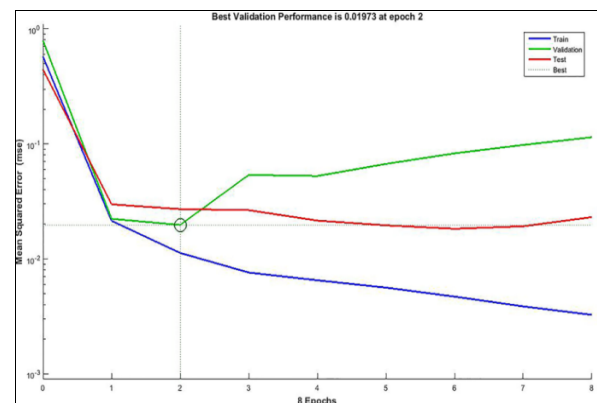
بعد از چندین مرتبه اجرای فرایند آموزش شبکه با توجه به مقادیر مربوطه ضریب همبستگی و میانگین مربعات خطا به‌دست آمده برای بخش‌های آموزش، آزمایش و ارزیابی بهترین مدل از نظر دقت پیش‌بینی ایجاد شد. مقادیر میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی مربوط به آموزش، ارزیابی و آزمایش مدل عصبی در جدول ۸ ارائه شده است. همچنین نمودارهای همگرایی و همبستگی حاصل از این فرایند مدل‌سازی در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

۳-۴- اعتبارسنجی مدل‌ها

برای اعتبارسنجی مدل‌های ایجاد شده و انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی کننده سرعت نفوذ سرمته، ۱۲ سری داده آزمایش که در هنگام ایجاد مدل عصبی به صورت تصادفی از بین ۶۰ سری داده انتخاب شده بودند، استفاده شدند.

جدول ۸: مقادیر مربوطه ضرایب همبستگی و میانگین مربعات خطا حاصل از مدل شبکه عصبی

شاخص‌ها	آموزش	ارزیابی	آزمایش
ضریب همبستگی	۸۷٫۹۵	۹۹٫۱۴	۸۲٫۳۵
میانگین مربعات خطا	۰٫۱۱	۰٫۲۸	۰٫۲۵



شکل ۴: نمودار همگرایی شبکه هنگام رسیدن به جواب نهایی برای داده‌های آموزش، ارزیابی و آزمایش

جدول ۹: مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نرخ نفوذ سرمته با استفاده از مدل‌ها، برای داده‌های آزمایش

ردیف	مقادیر واقعی نرخ نفوذ سرمته (متر بر دقیقه)	مقادیر پیش‌بینی شده نرخ نفوذ سرمته (متر بر دقیقه)	
		استنتاج فازی	رگرسیون غیرخطی چند جمله‌ای درجه دوم
۱	۰٫۹۶	۱٫۴۲	۱٫۰۶
۲	۱٫۴۹	۱٫۴۲	۱٫۲۷
۳	۱٫۵۹	۱٫۴۲	۱٫۶۱
۴	۱٫۳۶	۱٫۴۲	۱٫۴۴
۵	۱٫۵۶	۱٫۴۲	۱٫۵۷
۶	۱٫۰۴	۱٫۴۲	۰٫۸۹
۷	۱٫۱۲	۱٫۴۲	۱٫۱۴
۸	۰٫۹	۱٫۴۲	۱٫۱۱
۹	۰٫۹۱	۱٫۴۲	۱٫۱۵
۱۰	۱٫۳۷	۰٫۹۹	۱٫۱۸
۱۱	۱٫۴۵	۱٫۴۲	۱٫۵۴
۱۲	۱٫۰۵	۱٫۴۲	۱٫۴۳

جدول ۱۰: شاخص‌های ارزیابی مدل‌های ایجاد شده مربوط به داده‌های آزمایش

مدل	MAE	RMSE	MAPE	VAF
استنتاج فازی	۰٫۲۸	۰٫۳۳۱	۲۶٫۵۷	-۳۷٫۹۸
چند جمله‌ای درجه دوم	۰٫۱۴	۰٫۱۷۷	۱۲٫۸۶	۵۳٫۸۷
شبکه عصبی	۰٫۱۴	۰٫۱۶۴	۱۲٫۱۵	۵۷

شده توسط مدل‌های ایجاد شده و براساس داده‌های آزمایش در شکل ۷ رسم شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، مقادیر پیش‌بینی شده سرعت نفوذ سرمته توسط مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیون غیرخطی چندجمله‌ای درجه دوم با مقادیر اندازه‌گیری شده آن هم‌خوانی بیشتری دارد. این درحالی است که از ۱۲ سری داده آزمایش، مقادیر پیش‌بینی شده سرعت نفوذ سرمته توسط مدل فازی برای ۱۱ سری از داده‌ها در یک خط افقی قرار گرفته‌اند که نشان می‌دهد این مدل نتوانسته است تغییرات مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت نفوذ سرمته برای ۱۱ داده آزمایش را براساس مقادیر ثبت‌شده شاخص‌های ورودی به مدل، به‌طور مطلوبی نشان دهد.

همچنین شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد میانگین مطلق خطا (MAPE)، فاکتور واریانس (VAF) و میانگین خطای مطلق (MAE) برای مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به ۱۲ سری داده آزمایش محاسبه شد. نتایج مربوط به این شاخص‌ها در جدول ۱۰ آورده شده است. با توجه به مقادیر مربوط به ضرایب تعیین حاصل از رسم نمودارهای همبستگی و شاخص‌های آماری، مشخص است که مدل شبکه عصبی در مقایسه با مدل رگرسیون غیرخطی چندجمله‌ای درجه دوم با دقت نسبی بیشتری قابلیت پیش‌بینی سرعت نفوذ سرمته را دارد.

این درحالی است که براساس مقادیر شاخص‌های مربوط به دو مدل شبکه عصبی و چندجمله‌ای درجه دوم این مدل‌ها از کارایی به‌نسبت یکسانی برای پیش‌بینی سرعت نفوذ سرمته برخوردار هستند.

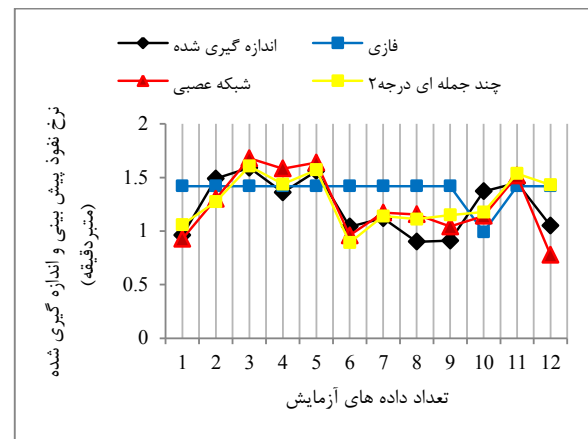
اما مدل استنتاج فازی نسبت به دو مدل دیگر نه تنها دقت کمی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ سرمته برخوردار است، کارایی مطلوب را هم ندارد. مقدار شاخص فاکتور واریانس (VAF) به‌دست آمده در جدول ۱۰ برای این مدل، نشان‌دهنده آن است که پراکندگی داده‌های پیش‌بینی شده توسط این مدل دارای شرایط غیرنرمال بالایی هستند.

نمودار تحلیل حساسیت بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی

تا ۶۰ مگاپاسکال) و مقاوم (۶۱ تا ۸۰ مگاپاسکال) تعریف شد. زیرا ضریب تعیین به دست آمده در نمودار همبستگی غیرخطی درجه دوم رسم شده بین سرعت نفوذ سرمته و مقاومت فشاری نسبت به ضرایب تعیین مربوط به سایر شاخص‌ها از مقدار بیشتری برخوردار بود (شکل ۱). سپس میانگین مقادیر مربوطه تمامی شاخص‌های تاثیرگذار دیگر در هر سه دسته محاسبه گردید. از آنجا که براساس اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده توسط واحد حفاری معدن، میانگین بازده عملیاتی این ماشین‌های حفاری در یک روز کاری (دو شیفت ۸ ساعته)، ۷۳ درصد برآورد شده است و طول چال‌ها در معدن به طور معمول ۱۵ متر می‌باشد. بنابراین با توجه به میانگین قابلیت دسترسی عملیاتی ۷۸ درصد در روز که توسط واحد تعمیرگاه معدن گزارش شده است، طبق محاسبات انجام شده نرخ تولید هر ماشین به ترتیب در بلوک‌های انفجاری حاوی سنگ‌ها با مقاومت ضعیف، متوسط و سخت، ۵۶، ۴۲ و ۴۰ چال در روز خواهد بود (جدول ۱۱).

۴- نتیجه‌گیری

همان‌طور که از قبل اشاره شد، هدف از انجام این تحقیق ارزیابی عملکرد دو دستگاه حفاری چرخشی تازه خریداری شده در معدن مس سرچشمه بود. برای رسیدن به این هدف تصمیم گرفته شد، مدلی تا حد امکان ساده برای پیش‌بینی سرعت نفوذ سرمته به‌عنوان یک شاخص موثر در تعیین نرخ تولید ماشین حفاری ایجاد شود. برای این منظور در مدت شش‌ماه، میزان سرعت نفوذ سرمته هنگام حفاری ۹۱ چال در قالب ۲۸ بلوک انفجاری در توده سنگ‌های با خواص فیزیکی و ژئومکانیکی متفاوت توسط این دو دستگاه اندازه‌گیری شد. برای ایجاد مدل موردنظر، مقادیر مربوطه به ۷ شاخص تاثیرگذار شامل ۳ شاخص دستگاهی و ۴ شاخص فیزیکی و ژئومکانیکی مربوطه به سنگ‌هایی که چال‌های انفجاری در آنها حفر شده بود،



شکل ۷: نمودار تحلیل حساسیت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها برای داده‌های آزمایش

۳-۵- نرخ تولید ماشین حفاری

هدف اصلی تعیین‌شده در این تحقیق، تخمین نرخ تولید دو دستگاه حفاری چرخشی مدل OMZ شرکت زاگرس ماشین در معدن مس سرچشمه، تحت تاثیر معیارهای دستگاهی و خواص فیزیکی و ژئومکانیکی سنگ‌ها بود، از این‌رو مدلهایی برای پیش‌بینی سرعت نفوذ سرمته به‌عنوان یکی از شاخص‌های تعیین‌کننده نرخ تولید ماشین با سه ابزار مدل‌سازی مختلف ایجاد شد. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها با ۱۲ سری داده آزمایش مشخص کرد که دو مدل شبکه عصبی و رگرسیون غیرخطی چندجمله‌ای درجه دوم با اختلاف ناچیز، دقت و کارایی مطلوب را در پیش‌بینی سرعت نفوذ سرمته دارند. در ادامه برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری مورد نظر توسط مدل رگرسیون غیرخطی چندجمله‌ای درجه دوم، ابتدا با استفاده از مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ‌های معدن در ۴۵ سری داده آموزشی برداشت شده، سه نوع سنگ ضعیف (۲۱ تا ۴۰ مگاپاسکال)، متوسط (۴۱

جدول ۱۱: نرخ تولید ماشین حفاری (OMZ) بر اساس سرعت نفوذ سرمته پیش‌بینی شده در سه نوع سنگ مختلف

نوع سنگ	Pa	γ	Th	GSI	RPM	Si	UCS	PR _m *	PR _p **	تعداد چال حفر شده در روز
ضعیف	۰٫۴۵۱۰	۲٫۶۴	۱۷٫۰۹	۳۸٫۱۷	۸۷٫۴۱	۵۳٫۳۶	۳۳	۱٫۵۸	۱٫۵۳	۵۶
متوسط	۰٫۴۴۰۱	۲٫۶۸	۲۱٫۰۷	۴۲٫۸	۸۲٫۳۸	۵۴٫۹۴	۵۱٫۷۵	۱٫۲	۱٫۱۴	۴۲
مقاوم	۰٫۴۴۱۲	۲٫۵۸	۲۱٫۰۱	۶۶٫۴	۸۶٫۰۹	۵۱٫۶۴	۶۶٫۳۶	۱٫۱۹	۱٫۱	۴۰

*: سرعت نفوذ سرمته اندازه‌گیری شده

** : سرعت نفوذ سرمته پیش‌بینی شده

[۵] حسینی، س. ه.، آقابابی، ح.، پوررحیمیان، ی.؛ ۱۳۸۶؛ "بررسی و مدل سازی تأثیر شیب داری درزه ها بر سرعت چالزنی در معادن روباز". فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران، دوره ۱۶، شماره ۶۳، ص ۸۶-۹۲.

[6] Kahraman, S., Bilgin, N., and Feridunoglu, C. (2003). "Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(5): 711-723.

[7] Kahraman, S., Balci, C., Yazici, S., and Bligin, N. (2000). "Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drilling using a new drillability index". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37(5): 729-743.

[8] Kahraman, S. (1999). "Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis". International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 36(7): 981-989.

[9] Yarali, O., and Soyer, E. (2011). "The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability". Scientific Research and Essays, 6(5): 1077-1088.

[10] Yarali, O., and Kahraman, S. (2011). "The drillability assessment of rocks using the different brittleness values". Tunnelling and Underground Space Technology, 26(2): 406-414.

[۱۱] قوبدل، م.؛ ۱۳۹۰؛ "طبقه بندی قابلیت حفاری توده سنگ ها و پیش بینی سرعت حفاری در معدن سنگ آهن گل گهر". پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[12] Hoseini, S. H., Aghababaei, H., and Pourrahimian, Y. (2008). "Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDi)". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(1): 1-10.

[13] Iphar, M., and Goktan, R. M. (2006). "An application of fuzzy sets to the Diggability index rating method for surface mine equipment selection". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43(2): 253-266.

[14] Cheniany, A., Khoshrou, S. H., Shahriar, K., and Hamidi Jafar, KH. (2012). "An estimation of the penetration rate of rotary drills using the specific rock mass drillability index". International Journal of Mining Science and Technology, 22: 187-193.

[15] Xiao, Y., Hurich, CH., and Butt, S. D. (2018). "Assessment of rock-bit interaction and drilling performance using elastic waves propagated by the drilling system". International Journal of Rock Mechanics and Mining

جمع آوری شد. در ابتدا با استفاده از روش میدان کسینوسی و رگرسیون خطی، شدت تاثیرپذیری و میزان تاثیرگذاری ۷ شاخص بر سرعت نفوذ سرمته بررسی شد. در این مرحله مشخص شد که تغییرات تمامی شاخص های در نظر گرفته شده، به شدت بر سرعت نفوذ سرمته تاثیرگذار هستند و بیشترین تغییرات در سرعت نفوذ سرمته، تابع تغییرات مقاومت فشاری تک محوره سنگ است. در ادامه با استفاده از مدل های رگرسیون غیرخطی چندجمله ای درجه دوم، استنتاج فازی و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی سرعت نفوذ سرمته ایجاد شد که نتایج مدل سازی ها و اعتبارسنجی آنها نشان داد که مدل های شبکه عصبی و رگرسیون غیرخطی چندجمله ای درجه دوم با اختلاف خیلی کم نسبت به یکدیگر، کارایی و دقت خوبی در پیش بینی سرعت نفوذ سرمته دارند. اما مدل فازی از کارایی و دقت پایینی برای پیش بینی سرعت نفوذ سرمته برخوردار بود. شاید یکی از دلایل این مساله استفاده از نظر افراد خبره در نوشتن گزاره های "اگر- آنگاه" موتور استنتاج فازی بود. در بخش (۳-۵) این مقاله یکی از کاربردهای عملیاتی مدل غیرخطی درجه دوم برای تخمین نرخ تولید دستگاه در معدن نشان داده شد. از نتایج به دست آمده در این تحقیق می توان برای طراحی و برنامه ریزی و انجام سرمایه گذاری خرید ماشین آلات حفاری مدل (OMZ) مورد نیاز معدن نیز استفاده کرد.

۵- مراجع

- [1] Thuro, K. (1997). "Drillability prediction: Geological influences in hard rock drill and blast tunneling". International Journal of Earth Sciences, 86(2): 426-438.
- [2] Hoseini, S. H., and Ataei, M. (2007). "A review of machine parameters influencing the drilling rate in mines". 7th International Scientific Conference- (SGEM), Conference proceedings, ISBN:954-918181-2, June 11-15.
- [3] Inanloo Arabi Shad, H., Sereshki, F., Ataei, M., and Karamoozian, M. (2018). "Prediction of rotary drilling penetration rate in iron ore oxides using rock engineering system". International Journal of Mining Science and Technology, 28(3): 407-413.
- [4] Ataei, M., KaKaie, R., Ghavidel, M., and Saeidi, O. (2015). "Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock mass drillability index". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 73: 130-138.

regression techniques to predict backbreak in blasting operation". Engineering with Computers, 32: 123-133.

[۲۳] بشلیده، ک.؛ ۱۳۹۱؛ "روش‌های پژوهش و تحلیل آماری". انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۶۵۴ صفحه.

[۲۴] نیرومند، ح. ع.؛ ۱۳۸۴؛ "تحلیل رگرسیون". انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۶۰۴ صفحه.

[۲۵] اصانلو، م.؛ ۱۳۸۶؛ "روش‌های حفاری". نشر صدرا، ویرایش سوم، ۴۹۴ صفحه.

[۲۶] شریف زاده، م.، نورانی، ر.؛ ۱۳۹۰؛ "خواص و رفتار مهندسی سنگ‌ها". ترجمه، مرکز نشر صدا، فصل ۶، ۲۰۴ صفحه.

[۲۷] فاروق حسینی، م.؛ ۱۳۷۶؛ "درآمدی بر مکانیک سنگ". تالیف، مرکز خدمات فرهنگی سالکان، فصل ۳، ۴۵ صفحه.

Sciences, 105: 11-21.

[16] Ataei, M., Mikaeil, R., Hoseinie, S. H., and Hosseini, S. M., (2012). "Fuzzy analytical hierarchy process approach for ranking the sawability of carbonate rock". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 50: 83-93.

[17] Plinninger, R., Spaun, G., and Thuro, K. (2002). "Predicting tool wear in drill and blast". Tunnel & Tunnelling International Magazine, 34: 1-5.

[18] Monjezi, M., Rezaei, M., and Yazdian, A. (2010). "Prediction of backbreak in open-pit blasting using fuzzy set theory". Expert System with Applications, 37(3): 2637-2643.

[19] Yang, Y., and Zang, O. (1997). "A hierarchical analysis for rock engineering using artificial neural networks". Rock Mechanics and Rock Engineering, 30(4): 207-222.

[20] Samareh, H., Khoshrou, S. H., Shahriar, K., Ebadzadeh, M. M., and Eslami, M. (2017). "Optimization of a nonlinear model for predicting the ground vibration using the combinational particle swarm optimization-genetic algorithm". Journal of African Earth Sciences, 133: 36-45.

[21] Khandelwal, M., Armaghani, D. J., Faradonbeh, R.S., Ranjith, P., and Ghoraba, S. (2016). "A new model based on gene expression programming to estimate air flow in a single rock joint". Environmental Earth Sciences, 75: pp. 739. DOI 10.1007/s12665-016-5524-6.

[22] Monjezi, M., Faradonbeh, R. S., and Armaghani, D. J. (2016). "Genetic programing and non-linear multiple

¹ OJSC united plant Machinery Izhorskiye Zavody

² Cosine Amplitude Method

³ Clustering

⁴ k- means

⁵ Variance Inflation Factor (VIF)

⁶ Tolerance

⁷ Correlations partial

⁸ Mean Square Error(MSE)



DOI: 10.30479/jmre.2020.11456.1313

Estimation of Drilling Machine Production Rate Based on Properties of Rock and System Parameters by Prediction of Bit Penetration Speed

Dolati A.¹, Samareh H.^{2*}

1- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran
ali.dolati62@yahoo.com

2- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Baft Branch, Islamic Azad University, Baft, Iran
Samareh@iausirjan.ac.ir

(Received: 26 Aug. 2019, Accepted: 04 Mar. 2020)

Abstract: Drilling a certain number of blast holes per hour plays an important role in reaching the required annual mine production. Since, the proper use of the availability time of machine to drill the maximum number of blast holes is crucial. The drilling rate of blast holes is affected by various factors such as rock properties and system parameters. Thus, recognizing the effectiveness of these factors on the penetration rate of bit (PR), not only machine production can be increased but also drilling and blasting costs can be reduced in the mine. In this study to predict the PR in the selected mine, firstly, parameters of 91 holes related to 28 blasting block and in 9 various extracting benches were collected. Secondly, the sensitivity rate related to each of the independent parameters on the PR was studied using Cosine Amplitude Method (CAM). Finally, three models including non-linear multivariate regression (NLMR), artificial neural network (ANN), and fuzzy logic were produced to predict the PR. These models were validated using 12 series of data tests. It was shown that with a coefficient of determination of 0.68 and mean absolute percentage error (MAPE) of 12.15, the ANN model could predict the PR with a slightly higher precision compared to NLMR.

Keywords: Penetration rates of bit, Fuzzy logic, Artificial neural network, Non-linear multiple regression analysis, Production rate.

INTRODUCTION

The drilling speed of the blasting hole in open-pit mining is directly affected by the physical and geo-mechanical properties of rocks and instrumentation parameters during drilling [1]. That is why knowing how these factors affect the penetration rate of drill bit helps a lot in the production of drilling machines. Many kinds of research have been done by researchers on drilling machines in different mines around the world. Some of these studies have investigated the effect of rock mass discontinuities; physical and mechanical properties of rock; and the use of the drillability index of the rock mass to predict the drilling speed of different machines [2,3].

Many researchers have also conducted research to determine the drillability of rock mass in different



mines. These investigations was done to classify the rocks of mine in terms of drillability, determine the PR to select the drilling equipment for the mine, evaluate the efficiency of the drilling system for recording the seismic waves generated by the machine, and determine the drilling indices for the rock masses in the mine [4-8].

The present study was conducted on two rotary drilling systems of type (OMZ¹) in Sarcheshmeh copper mine. This study aimed at developing a model for predicting the penetration rate of bit (PR) based on the drilling fluid pressure (Pa), bit rotation speed in revolutions per minute (RPM), thrust (Th), Geological Strength Index (GSI), Uniaxial Compressive Strength (UCS), density (γ) and percent of rock silica (Si) to estimate the production rate of the mentioned machines.

The data of the apparatus parameters were first recorded during drilling of 91 holes to conduct the research and the values related to the rock properties of blasting blocks were determined by the section of geological and geotectonic of the mine (Table 1). Then, using clustering tool and K-mean method, a total of 60 data series were determined by refining the collected data. Subsequently, the 45 training data, 12 test data, and 3 validation data were randomly selected for modeling from 60 data sets. Then, using 45 training data provided by the non-linear multiple regression tools, artificial neural network (ANN) and fuzzy logic, models were developed to predict the penetration speed of bit. Finally, the validity of each model by test data shows that the ANN model is more accurate than the quadratic nonlinear regression model to predict the PR.

Table 1. Characteristics of drilling holes, rock properties of blasting block and parameters values of machine

No	Parameter	Index	Unit	Minimum	Maximum	Average	STDEVA
1	Density	γ	ton/m ³	2.5	2.7	2.6	0.07
2	Uniaxial Compressive Strength	UCS	mpa	31	78	54.3	11.4
3	Geological Strength Index	GSI	-	37.6	71	50.3	12.2
4	Silica	Si	%	47	75	54.78	6.6
5	Hole length	L	m	12.4	20.3	14.3	1.01
6	Hole diameter	D	mm	251	251	-	-
7	Time of drill hole	t	min	6	24	11.9	3.3
8	Thrust	Th	mpa	10.2	28.3	21.1	3.5
9	Bit rotation speed	RPM	r/min	68.3	98.3	85.6	7.4
10	Drilling fluid pressure	Pa	mpa	0.4	0.5	0.44	0.02
11	Penetration rate of bit	PR	m/min	0.77	1.2	1.26	0.23

RESEARCH METHOD

In this study, the impact of changes in the parameters affecting PR and the absence of a strong linear relationship between them and PR should be evaluated. For this purpose, the sensitivity analysis was performed using the cosine amplitude method and the proper statistical indices due to multiple linear regressions obtained by SPSS18 software based on sixty refined data sets. The calculated high values of the effect of each of the effective parameters on the significant parameter of more than 0.9 with the sensitivity analysis showed that the penetration intensity of changes related to the parameters selected in PR is very high.

On the other hand, the multivariate linear regression was performed and the values obtained for linear statistics such as Variance Inflation Factor (VIF) less than 10 and tolerances greater than 0.1 were recognized, that the probability of a linear relationship between the effectiveness variables is low. In addition, the low values obtained from the coefficients of partial correlation and the significant level of "t" (sig.t) between each of the variables affecting the PR showed that there is no strong linear correlation between them [9].

The nonlinear regression, fuzzy logic, and artificial neural network models

At this stage, nonlinear regression models such as power, exponential and quadratic polynomial were created using 45 series of training data by SPSS18 software. Coefficient of determination (R^2) of 0.755 and

mean squared error (MSE) of 0.017 related to the quadratic polynomial model showed that this model has a higher accuracy in predicting the penetration rate of bit compared to the other two models in the studied mine (Equation 1).

$$PR = (10.143(Pa) - 4.4)^2 + (-0.41(\gamma) + 1.29)^2 + (0.02(Th) + 0.56)^2 + (-0.004(GSI) - 0.01)^2 + (-0.04(Si) + 2.16)^2 + (-0.02(UCS) + 1.5)^2 + ((-9.03E - 6)RPM + (-7.7E - 6))^2 \quad (1)$$

Where (PR) is the penetration rate of bit in (m / min), (Pa) is the drilling fluid pressure in (mpa), (RPM) is the rotation speed of bit in (r/min), (Th) is the thrust in (mpa), (GSI) is Geological Strength Index, (UCS) is the Uniaxial Compressive Strength in (mpa), (γ) is the density in (ton/m³), and (Si) is the percent of silica. Then, to obtain the more accurate predicted models, the fuzzy logic and ANN tools were used by MATLAB software. At first, the Mamdani method with non-fuzzification gravity function was used to create the fuzzy model. At this stage of modeling, according to Table (1) the variables have changed to fuzzy mode based on the difference between minimum and maximum values related to them. Therefore, the independent variables of density and drilling fluid pressure were divided into three qualitative levels such as, low, medium, and high. Other independent variables along with PR were divided into five levels such as, very low, low, medium, high, and very high. Given the considered qualitative levels for each of the parameters, the 1989 effective propositions "if - then" was written as a collective communication based on the expert opinion from the 28,125 propositions.

Finally, in the third stage of modeling, the ANN tool was used to predict the PR. So, the 45 training data sets and the 12 and 3 residual data sets (out of 60 series of refined data) as test and validation data were respectively used. These data series were used in the modeling process with nonlinear regression and fuzzy logic.

At this stage, the seven input layers, one output layer and ten hidden layers were used. After performing network training process several times, the best model in terms of prediction accuracy was generated with respect to the obtained coefficients of correlation of 87.95, 99.14, 82.35 and the MSE of 0.011, 0.028 and 0.025 for training, validation and testing, respectively. The overall correlation coefficient of 0.85 for all 60 refined data series was of this model.

Validation of models

To this end, the PR values for all 12 data series of test were predicted using fuzzy logic, ANN, and quadratic polynomial regression models. The correlation charts were plotted to select the best predicted model between the predicted values of PR by all three models and measured values during the drilled holes (Figure 1).

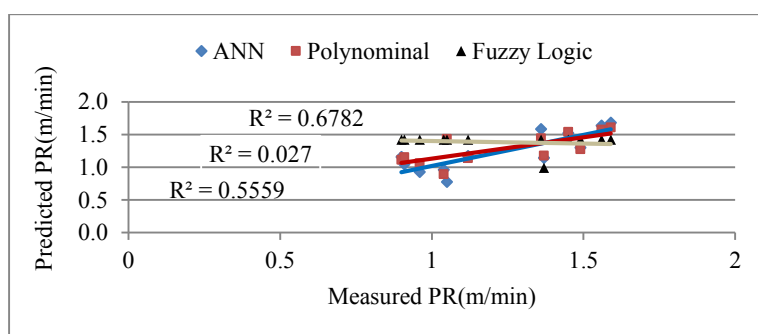


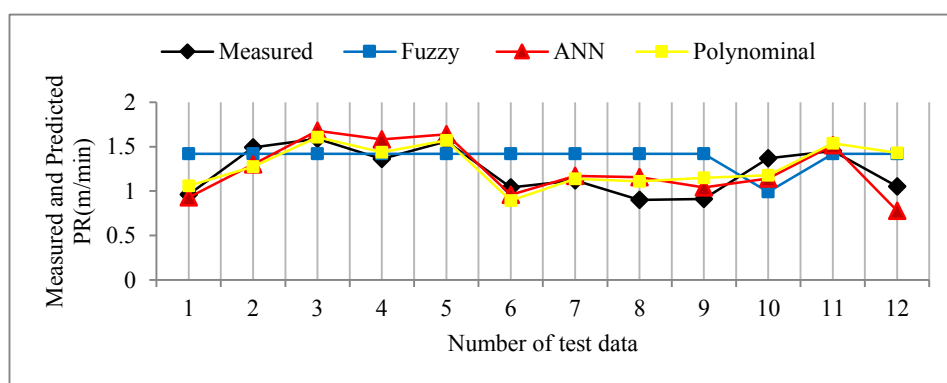
Figure 1. Correlation graph between the measured and predicted penetration rate of bit by models based on test data

Then, the statistical indices of RMSE, MAPE, (VIF), Mean absolute error (MAE) and coefficient of determination (R^2) for the predicted values of these 12 data series were calculated by the models (Table 2).

Table 2. Evaluation indexes comparison of produced models related to test data

Model	VAF	RMSE	MAE	MAPE	R ²
Fuzzy logic	-37.98	0.331	0.28	26.57	0.027
Quadratic polynomial	53.87	0.177	0.14	12.86	0.556
Artificial Neural Network	57	0.164	0.14	12.15	0.678

The coefficients of determination obtained from drawing correlation and sensitivity analysis charts and the statistical indices values were recognized that the ANN model has more accuracy and relative efficiency than the quadratic polynomial regression model to predict the PR (Figure 2).

**Figure 2.** Sensitivity analysis chart between the measured and predicted bit penetration rate by models

However, the fuzzy model has little accuracy in predicting the penetration rate compared to the other two models. This model does not perform well in predicting PR due to the high abnormal conditions caused by the distribution of predicted data.

The production rate of drilling machine

Since the results of validation showed that the quadratic polynomial model has high accuracy and efficiency for predicting PR, therefore, this model was selected to estimate the production rate of the drilling machine (OMZ) which was among the objectives related to this study. Therefore, the first 45 training data series were classified into three classes including: weak, intermediate, and resistant based on the range of changes in their compressive strength. The values of the first mean of all effective parameters were calculated for all three categories. On the other hand, based on the field measurements, the average of the operational efficiency and availability of this drilling machine were calculated to be 73% and 78%, respectively, on each working day. After that, the production rate of the machine in the blasting blocks consisting of low, medium and high strength of rocks was respectively estimated to be 56, 42 and 40 holes of 15 m per day.

CONCLUSION

The validation results of the models showed that the prediction error rate between the ANN and quadratic polynomial model is very low. However, the fuzzy model generated did not have the desirable accuracy and efficiency to predict the PR. Perhaps, one of the reasons for this is the use of the relation of the expert sentence to the writing propositions "if - then" of fuzzy logic motor. Also, the values of standardized coefficients for each of the effective variables resulting from multivariate linear regression analysis showed that the changes in the apparatus parameters compared to the physical and mechanical properties of rock have less effect on the changes in PR. The compressive strength and density of rock had the highest and the lowest impacts, respectively.

REFERENCES

- [1] Hoseini, S. H., and Ataei, M. (2007). "A review of machine parameters influencing the drilling rate in mines". 7th International Scientific Conference -(SGEM), Conference proceedings/ISBN:954-918181-2, June, 11-15.
- [2] Kahraman, S., Bilgin, N., and Feridunoglu, C. (2003). "Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(5): 711-723.
- [3] Inanloo Arabi Shad, H., Sereshki, F., Ataei, M., and Karamoozian, M. (2018). "Prediction of rotary drilling penetration rate in iron ore oxides using rock engineering system". International Journal of Mining Science and Technology, 28(3): 407-413.
- [4] Ataei, M., KaKaie, R., Ghavidel, M., and Saeidi, O. (2015). "Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock mass drillability index". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 73: 130-138.
- [5] Yarali, O., and Soyer, E. (2011). "The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability". Scientific Research and Essays, 6(5): 1077-1088.
- [6] Hoseini, S. H., Aghababaei, H., and Pourrahimian, Y. (2008). "Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDi)". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(1): 1-10.
- [7] Cheniany, A., Khoshrou, S. H., Shahriar, K., and Hamidi Jafar, Kh. (2012). "An estimation of the penetration rate of rotary drills using the specific rock mass drillability index". International Journal of Mining Science and Technology, 22: 187-193.
- [8] Xiao, Y., Hurich, Ch. D., and Butt, S. (2018). "Assessment of rock-bit interaction and drilling performance using elastic waves propagated by the drilling system". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 105: 11-21.
- [9] Samareh, H., Khoshrou, S. H., Shahriar, K., Ebadzadeh, M. M., and Eslami, M. (2017). "Optimization of a nonlinear model for predicting the ground vibration using the combinational particle swarm optimization-genetic algorithm". Journal of African Earth Sciences, 133: 36-45.

¹ Geological Strength Index