



## ارزیابی مدل‌های مختلف استاتیکی در مقایسه با شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ (مطالعه موردی؛ تونل گلاب)

یاسر مبرا<sup>۱</sup>، علیرضا حاجیان<sup>۲</sup>، مسعود رضازاده عنبرانی<sup>۳</sup>

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- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی،

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، اصفهان، ایران،

rezazadeh@mail.com

کلمات کلیدی: نرخ نفوذ، شبکه عصبی، TBM، تونل گلاب

### چکیده:

امروزه استفاده روزافزون از حمل‌ونقل زمینی و نیازمندی‌های مردم جهت تهیه آب آشامیدنی و همچنین لزوم احداث مسیرهای جدید و تونل‌های طولانی منجر به پیدایش و گسترش ماشین‌های تونل‌بری گردیده است. عوامل مختلفی نظیر شرایط زمین‌شناسی، خصوصیات توده‌سنگ، و همچنین مشخصات ماشین به کار رفته بر میزان کارایی ماشین‌ها تأثیر می‌گذارند. یکی از راه‌های پیش‌بینی میزان کارایی این ماشین‌ها، تخمین نرخ‌نفوذ آن‌هاست. محققان مختلفی در اکثر نقاط دنیا بر روی اثر خصوصیات سنگ بکر و توده‌سنگ بر کارایی TBM برای تخمین نرخ‌نفوذ بررسی کرده‌اند. هرکدام از این محققان، جهت تخمین این پارامتر با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی، مدل‌ها و روابطی را ارائه کرده‌اند. در این مقاله سعی بر آن شده است که با مقایسه مدل‌ها، مطلوب‌ترین آن مشخص و سپس با مدل عددی شبکه‌های عصبی مورد ارزیابی قرار گیرد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که مدل یادشده نتایج رضایتبخشی را به دنبال داشته به طوری که ضریب همبستگی نزدیک به ۰/۹۱ را ایجاد نموده است.

### ۱- مقدمه

از زمانی که اولین TBM ساخته شد آنالیز کارایی این ماشین و دقت پیش‌بینی عملکرد آن هدف بسیاری از محققان بوده است. پیش‌بینی عملکرد TBM نیازمند تعیین تخمینی از نرخ نفوذ و

نسبت زمان خالص حفاری به زمان کل دارد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که بیشتر مدل‌های پیش‌بینی تمرکز خود را بر روی نرخ نفوذ (ROP یا PR) قرار دهند. در برخی مدل‌های جدید نرخ پیشروی و بهره‌وری دستگاه، طول عمر و هزینه تعویض دیسک‌های حفاری، زمان تکمیل تونل و هزینه اجرای تونل نیز جزء خروجی‌های مدل می‌باشند. به هر حال می‌توان مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM را به دو دسته زیر تقسیم‌بندی نمود:

- روش‌های تجربی
- روش‌های نیمه‌تئوریک و یا تعادل نیرو (استاتیکی)

مدل‌های تجربی بر اساس داده‌های TBM در حین حفاری ایجاد می‌شوند که این داده‌ها شامل خصوصیات سنگ و کارایی ماشین در محل هستند. مدل‌های تئوریک بر اساس نیروی برش و معادلات تعادل نیرو هستند و معمولاً رابطه‌ای تئوریک میان پارامترهای سنگ و خصوصیات ماشین برقرار می‌کنند. برخی از این مدل‌ها ایده‌ای برای طراحی کاترهد و خصوصیات ماشین را نیز به ما می‌دهند و بسیاری از آنها را شرکت‌های سازنده TBM استفاده می‌کنند. در این بخش به برخی از این مدل‌ها اشاره می‌شود.

### ۲- مدل‌های مختلف پیش‌بینی نرخ نفوذ

۲-۱- مدل تارکوی (۱۹۷۳)

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:

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

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 توده‌سنگ را نادیده گرفته است [۱].

که در آن  $PR_{ev}$  نرخ نفوذ بر حسب میلیمتر بر دور کاترهد و  $F_n$  متوسط نیروی پیشران اعمالی بر حسب کیلو نیوتن و  $\sigma_{tb}$  مقاومت حاصل از آزمون کشش برزیلی بر حسب کیلونیوتن بر متر مربع می‌باشد [۴].

۲-۵- مدل کاسینلی (۱۹۸۲)

کاسینلی در سال ۱۹۸۲ با استفاده از رده‌بندی RSR و داده‌های حاصل از اطلاعات تونلی در کشور 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:

$$P = -0.0059RSR + 1.59 \quad (۶)$$

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 [۵].

۲-۶- مدل رامامورتی (۲۰۰۸)

رامامورتی با در نظر اثر مدول الاستیک توده‌سنگ، رابطه (۷) را برای محاسبه نرخ نفوذ پیشنهاد نمود:

$$P_R = \frac{\left(\frac{T}{A}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_t}\right) \cdot R \cdot N \cdot \left(\frac{DRI}{100}\right) \cdot S}{P_0 \cdot M_{Rj}} \quad (۷)$$

در این رابطه،  $A$  مساحت کله حفار بر حسب متر مربع  $\sigma_{ci}$ ، مقاومت فشاری ماده‌سنگ بر حسب مگاپاسکال،  $\sigma_t$  مقاومت کششی سنگ بر حسب مگاپاسکال،  $R$  تعداد چرخش کله‌حفاری در ساعت،  $N$  تعداد دیسک کاترها در متر مربع،  $DRI$  شاخص چالخوری،  $S$  طول واحد حفاری بر حسب متر،  $P_0$  متوسط تنش دو بعدی در جبهه کار تونل بر حسب تن بر مترمربع و  $M_{Rj}$  نسبت مدولی توده‌سنگ می‌باشد [۶].

### ۳- موقعیت جغرافیایی تونل انتقال آب گلاب

هدف از پروژه تونل انتقال آب گلاب، انتقال آب از دریاچه سد تنظیمی به دشت کارون در امتداد طرح آبرسانی از زاینده‌رود به کاشان می‌باشد. گستره طرح، ۱۰۰ کیلومتری غرب اصفهان و شمال استان چهارمحال و بختیاری می‌باشد و نزدیک‌ترین شهرها به آن تیران و چادگان هستند. بلندترین رشته کوه این منطقه رشته‌کوه

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:

$$P = 3.94 T / \sigma_c \quad (۲)$$

در اینجا،  $P$  بیانگر نرخ نفوذ به میلیمتر بر دور،  $T$  نیروی پیشران وارد بر هر کاتر بر حسب کیلونیوتن و  $\sigma_c$  مقاومت فشاری نمونه سنگ بر حسب مگاپاسکال می‌باشند. این رابطه به صورت زیر آورده شده است:

$$P = \frac{3940 F_n}{UCS} \quad (۳)$$

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 به دلیل در نظر نگرفتن پارامترهای توده‌سنگ و هندسه ماشین یک رابطه تقریبی است [۲].

۲-۳- مدل هوگس (۱۹۸۶)

هوگس (۱۹۸۶) رابطه‌ای را از معادن حفرشده زغال‌سنگ به دست آورد:

$$P_{Rev} = 1.667 \left(\frac{F_n}{UCS}\right)^{1.2} \cdot \left(\frac{2}{D}\right)^{0.6} \quad (۴)$$

که در این رابطه،  $D$  قطر دیسک کاترها بر حسب میلیمتر،  $F_n$  متوسط نیروی پیشران اعمالی بر حسب کیلونیوتن و  $UCS$  مقاومت فشاری تک‌محوره بر حسب مگاپاسکال می‌باشد [۳].

۲-۴- مدل فارمر و گلسوپ (۱۹۸۰)

فارمر و گلسوپ (۱۹۸۰) بر اساس بانک داده‌ای شامل سنگ‌های رسوبی رابطه زیر را برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه کردند:

$$P_{Rev} = 624 F_n / \sigma_{tb} \quad (۵)$$

<sup>1</sup> Hugs

دالان با ۳۸۹۰ متر ارتفاع و پست‌ترین منطقه آن دره زاینده رود با ارتفاع ۱۹۰۰ متر است [۷].

### 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 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 [۸].

### ۳-۲- زمین‌شناسی مسیر حفاری شده

پروژه تونل گلاب پس از ۲۹۰ روز حفاری سرانجام به پایان رسید. در طول مسیر حفاری مشکلات زیادی ایجاد گردید که از جمله آن می‌توان قرار گرفتن گسل‌ها در طی مسیر، شرایط آب زیرزمینی، وجود درزه‌ها و سایر موارد را نیز می‌توان ذکر کرد. وجود توده‌سنگ‌های ریزشی و سست در حین انجام عملیات حفاری مشکلاتی را برای ماشین حفاری ایجاد کرد و باعث گیرکردن دستگاه در زمین و به تاخیر افتادن عملیات گردید [۸].

### ۳-۳- جمع‌آوری داده‌ها

در پروژه‌های تونل‌سازی به روش مکانیزه، معمولاً سه دسته اطلاعات از عملکرد واقعی ماشین؛ جمع‌آوری، ثبت، محاسبه و بایگانی می‌شود:

۱- پارامترهای راهبری ماشین (گشتاور، نیروی پیشران، توان

مصرفی، سرعت دوران و ...)

۲- اطلاعات مربوط به کارکرد دستگاه (ساعت شروع و پایان

سیکل حفاری، تاخیرات دستگاه و ...)

۳- بعضی از پارامترهای ترکیبی

جمع‌آوری این داده‌ها در پروژه‌های حفاری مکانیزه یکی از مهمترین مراحل در مطالعات مربوط به عملکرد TBM می‌باشد. اما معمولاً به دلیل سیستم‌های ثبت سنتی (بایگانی لوگ‌های حفاری به صورت

کاغذی) و عدم یکپارچه‌سازی داده‌ها دستیابی به آنها مشکل می‌باشد. دستگاه‌های حفاری مکانیزه مدرن دارای سیستم ثبت خودکار اطلاعات حفاری می‌باشند ولی به رغم آن ثبت اطلاعات به صورت دستی و نگهداری آن به صورت کاغذی هنوز رایج است. در تونل گلاب نیز پارامترهای حفاری به صورت دستی در لوگ‌های حفاری ثبت و میانگین آن‌ها به عنوان پارامترهای روزانه در گزارشات حفاری ارائه شده است [۹].

### ۳-۴- انتخاب پارامترهای موثر

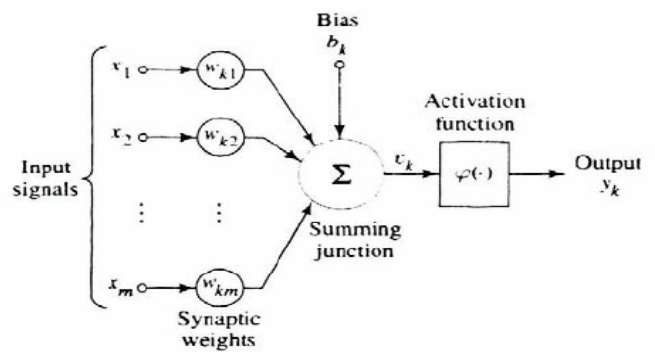
پس از انجام بررسی‌ها و برقراری رگرسیون تک‌متغیره بین تک‌تک پارامترهای حفاری و ژئوتکنیکی و به دنبال آن، ایجاد رگرسیون چندمتغیره بین داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel، پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، اندیس شاخص بار نقطه‌ای ( $I_s(50)$ )، تعداد دور کاترهد بر دقیقه (RPM) و نیروی نرمال بر هر دیسک ( $F_n$ ) به‌عنوان پارامترهای موثر در مدل مورد نظر تعیین گردیدند. در واقع این پارامترها بیشترین تأثیر را بر روی نرخ نفوذ داشته‌اند.

### ۴- شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی با الهام از ساختار مغز و عملکرد موازی آن به وجود آمده‌اند و تا به حال نتایج شگفت‌آوری به دنبال داشته‌اند. شبکه عصبی، یک سیستم پویا و خطی است که از تعداد زیادی واحد پردازش (نرون) و اتصالات بین واحدهای پردازش تشکیل می‌شود. برای حل هر مسأله‌ای شبکه عصبی سه مرحله را طی می‌کند: الف) آموزش، ب) تعمیم، ج) اجرا.

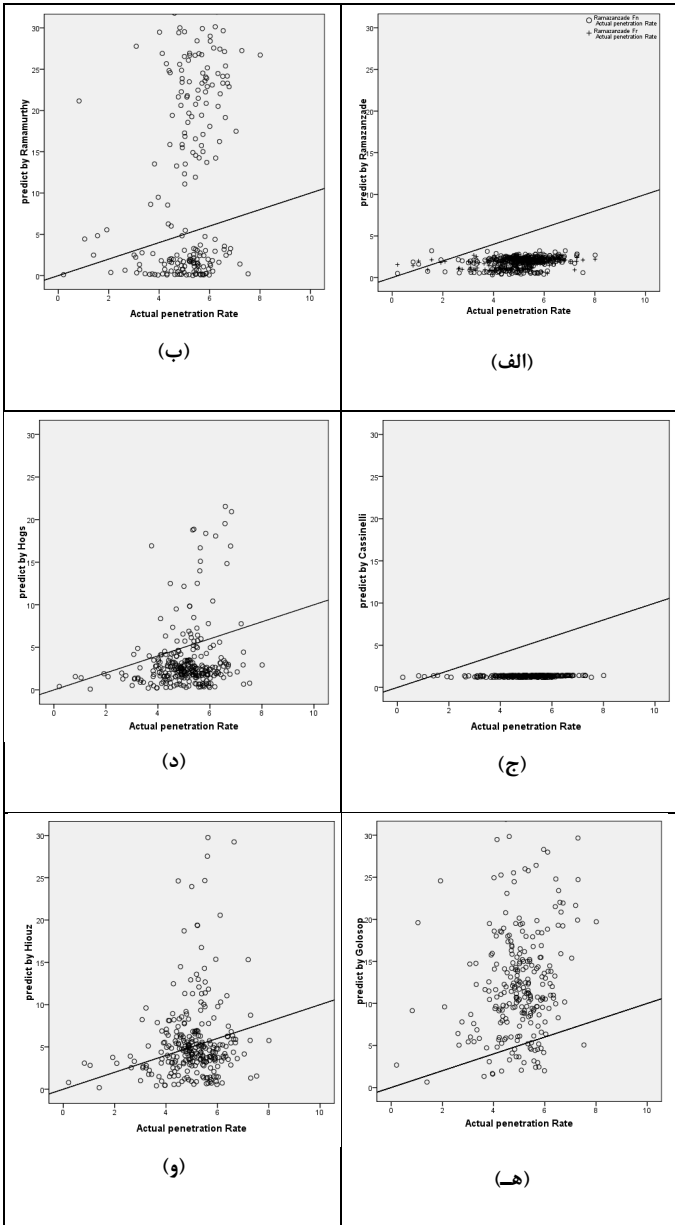
آموزش، فرایندی است که طی آن شبکه می‌آموزد تا الگوی موجود در ورودی‌ها را (که به صورت مجموعه داده‌های آموزشی است) بشناسد. برای این منظور هر شبکه عصبی از مجموعه‌ای از قوانین یادگیری که نحوه یادگیری را تعریف می‌کنند استفاده می‌کند. تعمیم، توانایی شبکه است برای ارائه جواب قابل قبول در قبال ورودی‌هایی که در مجموعه آموزشی نبوده‌اند. استفاده از شبکه برای انجام عملکردی که به منظور آن طراحی شده است را اجرا می‌گویند. در طی مرحله آموزش، وزن‌های داخلی شبکه عصبی که بر روی ورودی‌ها اعمال می‌شود آن قدر تغییر می‌کنند تا به وضعیت مناسب برسند. شبکه‌های عصبی، ساختار لایه‌ای دارند. اولین لایه،

لایه ورودی است و لایه آخر لایه خروجی است. داده‌ها در سلول‌های لایه ورودی جای می‌گیرند. لایه ورودی کار خاصی انجام نمی‌دهد و صرفاً داده‌های ورودی را در قسمت خروجی خود کپی می‌کند. 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 می‌نامند. شکل (۱) مدل ریاضی یک سلول عصبی را نشان می‌دهد [۱۰].



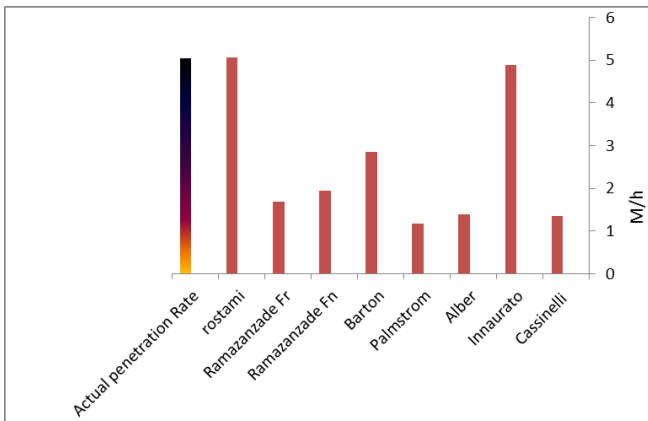
شکل (۱) مدل ریاضی یک سلول عصبی مصنوعی

۵- مقایسه مدل‌های مختلف استاتیکی پیش‌بینی نرخ نفوذ در این بخش به مقایسه مقدار پیش‌بینی نرخ نفوذ حاصل از مدل‌های مختلف و مقدار واقعی نرخ نفوذ به دست آمده در ماشین حفاری تونل گلاب می‌پردازیم. سپس ضرایب همبستگی حاصل شده از مدل‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه و بهترین مدل را تعیین می‌کنیم. و در نهایت مدل مطلوب را با مدل حاصل از شبکه عصبی مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. اشکال مربوط به مدل‌های مختلف استاتیکی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲) نمودار پراکنش مقدار نرخ نفوذ واقعی و مقادیر نرخ نفوذ به دست آمده به وسیله روابط مختلف (متر بر ساعت): الف) رمضان‌زاده، ب) رامامورتی، ج) کاسینلی، د) هوگس، ه) گلوسوپ، و) هیوز

برای مقایسه کارایی مدل‌های متفاوت در تونل گلاب از دو طریق عمل شده است. روش اول بر مبنای اختلاف مقادیر پیش‌بینی با مقادیر واقعی استوار است. برای این مقایسه میانگین اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده برای نرخ نفوذ را در مدل‌های مختلف ترسیم شده است. همانگونه که در شکل (۳) و همچنین جدول (۱) مشخص است، از لحاظ کمترین فاصله، مدل‌های ایناروتو و CSM



شکل (۴) نمودار میله‌ای میانگین مقدار نرخ نفوذ واقعی با نرخ نفوذ بدست آمده در مدل‌های پیش‌بینی

با توجه به شکل (۴)، نرخ نفوذ در حفاری انجام‌شده تونل گلاب از مقادیر به‌دست‌آمده از مدل‌های پیش‌بینی بالاتر است و این به دلیل تکنولوژی به‌روز استفاده‌شده در دستگاه حفار این پروژه (مدل‌های قبلی از پایگاه داده‌ای استفاده می‌کردند که نتایج حاصل از حفاری با دستگاه‌های قدیمی‌تر را جمع‌آوری کرده بودند) و همچنین میزبانی توده‌سنگ‌هایی با پارامترهای مقاومتی پایین در تونل گلاب (بیشتر مدل‌ها بر مبنای سنگ سخت ایجاد شده‌اند) می‌باشد. روش دوم، برای مقایسه از طریق ضریب تصحیح پیرسون استفاده شده است. با توجه به مورد یادشده، نمودار پراکنش ماتریسی مقادیر نرخ نفوذ حاصل‌شده از مدل‌های مختلف را با مقادیر واقعی نرخ نفوذ ترسیم شده است و در جدول (۲) ماتریس ضرائب پیرسون آن‌ها آورده شده است (مقادیر نزدیک‌تر به عدد یک بیشترین هماهنگی را دارد). مدل رمضان‌زاده بهترین حالت و مدل آلبر بدترین حالت را در مورد روند نمودار با مقدار واقعی نرخ نفوذ دارند. سه مدل گلووسوپ، هوگس و هیوز، سه مدل ایناروتو، آلبر و پالمستروم و دو مدل بارتن و رمضان‌زاده نیز بیشترین مقدار ضریب پیرسون را با یکدیگر دارند.

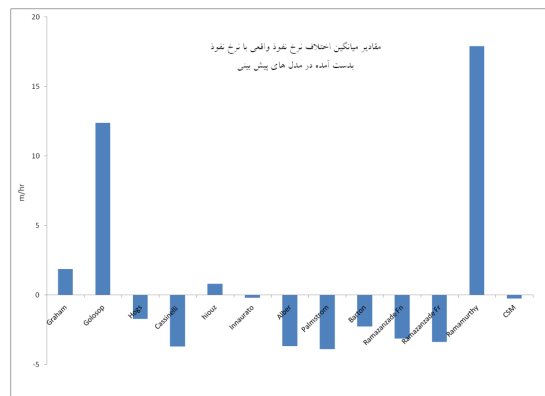
جدول (۲) ضریب همبستگی پیرسون مقادیر نرخ نفوذ مدل‌های مختلف و نرخ نفوذ واقعی

	Graham	Golosp	Hogs	Cassinelli	hiouz	Innaurato	Alber	Palmstrom	Barton	Ramanzade Fr	Ramanzade Fn	Ramamurthy	PR
Graham	1.00	0.57	0.99	0.41	0.99	0.45	-0.12	0.10	0.78	0.39	0.10	-0.07	0.19
Golosp	0.57	1.00	0.57	0.30	0.53	0.26	-0.21	-0.02	0.55	0.34	0.27	-0.10	0.23
Hogs	0.99	0.57	1.00	0.39	1.00	0.36	-0.17	-0.02	0.90	0.36	0.16	-0.14	0.22
Cassinelli	0.41	0.30	0.39	1.00	0.39	-0.01	-0.56	-0.07	0.50	0.82	0.11	-0.34	0.25
hiouz	0.99	0.53	1.00	0.39	1.00	0.36	-0.17	0.82	0.72	0.32	0.00	-0.10	0.15
Innaurato	0.45	0.26	0.36	-0.01	0.36	1.00	0.62	0.78	0.29	0.10	-0.27	0.25	-0.16
Alber	-0.12	-0.21	-0.17	-0.56	-0.17	0.62	1.00	0.82	-0.11	-0.25	-0.18	0.10	-0.29
Palmstrom	0.10	-0.02	0.02	-0.07	0.02	0.78	0.82	1.00	0.12	0.36	-0.22	0.51	-0.15
Barton	0.78	0.55	0.80	0.50	0.72	0.29	-0.11	0.12	1.00	0.57	0.21	0.02	0.23
Ramanzade Fr	0.39	0.34	0.36	0.82	0.32	0.10	-0.25	0.26	0.57	1.00	0.18	0.48	0.27
Ramanzade Fn	0.10	0.27	0.16	0.11	0.08	-0.27	-0.18	-0.23	0.21	0.18	1.00	-0.45	0.36
Ramamurthy	-0.07	-0.10	-0.14	0.34	-0.10	0.25	0.10	0.51	0.02	0.48	-0.45	1.00	-0.08
PR	0.19	0.13	0.22	0.25	0.15	-0.16	-0.29	-0.15	0.23	0.27	0.36	-0.08	1.00

بهترین حالت و مدل‌های رامامورتی و گلووسوپ بدترین حالت را دارند. اکثریت مدل‌ها مقادیر کمتری را پیش‌بینی نموده‌اند و این بدان معناست که تونل گلاب در حالی بهتر از مقادیر پیش‌بینی حفاری شده است.

جدول (۱) ماتریس فاصله هندسی مقادیر نرخ نفوذ حاصل از مدل‌های مختلف و مقدار واقعی

	Actual penetration Rate	Proximity Matrix												
		Graham	Golosp	Hogs	Cassinelli	hiouz	Innaurato	Alber	Palmstrom	Barton	Ramanzade Fr	Ramanzade Fn	Ramamurthy	CSM
Actual penetration Rate	0	74	301	56	61	85	32	63	65	47	53	56	528	45
Graham	74	0	265	43	107	22	76	109	110	51	99	104	116	91
Golosp	301	265	0	308	119	278	104	342	342	119	112	111	111	302
Hogs	56	43	308	0	10	41	11	15	15	11	45	48	112	73
Cassinelli	61	107	119	10	110	19	11	11	11	11	11	11	11	11
hiouz	85	22	278	91	110	0	11	112	112	112	112	112	112	112
Innaurato	32	76	104	15	19	41	0	16	16	16	16	16	16	16
Alber	63	109	110	11	112	16	0	16	16	16	16	16	16	16
Palmstrom	65	110	110	11	112	16	16	0	16	16	16	16	16	16
Barton	47	51	119	11	112	16	16	16	0	16	16	16	16	16
Ramanzade Fr	53	99	112	45	112	16	16	16	16	0	16	16	16	16
Ramanzade Fn	56	104	111	48	112	16	16	16	16	16	0	16	16	16
Ramamurthy	528	116	111	112	112	112	112	112	112	112	112	112	0	544
CSM	45	91	302	73	71	100	48	76	74	65	67	63	244	0



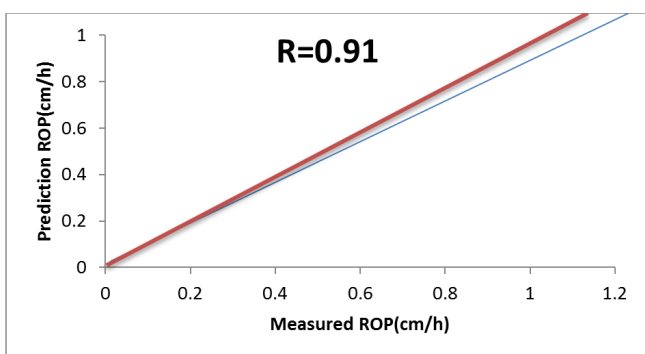
شکل (۳) نمودار میله‌ای میانگین مقادیر اختلاف نرخ نفوذ واقعی با نرخ نفوذ بدست آمده در مدل‌های پیش‌بینی

با حذف نتایج مدل‌های رامامورتی و گلووسوپ که نتایج غیرقابل قبولی داشتند، میانگین نتایج پیش‌بینی شده در شکل (۴) آورده شده است.

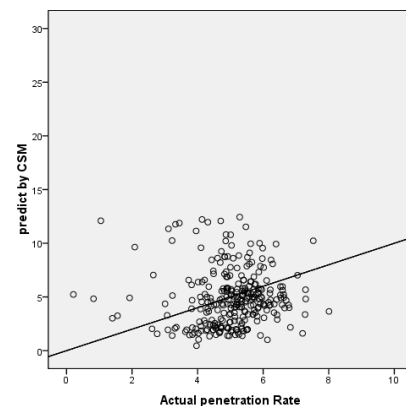
ورودی مدل گلوسوپ، نیروی پیشران اعمالی و مقاومت کششی و مدل هوگس، نیروی پیشران اعمالی، قطر دیسک کاترها و مقاومت فشاری تک‌محوره و مدل هیوز، نیروی پیشران، مقاومت فشاری سنگ، دور کاتر، شعاع متوسط کاتر و قطر کاتر می‌باشند و این خود می‌تواند توجیحی باشد که این مدل‌ها بیشترین هماهنگی را با یکدیگر دارند.

#### ۵-۱- تعیین مطلوب‌ترین مدل استاتیکی پیش‌بینی نرخ نفوذ

در بخش‌های قبلی، مدل‌های متفاوت پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین حفار تونل گلاب مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. همانطور که از جدول (۱) و شکل (۴) برمی‌آید، مدل رستمی (CSM) به نسبت سایر مدل‌ها نتایج قابل قبولی را ارائه داده است. نتیجه این مدل در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۶) مقایسه بین نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده و نرخ نفوذ پیش‌بینی شده



شکل (۵) نمودار پراکنش مقادیر نرخ نفوذ بدست آمده بوسیله رابطه CSM و مقدار نرخ نفوذ واقعی بر حسب متر بر ساعت

چهارلایه با الگوریتم تابع انتقال سیگموئید در لایه‌های مخفی و یک تابع انتقال خطی مشابه با نرخ نفوذ در لایه خروجی انتخاب شد. در لایه پنهان اول، تعداد ۱۳ نرون و در لایه پنهان دوم تعداد ۴ نرون قرار گرفت. در نهایت، پس از تعیین مدل مطلوب، شبکه با داده‌های جدید مورد ارزیابی قرار گرفت که ضریب همبستگی در حدود ۰/۹۱ ایجاد گردید. در شکل (۶)، نمودار ضریب همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی نرخ نفوذ آورده شده است.

همانطور که در جداول و نمودارهای بخش‌های گذشته مشاهده کردیم، مدل رستمی نسبت به سایر مدل‌های استاتیکی که در سال‌های گذشته توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته، نتایج بهتر و ضریب همبستگی بالاتری ایجاد نموده است به طوری که این مقدار بیش از ۰/۶۰ می‌باشد. همچنین، طبق نتایج به‌دست آمده از آنالیز مدل‌های مختلفی از شبکه عصبی، میزان ضریب همبستگی ایجادشده بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده، در حدود ۰/۹۱ می‌باشد، که این تحلیل‌ها نشان می‌دهند روش عددی شبکه‌های عصبی مصنوعی نسبت به مدل‌های آماری استاتیکی، مقادیری نزدیک‌تر به مقادیر واقعی ایجاد نموده است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

از لحاظ کمترین فاصله، مدل‌های ایناروتو و CSM بهترین نتایج و مدل‌های رامامورتی و گلوسوپ بدترین نتایج را برای برآورد نرخ نفوذ می‌دهند. همچنین از لحاظ تطابق و روند، مدل رمضان‌زاده بهترین نتایج و مدل آلبر بدترین نتایج را با مقدار واقعی نرخ نفوذ دارند. مدل‌هایی که از ورودی‌های متشابه استفاده می‌کنند،

#### ۵-۲- مقایسه مدل‌های مختلف استاتیکی با مدل شبکه‌های عصبی

همانطور که در بخش (۳-۳) گفتیم، چهار پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره، اندیس شاخص مقاومت بار نقطه‌ای، تعداد دور بر دقیقه کاتر و نیروی نرمال به‌عنوان پارامترهای ورودی و نرخ نفوذ دستگاه به‌عنوان خروجی شبکه عصبی تعیین گردید. جهت به دست آوردن بهترین معماری شبکه، مدل‌های زیادی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و در نهایت مدلی با یک لایه ورودی، دو لایه مخفی و یک لایه خروجی انتخاب گردید. بنابراین یک شبکه

- [۸] تورگلی، ا.، گزارش کلیات پروژه تونل انتقال آب گلاب، شرکت ساختمانی سپرسنگ، ایران، ۱۳۸۵.
- [۹] اکبری، ا.، تعیین پارامترهای بهینه حفاری دستگاه *TBM* بر اساس شرایط ژئوتکنیکی (مطالعه موردی تونل گلاب)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجفآباد، اصفهان، ایران، ۱۳۹۰.
- [۱۰] مهدوری، س.، پیش‌بینی ضریب بهره‌وری *TBM* های باز، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ۱۳۸۳.

بیشترین تطابق را با یکدیگر دارند. اکثریت مدل‌ها مقادیر کمتری را پیش‌بینی نموده‌اند و این بدان معناست که تونل گلاب در حالتی بهتر از مقادیر پیش‌بینی حفاری شده است. هیچ کدام از مدل‌های پیش‌بینی نمی‌توانند به طور کامل نرخ نفوذی مطابق با واقعیت را ارائه کنند. همچنین به دلیل پیشرفت تکنولوژی و استفاده از ابزار با کارایی بیشتر در دستگاه‌های حفاری، بیشتر مدل‌های قدیمی نرخ نفوذی کمتر از مقدار واقعی را بدست می‌دهند. مدل‌های که از پارامترهای ماده سنگ و توده سنگ و همچنین پارامترهای حفاری (طراحی، اپراتوری) به طور همزمان استفاده می‌کنند، بیشتر از سایر مدل‌ها در ارائه نرخ نفوذ دقت دارند. شبکه عصبی مصنوعی، یک روش مفید و سودمند برای پیش‌بینی نرخ نفوذ یک ماشین تونل‌بری می‌باشد. به هر حال برقراری ارتباط میان ورودی‌ها و خروجی‌ها خیلی پیچیده است. نتایج به دست آمده از این مدل دلگرم‌کننده و رضایت‌بخش می‌باشد. یکی از نکات برجسته این است که این روش یک روش اقتصادی و آسان‌تر در مقایسه با کار آزمایشگاهی پردردسر و پرهزینه می‌باشد. از آنجایی که قسمتی از این مدل بر پایه داده‌های ژئوتکنیکی است پیش‌بینی نرخ نفوذ نیز قابل استفاده در سایر موارد مشابه آن می‌باشد.

## ۷- مراجع

- [1] Tarkoy, P.J. "Rock hardness index properties and geotechnical parameters for predicting tunnel boring machine performance", Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, 1975, p. 326.
- [2] Graham, P.C. "Rock exploration for machine manufacturers", Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, vol. 1, Johannesburg, Balkema, 1976, p. 173-80.
- [3] Hughes, H. "The relative cut-ability of coal measures rock Mining", Sci Technol, 1986, 3:95-109.
- [4] Farmer, I.W., Glossop, N.H. "Mechanics of disc cutter penetration", Tunnels Tunneling, 1980, 12(6):22-5.
- [5] Cassinelli, F. "Power consumption and metal wear in tunnel boring machines analysis of tunnel operation in hard rock", Proceedings Tunneling, vol. 82., IMM, London, 1982, pp. 73-81.
- [6] Ramamurthy, T., "Penetration rate of TBMs", World Tunnel Congress, India, 2008, pp. 1552-1563.
- [۷] شریفی، ا.، مطالعات زمین شناسی مهندسی تونل انتقال آب گلاب، مهندسی مشاور ایمن سازان، ایران، ۱۳۸۸.