



پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین‌های تونل‌بری تمام‌مقطع حفاری (TBM) با استفاده از شبکه‌های عصبی - فازی (مطالعه موردی؛ تونل انتقال آب گلاب)

یاسر مبرا^{۱*}، علیرضا حاجیان^۲، محمدعلی رهگذر^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، اصفهان، ایران،

yasermobarra@yahoo.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی هسته‌ای و علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، اصفهان، ایران، a.hajian@iaun.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده حمل‌ونقل و راه‌آهن، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، mohammadali-rahgozar@yahoo.com

چکیده

ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل، ماشین‌هایی هستند که با اعمال نیروی رانش و دوران کله‌حفار به واسطه دیسک‌های برش‌دهنده، تونل را به صورت یکپارچه و دایره‌ای حفر می‌کنند. امروزه استفاده روزافزون از حمل‌ونقل زمینی و لزوم احداث مسیرهای جدید و تونل‌های طولانی منجر به پیدایش و گسترش ماشین‌های تونل‌بری TBM گردیده است. علیرغم سرمایه‌گذاری اولیه، سرعت و کیفیت بالای حفاری این ماشین‌ها، آن‌ها را قابل رقابت با روش‌های حفاری سنتی کرده است. این ماشین‌ها علاوه بر نرخ پیشروی سریع و ایمنی کار بالا، وسعت زون خسارت‌دیده و دیگر مشکلات مرتبط با روش حفاری آتشی را کاهش می‌دهند. عوامل مختلفی نظیر شرایط زمین‌شناسی، خصوصیات توده‌سنگ، شیب مسیر و همچنین مشخصات ماشین به کار رفته بر میزان کارایی ماشین‌ها تأثیر می‌گذارند. تحلیل کارایی TBM و پژوهش‌های ژئوتکنیکی ساختگاه مبنای بررسی‌های برآورد هزینه و برنامه زمانبندی ساخت هر پروژه تونلی است. یکی از راه‌های پیش‌بینی میزان کارایی این ماشین‌ها، تخمین نرخ‌نفوذ آن‌هاست. استفاده توأم از شبکه‌عصبی و منطق فازی باعث ارتقاء عملکرد شبکه عصبی در تخمین نرخ‌نفوذ می‌گردد که ناشی از نگرش فازی به کمیتهای مربوطه می‌باشد زیرا این کمیتهای بیشتر ماهیت فازی دارند. در واقع ورودی شبکه عصبی- فازی مقاومت فشاری تک‌محوره، شاخص بار نقطه‌ای، نیروی نفوذ هر دیسک، تعداد دور کاترهد در دقیقه و خروجی آن نرخ‌نفوذ ماشین می‌باشد. پس از تجزیه و تحلیل ضریب همبستگی در حدود ۰٫۹۲ بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: نرخ نفوذ، ماشین تونل‌بری، tbm، شبکه‌های عصبی، منطق فازی، تونل گلاب.

۱- مقدمه

کاربرد ماشین‌های تونل‌بری در حفر تونل‌های طولانی به صورت روشی استاندارد، در صنعت تونل مورد توجه قرار گرفته است. انواع مختلف ماشین‌های تونل‌بری برای زمین‌های متفاوت طراحی و ساخته شده است. انتخاب روش مناسب تونل‌سازی و در نتیجه انتخاب ماشین‌آلات متناسب با روشهای فوق منوط به امکان برآورد سرعت حفاری این ماشین‌آلات است. بدیهی است که در حفاری مکانیزه، نرخ‌نفوذ ماشین زمان تکمیل پروژه و به تبع آن هزینه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و نقش اساسی در انتخاب شدن یا نشدن حفر مکانیزه به عنوان روش حفر بازی می‌کند. لذا پیش‌بینی نرخ‌نفوذ بخش مهمی از هر پروژه حفاری مکانیزه است. این ضریب بصورت فاصله حفاری شده تقسیم بر زمان عملیات ماشین در طی یک مرحله حفاری پیوسته تعریف می‌شود و تابعی از پارامترهای سنگ، مشخصات ماشین و اپراتور می‌باشد. تخمین دقیق نرخهای نفوذ برای زمان طرح‌ریزی، کنترل هزینه و انتخاب روش حفاری نیازمند است. محاسبات نرم از اجزای محاسباتی مختلفی مثل شبکه‌های عصبی، تئوری مجموعه‌های فازی، استدلال تقریبی و روش‌های بهینه‌سازی بدون مشتق‌گیری مثل الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی گرم و

سرد کردن تشکیل می‌شود. هر یک از روشهای یادشده دارای نقاط قوت مختص به خود می‌باشد. ترکیب روشهای یاد شده، هسته اصلی محاسبات نرم را تشکیل می‌دهد. این همکاری، محاسبات نرم را قادر به گردآوری دانش انسان به شکل موثر در تقابل با مسائل و محیطهای نادقیق و نامعین می‌سازد. به این ترتیب امکان فراگیری و سازگاری با محیطهای ناشناخته و متغیر با کارایی بالاتری فراهم می‌شود.

تارکوی در سال (۱۹۷۳) مدلی را برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه کرد. مدل تارکوی بر مبنای سختی کل سنگ با استفاده از بازگشت چکش اشمیت و سختی سایشی سنگ می‌باشد:

$$P = 3.716 - 0.019 * H_T \quad (1)$$

$$H_T = H_R * H_A^{0.5} \quad (2)$$

که در این رابطه H_T سختی کل، H_R سختی چکش اشمیت، H_A سختی سایشی و p نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت می‌باشد. این رابطه برای سختی کل ۲ تا ۲۴۲ و نرخ نفوذ ۰.۰۷۶ تا ۳.۷۱۶ متر بر ساعت اعتبار دارد. البته همانند روابط اولیه پیشنهادی برای نرخ نفوذ این رابطه نیز شرایط دستگاه و توده سنگ را نادیده گرفته است [۱].

گراهام (۱۹۷۶) با استفاده از یکی از خصوصیات دستگاه (حداکثر نیروی وارد بر کاتر) و مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، مدلی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ سنگ‌هایی با مقاومت ۱۴۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال یافت:

$$P = 3.94T/6_c \quad (3)$$

در اینجا P بیانگر نرخ نفوذ به میلی‌متر بر دور، T نیروی پیشران وارد بر هر کاتر بر حسب کیلو نیوتن 6_c مقاومت فشاری نمونه سنگ بر حسب مگاپاسکال می‌باشند. این رابطه به صورت زیر نیز آورده شده است:

$$P = 3940F_n/UCS \quad (4)$$

در این رابطه P نرخ نفوذ بر حسب میلی‌متر بر دور، UCS مقاومت فشاری تک‌محوره بر حسب کیلوپاسکال و F_n نیروی پیشران اعمالی بر هر کاتر بر حسب کیلونیوتن می‌باشد. البته این رابطه بدلیل در نظر نگرفتن پارامترهای توده‌سنگ و هندسه ماشین یک رابطه تقریبی است [۲].

کاسینلی در سال (۱۹۸۲) با استفاده از رده‌بندی RSR و داده‌های حاصل از اطلاعات تونلی در ایتالیا که در سنگ‌هایی با مقاومت فشاری ۵۰ تا ۱۵۰ مگاپاسکال حفر گردید بود، نرخ نفوذ را بر حسب متر بر ساعت به صورت زیر تعیین کرد:

$$P = -0.59RSR + 1.59 \quad (5)$$

در اینجا P نرخ نفوذ بر حسب m/h می‌باشد. این رابطه به دلیل این که از پارامترهای ماشین حفاری استفاده نکرده است مدل قابل اعتمادی نمی‌باشد [۳].

نلسون و همکاران (۱۹۹۱)، با تحلیل اطلاعات جمع آوری شده از چهار تونل حفر شده در سنگ‌های رسوبی رابطه‌ای را ارائه کردند که ورودی آن سختی کل و نیروی پیشران وارد بر هر دیسک کاتر و خروجی آن شاخص نفوذ در محل (FPI) می‌باشد [۴].

$$FPI = 5.95 + 0.18 * H_T \quad (6)$$

در این رابطه H_T سختی کل می‌باشد و توسط تارکوی (۱۹۸۶) به صورت زیر تعریف شده است:

$$FPI = F_n(KN)/Penetration(mm/rev) \quad (7)$$

یاگیز (۲۰۰۷) با بررسی داده‌های حاصل از ۷٫۵ کیلومتر حفاری در تونل کویینز واقع در نزدیکی نیویورک مدل خود را ارائه داد. یاگیز برای نمونه سنگ آزمایش‌های BTS و UCS و آزمایش نفوذ سوراخ کننده را بر روی ۱۵۰ نمونه انجام داد. یاگیز پس از بررسی‌های آماری بر روی داده‌ها رابطه زیر را ارائه کرد:

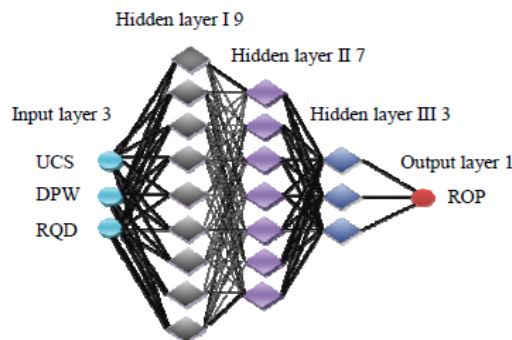
$$ROP(m/h) = 1.093 + 0.29 * PSI - 0.003 * UCS + 0.437 * \log(\alpha) - 0.219 * DPW \quad (8)$$

که در این رابطه PSI نسبت نیروی ماکزیمم به جابه‌جایی در آزمایش نفوذ سوراخ کننده بر حسب kN/mm ، UCS ، مقاومت تک‌محوری نمونه سنگ بر حسب MPa ، α زاویه بین محور تونل و صفحات ضعیف بر حسب درجه و DPW فاصله بین صفحات ضعیف بر حسب متر می‌باشد. برای محاسبه α می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \alpha_f \cdot \sin(\alpha_t - \alpha_s)) \quad (9)$$

در این رابطه α_f و α_s زوایای شیب و راستای برخورد صفحات ضعیف در توده سنگ و α_t زاویه محور تونل هستند [۵].

طیرانی و غلام‌نژاد (۲۰۱۰) نتایج یک مطالعه بر روی کاربرد یک روش شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدلسازی نرخ نفوذ ماشین‌های تونل‌بری ارائه دادند. یک بانک اطلاعاتی، شامل نرخهای نفوذ TBM اندازه‌گیری شده و واقعی، مقاومت فشاری تک محوره، فاصله بین صفحات ضعیف در توده سنگ و کیفیت توده سنگ (RQD) تاسیس شد. داده‌ها از سه پروژه TBM متفاوت (تونل انتقال آب کویینز در آمریکا، تونل انتقال آب تهران-کرج در ایران و پروژه هیدرولیکی کبک دو در اتیوبی) جمع‌آوری شد. یک شبکه عصبی ۵ لایه مطلوب با یک معماری سه نرون در لایه ورودی، ۹، ۷ و ۳ نرون در ابتدا، بترتیب در لایه‌های مخفی دوم و سوم، و یک نرون در لایه خروجی. ضریب همبستگی برای نرخ نفوذ پیش‌بینی شده بوسیله شبکه‌های عصبی ۰٫۹۴ تعیین شد [۶].



شکل ۱: مدل ارائه شده توسط غلام‌نژاد و طیرانی

۲- توصیف منطق فازی

در سال‌های اخیر کاربردهای منطق فازی به شدت در حال گسترش می‌باشد. محدوده این کاربردها از محصولاتی نظیر دوربین‌ها، ماشین‌های لباسشویی و مایکروویوها تا کنترل فرایندهای صنعتی، ساخت ابزارآلات پزشکی، سیستم‌های تصمیم‌گیری و غیره می‌باشد.

منطق فازی (FL) دارای دو معنای متفاوت می‌باشد. در معنای اول - که دارای دید محدودتری است - منطق فازی یک سیستم خطی است که از منطق چند مقداری منتج شده است؛ اما در معنای گسترده‌تر تقریباً مترادف با تئوری مجموعه‌های فازی می‌باشد. تئوری مجموعه‌های فازی با کلاس‌هایی از اشیاء با مرزدهی غیربرجسته در ارتباط است. در این کلاس‌ها عضویت اشیاء در هر یک از کلاس‌ها با مفهومی تحت عنوان درجه‌عضویت توصیف می‌شود.

یک مفهوم اساسی دیگر که نقش کلیدی را در بسیاری از کاربردهای FL ایفاء می‌کند، قاعده if-then فازی و یا به شکل ساده‌تر یک قاعده فازی می‌باشد. اگرچه سیستم‌های قاعده مبناء، دارای پیشینه تاریخی در هوش مصنوعی هستند، اما این سیستم‌ها فاقد سازوکار برای رویارویی با فرض‌ها و نتایج فازی هستند. در منطق فازی، این سازوکار از طریق جبر فازی فراهم شده است.

۲-۱- مجموعه‌های فازی

منطق فازی بر مبنای مفاهیم مجموعه‌های فازی شکل گرفته است. یک مجموعه فازی، یک مجموعه با مرزهای نامشخص می‌باشد. در واقع اعضای آن می‌توانند به صورت جزئی و براساس درجه‌ی عضویت در آن عضویت داشته باشند.

تابع عضویت (MF) منحنی‌ای است که نحوه نگاشت هر نقطه از فضای ورودی را به یک مقدار عضویت (درجه عضویت) بین ۰ و ۱ تعریف می‌کند.

تنها شرطی که تابع عضویت باید ارضاء کند این است که خروجی آن باید بین ۰ و ۱ باشد. این تابع می‌تواند هر منحنی با شکل دلخواه که از ویژگی‌های ساده، سرعت و کارایی برخوردار باشد را در برگیرد.

مجموعه‌های فازی و عملگرهای فازی، موضوع و افعال منطق فازی را شکل می‌دهند. قواعد if-then برای فرموله کردن دستورات شرطی منطق فازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک قاعده if-then ساده در منطق فازی دارای ساختار زیر می‌باشد:

If x is A then y is B

که A و B مقادیر تعیین شده در مجموعه فازی با برد X و Y (مجموعه‌های مادر) می‌باشند. "x is A" تحت عنوان فرض "y is B" تحت عنوان نتیجه شناخته می‌شوند.

۲-۲- سیستم‌های استنتاج فازی

استنتاج فازی فرایندی است که طی آن نگاشت از ورودی‌ها به خروجی‌ها با استفاده از منطق فازی ضابطه‌مند می‌گردد. با توجه به نگاشت انجام شده یک تصمیم اتخاذ شده، و یا یک الگو تشخیص داده می‌شود.

فرایند استنتاج فازی از ۵ بخش تشکیل می‌شود؛ فازی‌سازی متغیرهای ورودی، اعمال عملگرهای منطقی (AND یا OR) در قسمت فرض، دلالت فرض بر نتیجه، تجمیع نتایج و در نهایت غیرفازی کردن خروجی.

۲-۳- یادگیری مدل و استنتاج از طریق ANFIS

یادگیری عصبی- انطباقی دارای عملگر دی مشابه با شبکه های عصبی می باشد. تکنیک های یادگیری عصبی- انطباقی، روشی را برای ایجاد یک رویه مدل سازی فازی در راستای یادگیری اطلاعات از یک مجموعه داده فراهم می آورند. جعبه ی ابزار منطق فازی پارامترهای تابع عضویت را طوری محاسبه می کند که سیستم استنتاج فازی بر مجموعه داده های ورودی/خروجی منطبق گردد. در این راستا از تابع *anfis* استفاده می شود.

ANFIS یک واژه اختصاری است که از حروف اول *Adaptive Neuro- Fuzzy Inference System* ساخته شده است. ANFIS به کمک مجموعه ای از داده های ورودی/خروجی، یک سیستم استنتاج فازی (FIS) ایجاد می کند. پارامترهای تابع عضویت این سیستم، از طریق الگوریتم پس انتشار یا ترکیب آن باروش حداقل مربعات تنظیم می شوند. این عملیات تنظیم به سیستم های فازی اجازه می دهد تا ساختار خود را از مجموعه داده ها فرا بگیرد.

پارامترهای مربوط به توابع عضویت طی فرایند یادگیری تغییر می کنند. محاسبه این پارامترها (و یا تنظیم آن ها) از طریق یک بردار گرادیان تسهیل می شود. این بردار گرادیان یک معیار اندازه گیری برای مطلوبیت مدل سازی پارامترهای سیستم استنتاج فازی فراهم می آورد. پس از فراهم آوردن بردار گرادیان، می توان از روال های بهینه سازی دیگر، برای بهینه سازی پارامترها و کاهش خطا استفاده نمود. معمولاً خطا با استفاده از محاسبه ی مجموع مربعات خطاها محاسبه می گردد. *Anfis* برای تخمین پارامترهای تابع عضویت از روش پس انتشار و یا ترکیب آن با تخمین حداقل مربعات استفاده می کند.

۲-۴- معتبرسازی مدل با استفاده از مجموعه داده های آزمایشی و واری

معتبرسازی مدل فرایندی است که طی آن بردارهای ورودی/خروجی که در فرایند آموزش مدل شرکت نداشته اند، به مدل اعمال می شوند تا به این ترتیب میزان صحت عمل مدل مشخص شود.

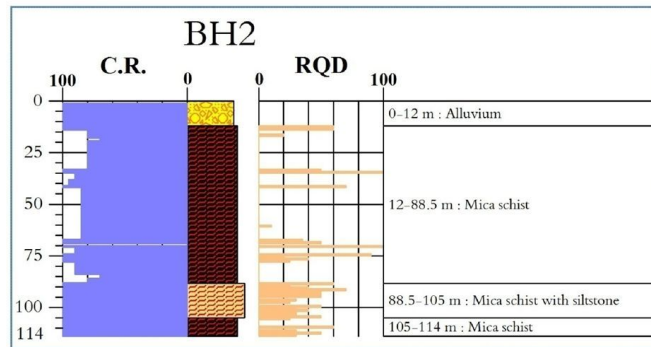
مجموعه داده های آزمایشی، قابلیت بررسی عمومیت سیستم استنتاج فازی را به دست می دهد. ایده اصلی استفاده از مجموعه داده های واری، بررسی بیش برآزش در مدل است؛ زیرا در صورتی که روال آموزش به شکل نامناسبی انجام شود، مدل بر روی داده های آموزشی کاملاً منطبق می شود، اما داده های غیر آموزشی پاسخ مناسبی نمی دهد. در صورت استفاده از داده های واری، می توان رخداد بیش برآزش را تشخیص داد؛ زیرا با شروع روال آموزش، خطای مدل روی مجموعه واری رو به کاهش می گذارد، اما با شروع بیش برآزش این خطا به شدت افزایش پیدا می کند. به این ترتیب پارامترهای تابع عضویت طوری تعیین می شود که خطای مدل روی مجموعه واری نیز علاوه بر خطا روی مجموعه آموزشی، به حداقل مقدار خود برسد [۷].

۳- موقعیت جغرافیایی تونل گلاب

هدف از پروژه تونل انتقال آب گلاب انتقال آب از دریاچه سد تنظیمی به دشت کارون در امتداد طرح آبرسانی از زاینده رود به کاشان می باشد. گستره طرح ۱۰۰ کیلومتری غرب اصفهان و شمال استان چهارمحال و بختیاری می باشد و نزدیک ترین شهرها به آن تیران و چادگان هستند. بلندترین رشته کوه این منطقه رشته کوه دالان با ۳۸۹۰ متر ارتفاع و پست ترین منطقه آن دره زاینده رود با ارتفاع ۱۹۰۰ متر است [۸].

۳-۱- مطالعات ژئوتکنیکی انجام گرفته در مسیر تونل

بر روی مسیر ۱۰ کیلومتری تونل گلاب، شرکت آزمون فولاد به دستور مشاور طرح تعداد ۹ گمانه ژئوتکنیکی با مجموع عمق ۳۱۰۵ متر و تعداد ۲ گمانه در موقعیت کانال آبگیر به ورودی تونل اصلی با مجموع عمق ۱۰۰ متر حفاری نموده است. حفاری‌ها به صورت دورانی^۱ و مغزه‌گیری ممتد و آزمایشهای گمانه‌ای و آزمایشگاهی توسط شرکت آزمون فولاد انجام شده است. یکی از اهداف این حفاری‌ها، کسب اطلاعات ژئوتکنیکی تا عمق تونل در گمانه‌ها بوده است.



شکل ۲: نمونه لوگ گمانه‌های حفاری شده (گمانه BH2 در فاصله ۲۹۰۰ متری از ورودی تونل) [۹]

۴- پارامترهای ورودی

تعیین همه پارامترهایی که بر روی نرخ نفوذ تاثیر دارند بسیار مشکل است. به هر حال همه پارامترها مستقل نیستند و تعدادی از آنها ارتباط قوی با یکدیگر دارند. بنابراین بین تک‌تک پارامترهای حفاری و ژئوتکنیکی آنالیز همبستگی پیرسون انجام شد؛ که مشخص گردید از میان این پارامترها، دو پارامتر شاخص بار نقطه‌ای ($I_s(50)$) و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ (UCS) بیشتر ضریب همبستگی را با اندیس نفوذ میدانی (FPI) و کمترین ضریب همبستگی را بین خود برقرار نمودند. از طرفی اندیس نفوذ میدانی که خود رابطه مستقیمی با نرخ نفوذ دارد، در نهایت دو پارامتر میزان چرخش کاترهد (RPM) و نیروی نفوذ هر دیسک (F_n) بعنوان پارامترهای ورودی تعیین گردیدند.

۵- مجموعه داده‌های ورودی

یکی از مهمترین مراحل در استفاده از فن شبکه‌های عصبی - و منطق فازی جمع‌آوری داده‌هاست. قبل از آموزش و اجراء، مجموعه داده‌ها بطور اتفاقی به زیر مجموعه‌های آموزش، ارزیابی و آزمایش تقسیم می‌شوند.

در مقاله حاضر، ۲۸۹ مجموعه داده جمع‌آوری شده است. از این تعداد، ۶۵ داده‌ها برای آموزش، ۲۰٪ برای واری و در نهایت ۱۵٪ برای آزمایش انتخاب شدند. مجموعه آموزش برای تولید مدل، مجموعه واری برای بررسی میزان صحت عمل مدل و مجموعه آزمایش، قابلیت بررسی عمومیت سیستم استنتاج فازی را به دست می‌دهد.

¹ Rotary

۶- طراحی و آنالیز ANFIS

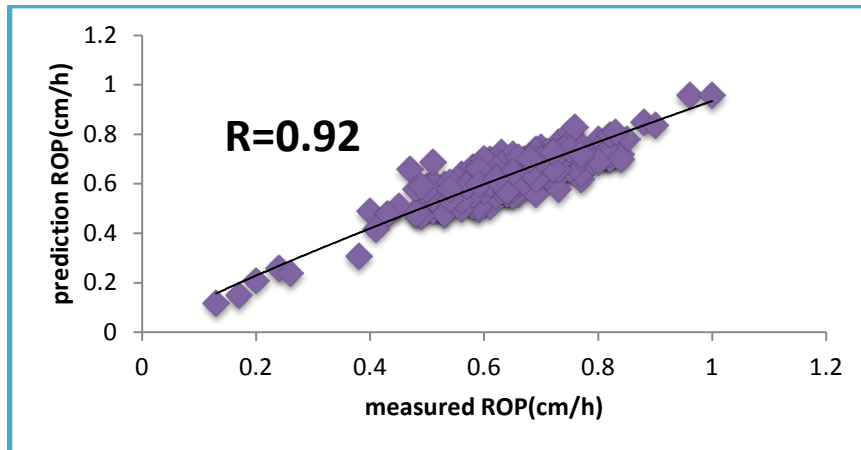
پس از تعیین پارامترها، داده‌های ورودی و خروجی نرمالیزه شدند. سپس شبکه عصبی - فازی مورد استفاده در این مقاله با به کارگیری نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از جعبه‌ابزار ANFIS طراحی شد. داده‌های ورودی در anfis بارگذاری گردیدند. مدل‌های مختلفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. کیفیت نتایج بدست آمده برای تعدادی از مدل‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: مقایسه بین تعدادی از مدل‌ها

ردیف	تعداد تابع عضویت ورودی	نوع تابع عضویت ورودی	نوع تابع عضویت خروجی	خطا در پایان آموزش	میانگین خطا آموزش	میانگین خطا واریسی	میانگین خطا آزمایش
1-	2	Gbell	Linear	0.09222	0.09222	0.56022	0.46836
2-	2	Gauss	Linear	0.89491	0.09579	0.25984	0.23620
3-	2	Gauss2	Linear	0.08882	0.08882	0.64165	0.49975
4-	2	Pi	Linear	0.08812	0.09285	0.45962	0.35526
5-	2	Dsig	Linear	0.08780	0.09134	0.43241	0.92086
6-	2	psig	Linear	0.08780	0.09134	0.43241	0.92086
7-	2	Gbell	Constant	0.10903	0.10903	0.13451	0.17915
8-	2	Gauss	Constant	0.10751	0.10751	0.12607	0.16542
9-	2	Gauss2	Constant	0.11159	0.12754	0.13476	0.12302
10-	2	Pi	Constant	0.11334	0.12052	0.13584	0.13284
11-	2	Dsig	Constant	0.10945	0.12152	0.13589	0.12615
12-	2	Psig	Constant	0.10945	0.12152	0.13589	0.12615
13-	3	Gbell	Linear	0.07366	0.08262	1.9222	1.4462
14-	3	Gauss	Linear	0.07411	0.08472	1.2339	1.0168
15-	3	Gauss2	linear	0.06983	0.06983	10.537	11.391
16-	3	Gbell	Constant	0.08742	0.09087	0.33959	0.33994
17-	3	Gauss	Constant	0.08470	0.09585	0.18267	0.25641
18-	3	Gauss2	Constant	0.07642	0.09593	1.7743	2.7197
19-	4	gauss	Constant	0.06459	0.06548	4.0936	2.6097
20-	4	gauss	linear	0.05893	0.06404	3.605	2.651

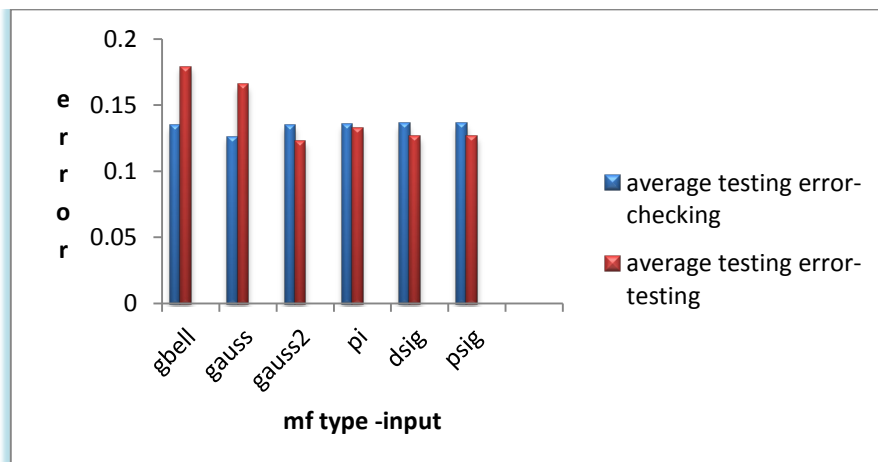
بنابراین پس از تحلیل و بررسی خطاها، مشخص گردید که بهترین مدل برای مسئله مورد نظر؛ مدلی با تعداد تابع عضویت ورودی ۲، تابع عضویت gauss در قسمت ورودی و در نهایت تابع عضویت خروجی از نوع constant با خطای تولرانس صفر می‌باشد.

شکل (۳) یک مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای مدل مرجع شبکه عصبی- فازی نشان می‌دهد.



شکل ۳: همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده

همانطور که دیده می‌شود ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک می‌باشد و این نشان می‌دهد که مدل ارائه شده دلگرم‌کننده و مطلوب می‌باشد. شکل زیر خطاهای تعدادی از مدل‌ها را نشان می‌دهد. خطاهای بدست آمده برای این ارزیابی کیفیت رضایتبخش تحلیل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴: مقایسه خطاها بین تعدادی از مدل‌ها

۷- نتیجه‌گیری

هیچ‌کدام از مدل‌های پیش‌بینی نمی‌توانند به‌طور کامل نرخ نفوذی مطابق با واقعیت را ارائه کنند. همچنین به‌دلیل پیشرفت تکنولوژی و استفاده از ابزار با کارایی بیشتر در دستگاه‌های حفاری، بیشتر مدل‌های قدیمی نرخ نفوذ کمتر از مقدار واقعی را بدست می‌دهند.

روش منطق فازی یک روش جالب و در عین حال آسان و بسیار دقیق برای حل مسائل تخمین می‌باشد. این روش که تکنولوژی آن جدید، و در غالب قواعد if- then می‌شود. بررسی‌ها و تحلیل‌های انجام شده با استفاده از این تکنیک نشان می‌دهد که این روش قابل اعتماد و کم هزینه در مقایسه با سایر روش‌ها می‌باشد. همچنین این مدل نشان داد که ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار زیاد می‌باشد. از طرفی خطاهای بدست آمده اندک و ناچیز می‌باشد.

مراجع

- [1]. Tarkoy, e. Peter, J., Prediction TBM Penetration Rates in Selected Rock types, Proceedings Ninth Canadian Rock Mechanics Symposium, Montreal, (1973).
- [2]. Graham, PC " Rock exploration for machine manufacturers" Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, vol. 1, Johannesburg, Balkema, 1976. p. 173–80.
- [3]. Cassinelli, F " Power consumption and metal wear in tunnel boring machines analysis of tunnel operation in hard rock " Proceedings Tunneling 1982. , vol. 82. IMM, London, IMM, pp. 73–81.
- [4]. Nelson, PP "TBM performance analysis with reference to rock properties" Hudson JA, editor. Comprehensive rock engineering, vol. 4. Oxford: Pergamon; 1993. p. 261–91.
- [5]. Yagız, S " TBM performance prediction based on rockproperties"2006 Cotthem et al. (Eds.), EUROCK'06—Multiphysics Coupling and Long Term Behavior in Rock Mechanics, pp. 663–670.
- [6]. Gholamnejad, J. Tayarani, N., " Application of artificial neural networksto the prediction of tunnel boring machine penetration rate", Mining Science and Technology, (2010), 20, 727-733.
- [7]. کیا، مصطفی، ۱۳۸۹، منطق فازی در matlab، جلد اول، تهران، انتشارات کیان رایانه سبز.
- [8]. شریفی، ا "مطالعات زمین شناسی مهندسی تونل انتقال آب گلاب " مهندسی مشاور ایمن سازان، ۸۸.
- [9]. تورگلی، ا " گزارش کلیات پروژه تونل انتقال آب گلاب " شرکت ساختمانی سپرسنگ، ۱۳۸۵.