

پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین‌های تونل‌بری با استفاده از شبکه عصبی

مهدی یآوری

عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

سعید مهدوری

عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی معدن - دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت ۸۳/۵/۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۱۲/۶، تاریخ تصویب ۸۴/۱۲/۱۳)

چکیده

در این مقاله ابتدا برخی از روش‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM مرور شده و سپس نرخ نفوذ با منظور کردن پارامترهای نوع سنگ، درصد کوارتز، مقاومت فشاری تک‌محوره، قطر دیسک، نیروی نفوذ هر دیسک و RQD با استفاده از شبکه عصبی پیش‌بینی شده است. با حذف RQD و درصد کوارتز از پارامترهای ورودی، حساسیت شبکه نسبت به حذف این پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج شبکه عصبی با مدل تجربی گراهام، توانایی شبکه عصبی در پیش‌بینی نرخ نفوذ و پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM تونل گاویشان با استفاده از شبکه عصبی و مدل گراهام بخش‌های پایانی این تحقیق را تشکیل می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شبکه عصبی، نرخ نفوذ، ماشین‌های تونل‌بری (TBM)

مقدمه

نفوذ بر مبنای سختی کل سنگ پیشنهاد کرد که در آن سختی کل سنگ با استفاده از بازگشت چکش اشمیت و سختی سایشی سنگ محاسبه می‌شد. بزرگترین عیب مدل تاریکی لحاظ ویژگی‌های ماشین و توده سنگ در برآورد نرخ نفوذ بود. رابطه تاریکی (۱) در شرایطی که سختی کل بین ۲ تا ۲۴۲ و نرخ نفوذ ۰/۰۷۶-۳/۷۱۶ متر بر ساعت باشد، صادق است [۲].

$$P = 3.716 - 0.019 \times H_T$$

$$H_T = H_R \times \sqrt{H_A}$$

(۱)

که H_T سختی کل، H_R سختی چکش اشمیت، H_A سختی سایشی و P نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت است.

گراهام در سال ۱۹۷۶ برای سنگ‌هایی که مقاومت فشاری آنها در دامنه ۱۴۰-۲۰۰ مگاپاسکال می‌باشد، رابطه (۲) را برای تخمین نرخ نفوذ ارائه کرد. [۳]

$$P = \frac{3940 F_n}{UCS}$$

(۲)

در این رابطه P نرخ نفوذ بر حسب میلی‌متر بر دور تاج‌حفار، UCS مقاومت فشاری تک‌محوره بر حسب

استفاده روزافزون از حمل و نقل زمینی و لزوم احداث مسیرهای جدید و تونل‌های طولانی منجر به پیدایش و گسترش TBM از اوایل قرن نوزدهم شد. علی‌رغم سرمایه‌گذاری اولیه زیاد، سرعت و کیفیت بالای حفاری این ماشین‌ها آن را قابل رقابت با روشهای حفاری سنتی کرده است. یکی از فاکتورهای مهم موثر که بر سرعت حفاری یا نرخ پیشروی^۱ TBM تاثیر می‌گذارد، نرخ نفوذ^۲ آن است. نرخ نفوذ برابر با نرخ پیشروی آنی ماشین است و معمولاً بر حسب میلی‌متر بر دور تاج‌حفار بیان می‌شود. نرخ نفوذ TBM به صورت معمول با توجه به خواص سنگ، مشخصات ماشین و ابزار برش تخمین زده می‌شود. البته فاصله، جهت و شرایط درزه‌ها نیز بر نرخ نفوذ تأثیر می‌گذارد که مقدار کمی این اثر در تعدادی از روشها، از جمله روش انسیتیتو تکنولوژی^۳ بروز^۳ لحاظ شده است. در ادامه به تعدادی از روش‌های تخمین نرخ نفوذ که تا کنون ارائه شده، اشاره می‌شود.

مطالعات انجام شده در این زمینه

تاریکی در سال ۱۹۷۳ مدلی را برای پیش‌بینی نرخ

پویا و غیرخطی است که از تعداد زیادی واحد پردازش (نرون) و اتصالات بین واحدهای پردازش تشکیل می‌شود. شبکه عصبی برای حل مسائل سه مرحله را طی می‌کند: الف: آموزش، ب: ارزیابی، 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. ارزیابی، توانایی شبکه است برای ارائه جواب قابل قبول در قبال ورودی‌هایی که در مجموعه آموزشی نبوده‌اند. 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. تابع ترکیب در اولین بخش قرار دارد. وظیفه تابع ترکیب این است که تمام ورودیها را ترکیب و یک عدد تولید کند. بخش دوم سلول عصبی تابع انتقال نام دارد. تابع انتقال مقدار تابع ترکیب را به خروجی سلول تبدیل می‌کند. تابع انتقال را تابع تحریک نیز می‌نامند. 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 جزء 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. اگر شبکه دارای m گره در لایه ورودی، n_1 گره در لایه پنهان اول، n_2 گره در لایه پنهان دوم و p گره در لایه خروجی باشد، آن را به صورت mn_1n_2p نشان می‌دهند. شبکه استفاده شده در این مطالعه از نوع تغذیه پیشرو^۶ است، بدین معنی که تنها یک جریان یک‌طرفه از لایه ورودی به سمت لایه خروجی موجود است و هیچ مسیر برگشتی وجود ندارد. این نوع شبکه ساده‌ترین و پرکاربردترین نوع شبکه عصبی است و برای مسائل تخمین بسیار مناسب می‌باشد [۷].

کیلوپاسگال و F_n نیروی نفوذ هر دیسک بر حسب کیلونیوتن است.

فارمر و گلوپ در سال ۱۹۸۰ رابطه (۳) را برای تخمین نرخ نفوذ در سنگهای رسوبی ارائه کردند [۱].

$$P = 624F_n / \sigma_{TB} \quad (3)$$

که P نرخ نفوذ بر حسب میلی‌متر بر دور تاج حفار، σ_{TB} مقاومت کششی برزیلی بر حسب مگاپاسگال و F_n نیروی نفوذ هر دیسک بر حسب کیلونیوتن است.

کاسینلی در سال ۱۹۸۲ با استفاده از رده‌بندی RSR نرخ نفوذ را بر حسب متر بر ساعت به صورت زیر تعیین کرد [۴].

$$P = -0.0059RSR + 1.59 \quad (4)$$

لیزلرود در سال ۱۹۸۳ بر مبنای حفاری‌های انجام شده در سنگ‌های شیل، آهک، گنیس و بازالت رابطه (۵) را برای اصلاح نرخ نفوذ با توجه به امتداد ناپیوستگی‌ها ارائه کرد [۵].

$$P = ib \times K_s \times K_d \quad (5)$$

که ib نرخ نفوذ پایه، K_s ضریب اصلاح برای کلاس درزه‌ها و زاویه میان محور تونل و امتداد درزه‌ها و K_d ضریب اصلاح برای قطر دیسک است.

بامفورد در سال ۱۹۸۴ نرخ نفوذ را به صورت تابعی از سختی چکش اشمیت، نیروی محوری ماشین^۴، شاخص نفوذ مخروطی^۵ و زاویه اصطکاک داخلی به صورت زیر تخمین زد [۶].

$$P = 0.535S - 8.49 - 0.00344T - 0.000823N + 0.0137\phi \quad (6)$$

که P نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت، S سختی چکش اشمیت، T نیروی محوری ماشین بر حسب تن، N شاخص نفوذ مخروطی بر حسب نیوتن بر میلی‌متر و ϕ زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه است.

مبانی شبکه عصبی

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

پیش‌بینی نرخ نفوذ

پارامترهایی که برای پیش‌بینی نرخ نفوذ به عنوان ورودی شبکه مورد بررسی قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از: نوع سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوره، درصد کوارتز، قطر دیسک، نیروی نفوذ هر دیسک و RQD مقاومت فشاری تک‌محوره بر حسب مگاپاسگال، قطر دیسک بر حسب اینچ و نیروی نفوذ هر دیسک بر حسب کیلونیوتن منظور شده است. نوع سنگ مطابق جدول (۱) و درصد کوارتز و RQD مطابق جدول (۲) دسته‌بندی و کدگذاری شده‌اند. خروجی شبکه نرخ نفوذ و بر حسب سانتی‌متر بر دور تاج حفار است، علت محاسبه نرخ نفوذ بر حسب سانتی‌متر بر دور تاج حفار، حذف اثر سرعت چرخش تاج حفار بر نرخ نفوذ است. برای آموزش و ارزیابی شبکه از بانک اطلاعاتی که به این منظور ایجاد شده، استفاده شده است [۸].

برای این‌که شبکه به اهمیت داده‌های نادر نیز پی ببرد، این قبیل داده‌ها چندین مرتبه به شبکه ارائه می‌شوند. به این منظور فراوانی داده‌های نادر در بانک اطلاعاتی اولیه اصلاح شده است. تعداد اعضای بانک اطلاعاتی اصلاح شده ۲۵۱ عدد است که ۲۰۰ عضو برای آموزش و ۵۱ عضو برای ارزیابی شبکه استفاده می‌شود. داده‌های بانک اطلاعاتی به صورت تصادفی به مجموعه‌های آموزش و ارزیابی تقسیم شده است. کلیه شبکه‌ها در این تحقیق دارای یک لایه میانی و یک لایه خروجی هستند. توابع

انتقال به کار رفته در لایه میانی و خروجی تابع tansig است. چون در فرایند آموزش وزن‌های اولیه به صورت تصادفی مقداردهی شده و احتمال دارد شبکه در کمینه محلی^۷ گرفتار شود هر شبکه چندین بار (۲۰ مرتبه) مورد آموزش قرار گرفته و بهترین نتیجه ملاک عمل واقع گردیده است. برای پیش‌بینی نرخ نفوذ سه مدل متفاوت بررسی شده، که در ادامه شرح داده می‌شود.

شبکه عصبی با شش ورودی

ورودی شبکه عصبی در این حالت شامل نوع سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوره، درصد کوارتز، قطر دیسک، نیروی نفوذ هر دیسک و RQD می‌باشد. هر چه تعداد سلولها در لایه میانی بیشتر باشد توان یادگیری شبکه، خطر بیش‌برازشی (شبکه مثال‌های آموزشی را به خاطر سپرده و توان پیش‌بینی شبکه کم می‌شود) و داده‌های مورد نیاز برای آموزش شبکه بیشتر خواهد بود. برای تعیین تعداد سلول‌های بهینه در لایه میانی، تعداد سلول‌های لایه میانی ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ عدد منظور شده است. مقادیر تخمین زده شده نرخ نفوذ توسط شبکه در مقابل مقادیر واقعی نرخ نفوذ برای داده‌های ارزیابی در یک دستگاه مختصات رسم شده است. مقادیر واقعی در محور افقی و مقادیر تخمین زده شده در محور قائم دستگاه مختصات قرار دارند.

جدول ۱: دسته‌بندی و کدگذاری نوع سنگ.

| کد | نوع سنگ |
|----|--|
| ۱ | گل‌سنگ، شیل، مارن، فیلیت، اسلیت، آرژیلیت |
| ۲ | ماسه‌سنگ، لای‌سنگ، کنگلومرا، کوارتزیت |
| ۳ | آهک، چالک، دولومیت، ماربل ^۸ |
| ۴ | آهک‌های کارستی و حساس |
| ۵ | سنگ‌های دگرگونی مانند شیست و گنیس |
| ۶ | سنگ‌های آذرین درشت‌دانه مانند گرانیت و دیوریت |
| ۷ | سنگ‌های آذرین ریزدانه مانند بازالت، توف و آندزیت |

جدول ۲: دسته‌بندی و کدگذاری درصد کوارتز و RQD.

| RQD (%) | ۷۵-۱۰۰ | ۵۰-۷۵ | ۲۵-۵۰ | کمتر از ۲۵ |
|-------------|--------|-------|-------|------------|
| کد | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ |
| درصد کوارتز | ۰-۲۰ | ۲۰-۵۰ | ۵۰-۷۵ | بیش از ۷۵ |
| کد | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ |

۱۲ عدد است. با توجه به این که مجموعه ارزیابی ۵۱ عضو دارد، مطابق جدول (۴) احتمال این که خروجی شبکه $12*1$ با مقدار واقعی نرخ نفوذ کمتر از $0/1$ و $0/15$ سانتی متر بر دور تاج حفار تفاوت داشته باشد به ترتیب $0/29$ ، $0/51$ و $0/67$ است. فراوانی داده‌ها در هر یک از سه باند ذکر شده برای شبکه $12*1$ در شکل (۱) نشان داده شده است.

شبکه عصبی با پنج ورودی

در این حالت دو شبکه بررسی شده است. در شبکه اول RQD و در شبکه دوم درصد کوارتز از پارامترهای ورودی شبکه حذف شده است.

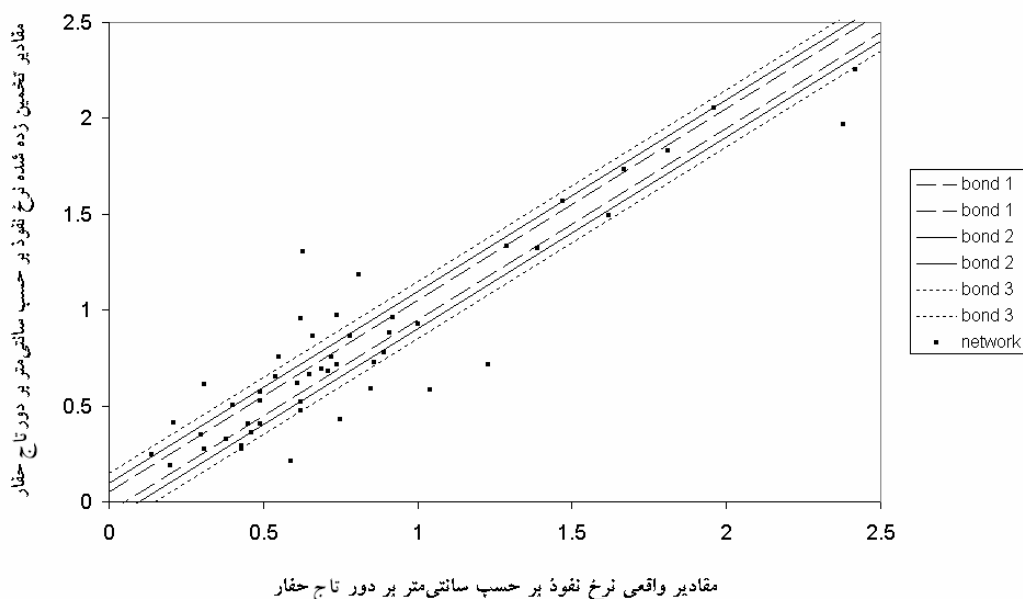
در صورتی که خروجی شبکه با مقادیر واقعی نرخ نفوذ برابر باشد کلیه نقاط بر روی خط $Y=X$ قرار می‌گیرند. میزان انحراف نقاط نسبت به این خط بیانگر میزان تفاوت میان خروجی شبکه و مقادیر واقعی است. برای ارزیابی شبکه‌ها سه باند که در جدول (۳) نمایش داده شده، تعریف شده است. ملاک ارزیابی فراوانی نقاط در هر یک از این سه باند می‌باشد. فراوانی داده‌ها در هر باند نشان می‌دهد که شبکه با چه دقت و احتمالی قادر به پیش‌بینی نرخ نفوذ است. فراوانی داده‌ها در هر یک از باندهای ذکر شده برای شبکه‌های $10*1$ ، $11*1$ ، $12*1$ ، $13*1$ و $14*1$ در جدول (۴) آورده شده است. مطابق جدول (۴) تعداد سلول‌های بهینه در لایه میانی

جدول ۳: تعریف باندهای خطا.

| باند | ۱ | ۲ | ۳ |
|---------------------------------|------------------|-----------------|------------------|
| معادله خط | $Y = X \pm 0.05$ | $Y = X \pm 0.1$ | $Y = X \pm 0.15$ |
| خطا (سانتی متر بر دور کله حفار) | ۰/۰۵ | ۰/۱ | ۰/۱۵ |

جدول ۴: ارزیابی کارایی شبکه با تغییر تعداد سلول‌های لایه میانی.

| تعداد سلول‌های لایه میانی | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ |
|---------------------------|------|------|------|-----|------|
| باند ۱ | ۱۲ | ۱۵ | ۱۵ | ۸ | ۹ |
| باند ۲ | ۲۵ | ۲۰ | ۲۶ | ۱۶ | ۱۴ |
| باند ۳ | ۳۱ | ۲۷ | ۳۴ | ۲۶ | ۲۱ |
| خطای متوسط | ۰/۱۸ | ۰/۱۷ | ۰/۱۶ | ۰/۲ | ۰/۲۴ |



شکل ۱: مقادیر تخمین زده شده نرخ نفوذ در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های ارزیابی.

شبکه اول

ورودی شبکه عصبی در این حالت شامل نوع سنگ، مقاومت فشاری تک محوره، درصد کوارتز، قطر دیسک و نیروی نفوذ هر دیسک می باشد.

برای تعیین تعداد سلول های بهینه در لایه میانی، تعداد سلول های لایه میانی ۱۰، ۱۱ و ۱۲ عدد منظور شده است. فراوانی داده ها (برای مجموعه ارزیابی) در هر یک از باندهای ذکر شده برای شبکه های ۱*۱۰*۵، ۱*۱۱*۵ و ۱*۱۲*۵ در جدول (۵) آورده شده است. با توجه به فراوانی داده ها در هر باند و مقدار متوسط خطا، شبکه ۱*۱۱*۵ شبکه بهینه است.

مطابق جدول (۵) و (۴)، حذف RQD تاثیر زیادی روی کارایی شبکه نداشته و فراوانی داده ها در باند سوم برای هر دو شبکه ۱*۱۲*۶ و ۱*۱۱*۵ برابر با ۳۴ است. RQD هنگامی می تواند برای پیش بینی نرخ نفوذ استفاده شود که در امتداد حفاری برداشت شده باشد، در این حالت افزایش RQD باعث افزایش نرخ نفوذ می شود. داده های مربوط به RQD در بانک اطلاعاتی حاضر به صورت عمومی برداشت شده است.

شبکه دوم

ورودی شبکه عصبی در این حالت شامل نوع سنگ، مقاومت فشاری تک محوره، قطر دیسک، نیروی نفوذ هر دیسک و RQD می باشد.

جدول ۵: ارزیابی کارایی شبکه اول با تغییر تعداد سلول های لایه میانی.

| تعداد سلول های لایه میانی | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ |
|---------------------------|------|------|------|
| باند ۱ | ۱۱ | ۱۴ | ۹ |
| باند ۲ | ۱۹ | ۲۴ | ۱۷ |
| باند ۳ | ۲۹ | ۳۴ | ۲۳ |
| خطای متوسط | ۰/۲۱ | ۰/۱۷ | ۰/۲۱ |

برای تعیین تعداد سلول های بهینه در لایه میانی، تعداد سلول های لایه میانی ۹، ۱۰ و ۱۱ عدد منظور شده است. فراوانی داده ها (برای مجموعه ارزیابی) در هر یک از باندهای ذکر شده برای شبکه های ۱*۹*۵، ۱*۱۰*۵ و ۱*۱۱*۵ در جدول (۶) آورده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود شبکه ۱*۱۰*۵ شبکه بهینه است.

مطابق این جدول و جدول (۴)، با توجه به فراوانی داده ها در باند سوم و خطای متوسط، حذف درصد کوارتز باعث افت کارایی شبکه می شود. لذا درصد کوارتز، بیش از RQD (اگر RQD در امتداد حفاری برداشت نشود) بر روی کارایی شبکه تاثیر می گذارد.

جدول ۶: ارزیابی کارایی شبکه دوم با تغییر تعداد سلول های لایه میانی.

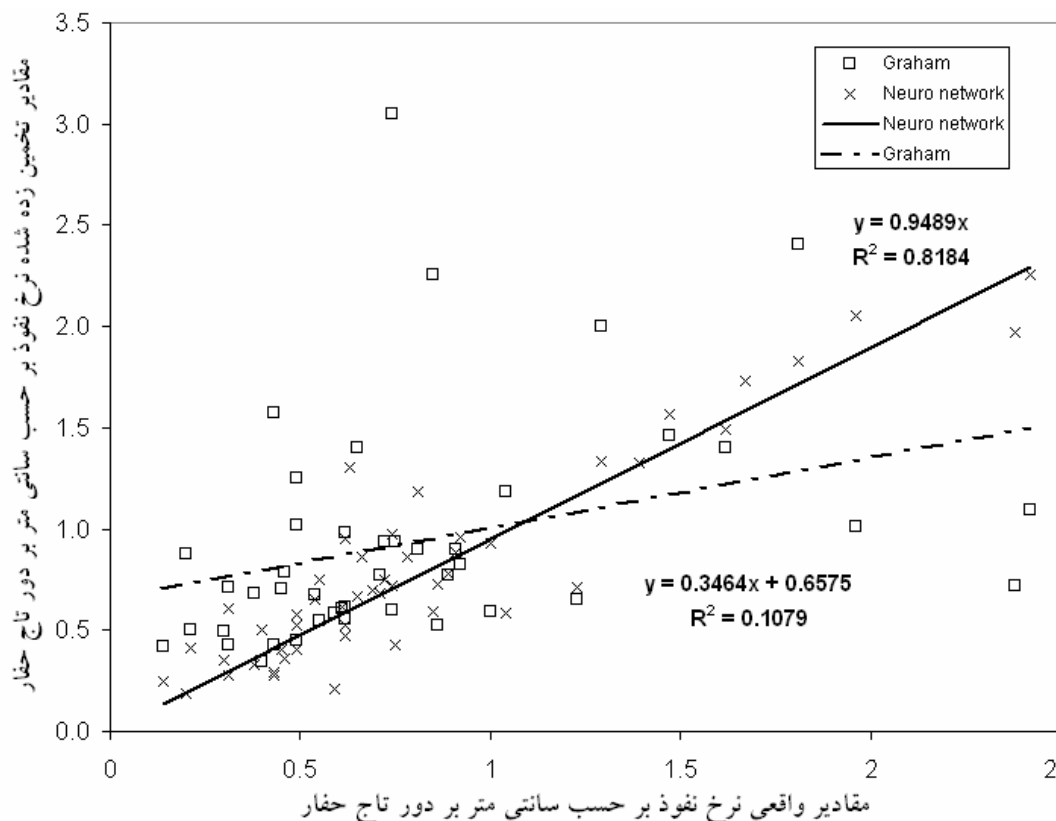
| تعداد سلول های لایه میانی | ۹ | ۱۰ | ۱۱ |
|---------------------------|------|-----|------|
| باند ۱ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۲ |
| باند ۲ | ۱۶ | ۲۳ | ۲۰ |
| باند ۳ | ۲۲ | ۲۸ | ۲۴ |
| خطای متوسط | ۰/۲۱ | ۰/۲ | ۰/۲۱ |

مقایسه شبکه عصبی با روش گراهام

برای مشخص شدن توانایی شبکه عصبی در پیش بینی نرخ نفوذ، نرخ نفوذ پیش بینی شده توسط شبکه عصبی با نرخ نفوذ پیش بینی شده توسط روش گراهام (۱۹۷۶) مقایسه شده است. نتیجه این مقایسه در شکل (۲) نمایش داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود خروجی شبکه عصبی هماهنگی بیشتری با مقادیر واقعی دارد. ضریب همبستگی میان مقادیر پیش بینی شده و واقعی برای شبکه عصبی ۰/۸۲ و برای مدل گراهام ۰/۱۱ است.

پیش بینی نرخ نفوذ TBM در تونل انتقال آب گاوشان

تونل انتقال آب گاوشان به طول ۲۱۱۸۰ متر در ۳۸ کیلومتری جنوب شهر سنندج واقع شده، که حدود ۹۷۹۲ متر آن توسط TBM باز به قطر ۵/۵ متر حفاری می شود. سنگ های میزبان تونل در قطعه ای که توسط TBM حفاری می شود شامل توده افیولیتی با کیفیت خوب تا متوسط و دیاباز با کیفیت خوب تا عالی است. سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح تونل بوده و میزان آب ورودی به تونل قابل توجه است. پارامترهای ورودی شبکه عصبی به شرح زیر است:



شکل ۲: مقایسه مقادیر تخمین زده شده نرخ نفوذ توسط شبکه عصبی و روش گراهام با مقادیر واقعی.

مقایسه با RQD تاثیر بیشتری بر روی کارایی شبکه عصبی می‌گذارد. احتمال اینکه خروجی شبکه عصبی $1\% \times 12\% \times 6\%$ با مقدار واقعی نرخ نفوذ کمتر از 0.05 ، 0.1 و 0.15 سانتی‌متر بر دور تاج حفار تفاوت داشته باشد به ترتیب 0.29 ، 0.51 و 0.67 است. این مقادیر برای مدل گراهام به ترتیب 0.18 ، 0.29 و 0.4 است. ضریب همبستگی میان مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی برای شبکه عصبی 0.82 و برای مدل گراهام 0.11 است. شبکه عصبی نرخ نفوذ TBM تونل گاوشان را $3/8$ متر بر ساعت و مدل گراهام $6/7$ متر بر ساعت تخمین می‌زند. پارامترهایی که بر روی نرخ نفوذ تاثیر می‌گذارد اکثراً در رده پارامترهای ماشین و ماده سنگ قرار دارند.

نوع سنگ: سنگهای آذرین ریزدانه (گروه ۷)، RQD: ۷۵-۵۰ درصد، درصد کوارتز: ۵۰-۲۰ درصد، مقاومت فشاری تک‌محوره: ۷۰ مگاپاسگال، نیروی نفوذ هر دیسک: ۲۰۰ کیلونیوتن و قطر دیسک: ۱۷ اینچ
شبکه عصبی مقدار نرخ نفوذ را 0.627 سانتی‌متر بر دور تاج حفار تخمین زده است. با توجه به سرعت چرخش تاج حفار (۱۰ دور در دقیقه) نرخ نفوذ برابر با $3/8$ متر بر ساعت است. روش گراهام مقدار نرخ نفوذ را $6/7$ متر بر ساعت تخمین می‌زند.

نتایج

مطابق شبکه‌های عصبی ساخته شده درصد کوارتز در

مراجع

- Farmer, I. W. and Glossop, N. H. (1980). "Mechanics of disc cutter penetration." *Tunnels and Tunneling*, Vol. 12, No. 6, PP. 22-25.
- Tarkoy, P. J. "Prediction TBM penetration rates in selected rock types." *Proceedings, Ninth Canadian Rock Mechanics Symposium*, Montreal.

- 3 - Graham, P. C. (1976). "Rock exploration for machine manufactures." *Proceedings, Symposium on Exploration for rock engineering*, Johannesburg, Balkema, Vol. 1, PP. 80-173.
- 4 - Cassinelli, F. et al., (1982). "Power consumption and metal wear in tunnel boring machines, analysis of tunnel operation in hard rock." *Proceedings, Tunneling 82*, London, IMM, PP. 73-81.
- 5 - Lislerud, A. et al., (1983). "Hard rock tunnel boring." *Project Rep 1-83, Univ. Trondheim, Norwegian Institute of Technology, Division Construction Engineering*, PP.159.
- 6 - Bamford, W. E. (1984). "Rock test indices are being successfully correlated with tunnel boring machine performance." *Proceedings, Fifth Australian Tunneling Conference*, Sydney, PP. 218-221.

- ۷ - حسنی پاک، ع. ا. و شرف‌الدین، م. "تحلیل داده‌های اکتشافی." انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۸۰).
- ۸ - مهدوری، س. "پیش‌بینی ضریب بهره‌وری TBM های باز." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، (۱۳۸۲).

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Advance Rate (AR)
- 2 - Rate Of Penetration (ROP)
- 3 - NTH
- 4 - Thrust
- 5 - Cone Indentor Index
- 6 - Feed-Forward Networks
- 7 - Local Minima
- 8 - Marble