

## پیش‌بینی ضریب بهره‌وری ماشین‌های حفر تونل بدون سپر

مهدی یاوری<sup>۱</sup>؛ سعید مهدوری<sup>۲</sup>

۱- دانشگاه تهران

۲- دانشگاه صنعتی اصفهان، Smahdevari@cc.iut.ac.ir

(دریافت ۱۷ اردیبهشت ۱۳۸۶، پذیرش ۷ مهر ۱۳۸۶)

### چکیده

در این مقاله ابتدا روش‌های پیش‌بینی ضریب بهره‌وری CSM و NTH به عنوان سردسته‌های روش‌های تجربی و تئوری تجربی مرور شده است.

سپس ضمن بررسی ساختار بانک اطلاعاتی استفاده شده جهت پیش‌بینی ضریب بهره‌وری، پارامترهای موثر بر ضریب بهره‌وری معرفی شده است. با استفاده از تحلیل آماری دو متغیره و چند متغیره معادلاتی برای تعیین ضریب بهره‌وری ارائه و بر روی نتایج حاصل از این معادلات بحث شده است. در ادامه با بهره‌گیری از شبکه عصبی، مناسب‌ترین شبکه برای تخمین ضریب بهره‌وری تعیین و توانایی شبکه در پیش‌بینی ضریب بهره‌وری با مقایسه آن با تحلیل آماری چند متغیره و مقادیر واقعی ضریب بهره‌وری، مورد بررسی قرار گرفته است. پیش‌بینی ضریب بهره‌وری TBM تونل گاوشان با استفاده از شبکه عصبی، بخش پایانی این تحقیق را تشکیل می‌دهد.

### کلمات کلیدی

ضریب بهره‌وری، TBM‌های باز، تحلیل آماری، شبکه عصبی، تونل گاوشان

## ۱- مقدمه

برای یک مقدار معین نفوذ و متعاقباً تعیین رانش<sup>۷</sup>، گشتاور و توان لازم برای پیشانی برشی<sup>۸</sup> بر مبنای این نیروها است. مقادیر تخمین زده شده با نیروی پیشروی و توان ماشین موجود مقایسه شده و حداکثر نرخ نفوذ قابل دستیابی برای آن ماشین در زمینی با مقاومت معین محاسبه می‌شود. نرخ نفوذ محاسبه شده با توجه به فراوانی درزه‌ها و تأخیرهای ناشی از تعویض دیسک‌ها، جلو راندن ماشین، جریان آب زیرزمینی، خدمات رسانی، حمل مواد حاصل از حفاری، تعمیرات، نقشه‌برداری، نگهداری تونل و تأخیرات نیروی انسانی مانند تأخیر ناشی از تعویض شیفت و صرف غذا، اصلاح شده و نرخ پیشروی و ضریب بهره‌وری محاسبه می‌شود [۲].

## ۱-۲-۲- NTH روش

در این روش پارامترهای نیروی نفوذ هر دیسک، سرعت چرخش پیشانی برشی، فاصله‌داری دیسک‌ها، توان ماشین، شاخص عمر دیسک<sup>۹</sup>، شاخص نرخ حفاری<sup>۱۰</sup>، درزه‌ها و شکستگی‌ها منظور می‌شوند. شاخص نرخ حفاری و شاخص عمر دیسک با استفاده از آزمون‌های سایش، سیورز<sup>۱۱</sup>، تردی<sup>۱۲</sup> و روابط و نمودارهای مربوطه به دست می‌آیند. نرخ نفوذ، با توجه به شاخص نرخ حفاری، نیروی نفوذ هر دیسک، قطر دیسک، فاصله میان دیسک‌ها و درزه‌های توده سنگ محاسبه شده و سپس با توجه به تعداد دیسک‌های تعویض شده، زمان جلو راندن ماشین، تأخیرات ناشی از خرابی ماشین، زمان مورد نیاز جهت تعمیرات سیستم پشتیبانی و تأخیرات متفرقه تعدیل شده و نرخ پیشروی و ضریب بهره‌وری محاسبه می‌شود [۲].

## ۲- ایجاد بانک اطلاعاتی

پیش‌بینی ضریب بهره‌وری بر اساس بانک اطلاعاتی که از تلفیق مطالعات موردی جمع‌آوری شده توسط نلسون [۳] و نگارنده به دست آمده، انجام شده است. تعداد اعضای بانک اطلاعاتی ۲۰۲ عدد می‌باشد. پارامترهایی که در پیش‌بینی ضریب بهره‌وری بررسی شده‌اند عبارت‌اند از:

قطر تونل، مقاومت فشاری تک‌محوره، نوع سنگ، درصد کوارتز، میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی، RQD، قطر دیسک و نیروی نفوذ و غلطشی هر دیسک

در بانک اطلاعاتی قطر تونل بر حسب متر، مقاومت فشاری تک‌محوره بر حسب مگاپاسکال، قطر دیسک بر حسب اینچ و نیروی نفوذ و غلطشی هر دیسک بر حسب کیلونیوتن ثبت شده و نوع سنگ، درصد کوارتز، RQD و تغییرات زمین‌شناسی مطابق جداول ۱ و ۲ دسته‌بندی و کدگذاری شده

در گذشته ماشین‌های حفر تونل<sup>۱</sup> فقط در سنگ‌های با مقاومت فشاری متوسط و شرایط زمین‌شناسی یکنواخت قابل کاربرد بودند ولی امروزه با توسعه تکنولوژی، دامنه کاربرد این ماشین‌ها وسیع‌تر و نرخ پیشروی<sup>۲</sup> آنها بیشتر شده است. یکی از عوامل تعیین‌کننده روش حفر تونل (آتش‌کاری یا مکانیزه)، مدت زمان حفر تونل است. در روش سنتی، زمان حفر تونل تابع پیشروی در یک سیکل آتشکاری است و در روش حفر مکانیزه مدت زمان حفر تونل را نرخ پیشروی ماشین تعیین می‌کند. نرخ پیشروی برابر با حاصل ضرب نرخ نفوذ<sup>۳</sup> در ضریب بهره‌وری<sup>۴</sup> است. نرخ نفوذ، نرخ پیشروی آنی ماشین و تابعی از ویژگی‌های سنگ و ماشین است.

## ۱-۲-۲- ضریب بهره‌وری

ضریب بهره‌وری نسبت زمان حفر ماشین به دوره زمانی است که ماشین در دسترس است. این دوره زمانی می‌تواند بخشی از شیفت، ماه یا سال باشد. علاوه بر پارامترهای سنگ و ماشین، شرایط زمین‌شناسی، مدیریت پروژه و تجربه کارگران نیز بر روی ضریب بهره‌وری تأثیر می‌گذارد. مدل‌هایی که برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری ارائه شده است را می‌توان در دو گروه روش‌های کاملاً تجربی و روش‌های تئوری/تجربی قرار داد. گروه اول بر مبنای داده‌های جمع‌آوری شده از زمین و استفاده از تحلیل رگرسیون میان پارامترهای ماشین، خواص سنگ و نرخ نفوذ حاصل شده‌اند. روش NTH یک نمونه از این روش‌ها است.

گروه دیگر بر جزئیات فرایند برش در سنگ، تحلیل نظری فرایند شکست سنگ با ابزار مکانیکی و نیروهای وارد بر هر دیسک به منظور دستیابی به یک نرخ نفوذ مشخص متمرکز شده‌اند. روش CSM<sup>۵</sup> در این گروه قرار می‌گیرد.

قابل ذکر است که در هیچ کدام از این روش‌ها ضریب بهره‌وری به طور مستقیم تعیین نشده است بلکه ابتدا نرخ نفوذ محاسبه می‌شود، سپس نرخ نفوذ با توجه به تأخیرهای ثابت و متغیر تعدیل شده و نرخ پیشروی تعیین می‌شود. با داشتن نرخ نفوذ و نرخ پیشروی می‌توان ضریب بهره‌وری را محاسبه کرد. در این تحقیق سعی شده که رابطه‌ای مستقیم میان ضریب بهره‌وری و پارامترهای موثر بر آن ارائه شود.

## ۱-۲-۱- روش CSM

این مدل توسط انستیتو مهندسی حفاری معدن کلرادو ارائه شده است. فلسفه این روش تعیین نیروهای وارد بر دیسک<sup>۶</sup>

توسط یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر ضریب بهره‌وری محدود شد که در برخی از موارد منجر به دستیابی به نتایج خوبی شد. به عنوان مثال ضریب بهره‌وری برحسب قطر تونل برای سنگ‌های با مقاومت فشاری ۱۲۰-۱۱۰ مگاپاسگال در شکل ۱ نمایش داده شده است.

همانگونه که ملاحظه می‌شود، ضریب بهره‌وری با افزایش قطر تونل ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. علت افزایش ضریب بهره‌وری با افزایش قطر تونل می‌تواند سهولت در خدمات‌رسانی با افزایش قطر تونل و علت کاهش آن مشکلات ناشی از نگهداری تونل با افزایش قطر تونل باشد.

### ۳-۲- مرحله دوم

در این مرحله ترکیب‌های مختلف ۹، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴ و ۳ پارامتری از پارامترهای: قطر تونل، نوع سنگ، مقاومت فشاری، درصد کوارتز، تغییرات شرایط زمین‌شناسی، نیروی نفوذ هر دیسک، قطر دیسک، نیروی غلطشی هر دیسک و RQD، توسط معادلات چندجمله‌ای، نمایی و لگاریتمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این میان دو مدل توانستند بیشترین ضریب همبستگی را به خود اختصاص دهند که در ادامه به شرح آنها پرداخته خواهد شد.

است. شرایط زمین‌شناسی خیلی متغیر بیانگر وجود گسل، چین‌خوردگی و سنگ‌های هوازده در تونل است. شرایط زمین‌شناسی متغیر معمولاً در سنگ‌های دگرگونی و چین‌خورده دیده می‌شود و شرایط زمین‌شناسی یکنواخت بیانگر این است که تونل فاقد مناطق خردشده و یا هوازده است یا در صورت وجود این مناطق مقدار آنها ناچیز است. این شرایط معمولاً در سنگ‌های گرانیته یا رسوبی کم‌شیب دیده می‌شود.

### ۳-۳- پیش‌بینی ضریب بهره‌وری

پیش‌بینی ضریب بهره‌وری در سه مرحله انجام شده است.

- الف) تحلیل آماری دو متغیره  
ب) تحلیل آماری چند متغیره  
ج) شبکه عصبی

### ۳-۱- مرحله اول

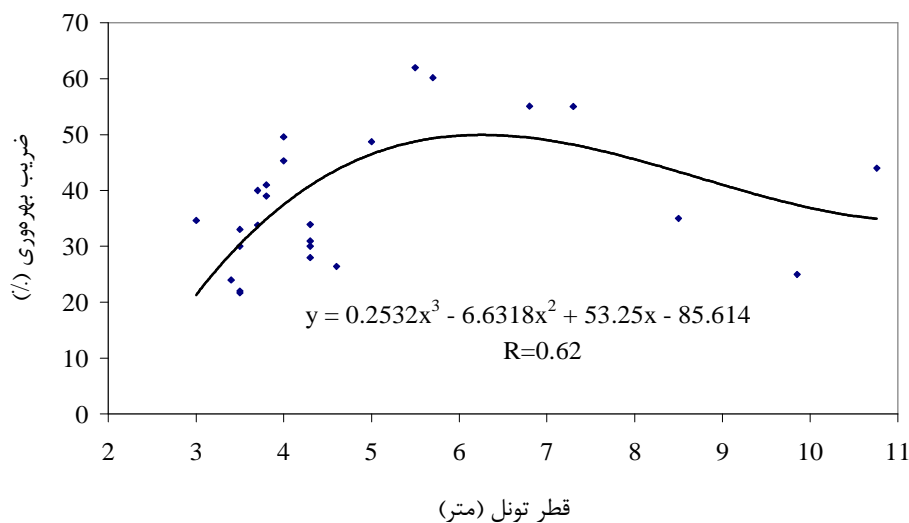
در این مرحله سعی شد با استفاده از تحلیل رگرسیون رابطه‌ای خطی یا غیرخطی میان ضریب بهره‌وری و یکی از پارامترهای مؤثر بر ضریب بهره‌وری به دست آید اما ضرایب همبستگی به دست آمده بسیار ضعیف بود، لذا به منظور افزایش ضریب همبستگی دامنه تغییرات هر یک از پارامترها

جدول ۱: دسته‌بندی و کدگذاری نوع سنگ در بانک اطلاعاتی

کد	نوع سنگ
۱	گل سنگ، شیل، مارن، فیلیت، اسلیت، آرژیلیت
۲	ماسه‌سنگ، لای‌سنگ، کنگلومرا، کوارتزیت
۳	آهک، گل سفید، دولومیت، مرمر (Marble)
۴	آهکهای کارستی و مستعد انحلال
۵	سنگهای دگرگونی مانند شیست و گنیس
۶	سنگهای آذرین درشت‌دانه مانند گرانیته و دیوریت
۷	سنگهای آذرین ریزدانه مانند بازالت، توف و آندزیت

جدول ۲: دسته‌بندی و کدگذاری RQD، درصد کوارتز و تغییرات زمین‌شناسی

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
میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی	یکنواخت	متغیر	خیلی متغیر	
کد	۱	۲	۳	



شکل ۱: ضریب بهره‌وری برحسب قطر تونل برای سنگ‌های با مقاومت فشاری ۱۲۰-۱۱۰ مگاپاسگال

### ۳-۲-۱- مدل اول

پارامترهای ورودی این مدل عبارت‌اند از: قطر تونل، تغییرات شرایط زمین‌شناسی، نوع سنگ، درصد کوارتز و مقاومت فشاری تک‌محوره برای سادگی نمایش معادله حاصل از تحلیل آماری هر کدام از پارامترها با اندیس‌های زیر جایگزین شده است. D: قطر تونل، R: نوع سنگ، C: مقاومت فشاری تک‌محوره، Q: درصد کوارتز، G: تغییرات شرایط زمین‌شناسی و U: ضریب بهره‌وری

معادله حاصل از تحلیل آماری به صورت معادله ۱ است.

به منظور بررسی این مدل ضریب بهره‌وری برحسب درصد کوارتز برای انواع سنگ‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است. برای رسم این نمودار مقاومت فشاری تک‌محوره ۱۰۰ مگاپاسگال، تغییرات شرایط زمین‌شناسی یکنواخت و قطر تونل ۴/۷ متر (متوسط مقادیر بانک اطلاعاتی) منظور شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود افزایش درصد کوارتز تا ۵۰ درصد بر ضریب بهره‌وری تأثیر نمی‌گذارد ولی زمانی که از ۵۰ درصد تجاوز می‌کند به سرعت باعث افت ضریب بهره‌وری می‌شود.

### ۳-۲-۲- مدل دوم

پارامترهای ورودی این مدل عبارت‌اند از: قطر تونل، تغییرات شرایط زمین‌شناسی، درصد کوارتز، نوع سنگ و نیروی نفوذ هر دیسک برای سادگی نمایش معادله حاصل از تحلیل آماری هر کدام از پارامترها با اندیس‌های زیر جایگزین شده است.

D: قطر تونل، R: نوع سنگ، Q: درصد کوارتز، G: تغییرات شرایط زمین‌شناسی، T: نیروی نفوذ هر دیسک و U: ضریب بهره‌وری

معادله حاصل از تحلیل آماری به صورت معادله ۲ است.

با استفاده از معادله حاصل شده و منظور کردن نیروی نفوذ هر دیسک ۲۰۰ کیلو نیوتن، درصد کوارتز ۲۰-۰ درصد و نوع سنگ گروه ۱، ضریب بهره‌وری برحسب قطر تونل برای شرایط زمین‌شناسی متغیر و خیلی‌متغیر در شکل ۳ نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که در شرایط زمین‌شناسی متغیر و خیلی‌متغیر با افزایش قطر تونل ضریب بهره‌وری کاهش می‌یابد و روند کاهش ضریب بهره‌وری در شرایط زمین‌شناسی خیلی‌متغیر سریع‌تر است. علت کاهش ضریب بهره‌وری می‌تواند افزایش مشکلات ناشی از نگهداری تونل در شرایط زمین‌شناسی متغیر و خیلی متغیر باشد.

### ۳-۳-۳- مرحله سوم

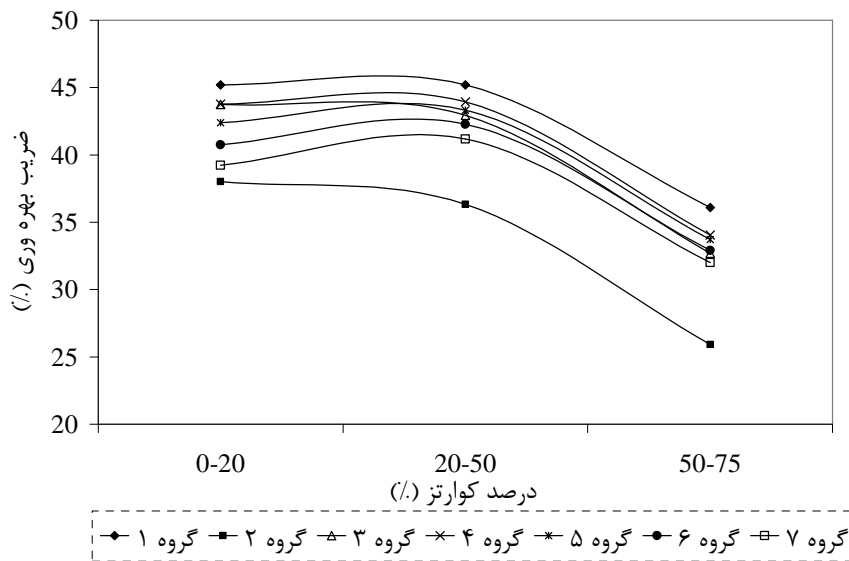
#### ۳-۳-۱- مبانی شبکه عصبی

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 پویا و غیرخطی است که از تعداد زیادی واحد پردازش<sup>۱۳</sup> و اتصالات بین واحدهای پردازش تشکیل می‌شود. شبکه عصبی برای حل مسائل سه مرحله را طی می‌کند:

الف: آموزش<sup>۱۴</sup>

ب: ارزیابی<sup>۱۵</sup>

ج: اجرا<sup>۱۶</sup>



شکل ۲: ضریب بهره‌وری برحسب درصد کوارتز

$$U = -190 + \frac{484}{D} + \frac{115}{R} + \frac{902}{C} + \frac{929}{Q} + \frac{44}{G} - \frac{1880}{D^2} - \frac{355}{R^2} - \frac{2.9E4}{C^2} - \frac{1728}{Q^2} + \frac{40}{G^2} - \frac{1E4}{D.R.C.Q} + \frac{1E4}{R.C.Q.G} - \frac{1.1E4}{C.Q.G.D} \quad (1)$$

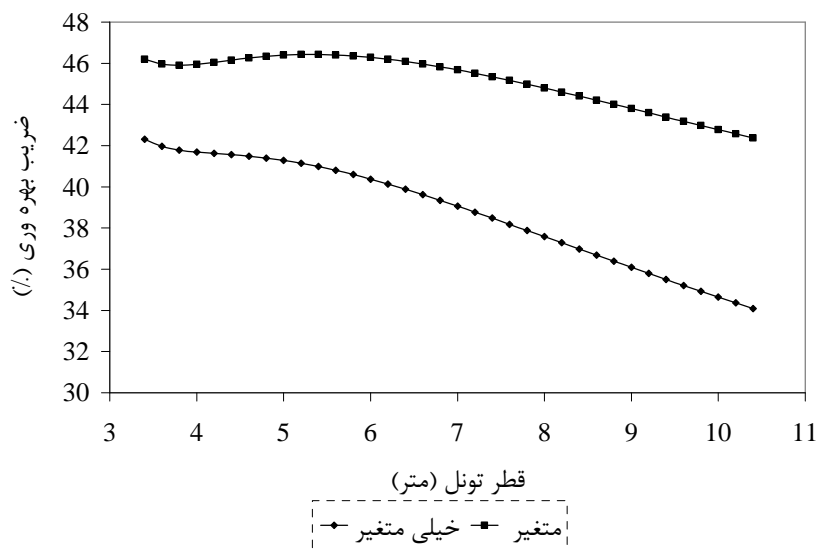
$$- \frac{85}{Q.G.D.R} - \frac{2.3E4}{D.R.C.Q.G} + \frac{2260}{D^3} + \frac{250}{R^3} + \frac{7E4}{C^3} + \frac{956}{Q^3} - \frac{54}{G^3} + \frac{8.2E4}{D^2.R.C.Q} - \frac{5199}{R^2.C.Q.G} + \frac{8.9E4}{D.C^2.Q.G} + \frac{40}{Q^2.G.D.R} + \frac{3760}{D.R.C.G^2}$$

$$U = -185 + \frac{477}{D} + \frac{82}{R} + \frac{880}{Q} + \frac{44}{G} + \frac{7068}{T} - \frac{1859}{D^2} - \frac{279}{R^2} - \frac{1684}{Q^2} + \frac{33}{G^2} + \frac{6.75E5}{T^2} - \frac{8}{D.R.Q.G} + \frac{1.6E4}{R.Q.G.T} + \frac{1.2E4}{Q.G.T.D} + \frac{1000}{G.T.D.R} \quad (2)$$

$$- \frac{4.9E4}{D.R.Q.G.T} + \frac{2343}{D^3} + \frac{198}{R^3} + \frac{956}{Q^3} + \frac{956}{G^3} + \frac{1.8E7}{T^3} + \frac{541}{D^2.R.Q.G} - \frac{9467}{R^2.Q.G.T} - \frac{26550}{D.Q^2.G.T} - \frac{6385}{G^2.T.D.R} + \frac{2.7E6}{D.R.Q.T^2}$$

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<sup>۱۸</sup> می‌نامند. اگر شبکه دارای m گره در لایه ورودی، n<sub>1</sub> گره در لایه پنهان اول، n<sub>2</sub> گره در لایه پنهان دوم و p گره در لایه خروجی باشد، آن را به صورت mn<sub>1</sub>n<sub>2</sub>p نشان می‌دهند. شبکه استفاده شده در این مطالعه از نوع شبکه پیشخور پس‌انتشار<sup>۱۹</sup> 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. [۱]

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<sup>۱۷</sup> 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



شکل ۳: ضریب بهره‌وری بر حسب قطر تونل برای شرایط زمین‌شناسی متغیر و خیلی متغیر

ورودی شبکه عصبی در این حالت شامل پارامترهای زیر می‌شود:

قطر تونل، نوع سنگ، نیروی نفوذ هر دیسک، قطر دیسک، RQD، میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی و درصد کوارتز برای مشخص شدن تعداد سلول‌های لایه بهینه در لایه میانی، تعداد سلول‌های لایه میانی ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ عدد منظور شده است. مقادیر تخمین زده شده ضریب بهره‌وری توسط شبکه در مقابل مقادیر واقعی ضریب بهره‌وری برای داده‌های ارزیابی در یک دستگاه مختصات رسم شده است. مقادیر واقعی<sup>۲۰</sup> در محور افقی و مقادیر تخمین زده شده در محور قائم دستگاه مختصات قرار دارند. در صورتی که خروجی شبکه با مقادیر واقعی ضریب بهره‌وری 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 ۴ باند تعریف شده است (جدول ۳) ملاک ارزیابی شبکه‌ها فراوانی نقاط در هر یک از چهار باند و متوسط خطاها (متوسط تفاوت میان مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده) است. فراوانی داده‌ها در هر باند نشان می‌دهد که شبکه با چه دقت و احتمالی قادر به پیش‌بینی ضریب بهره‌وری است. فراوانی داده‌ها در هر یک از باندهای ذکر شده برای شبکه‌های  $7 \times 10 \times 1$ ،  $7 \times 11 \times 1$ ،  $7 \times 12 \times 1$ ،  $7 \times 13 \times 1$  و  $7 \times 14 \times 1$  در جدول ۴ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود شبکه  $7 \times 12 \times 1$  شبکه بهینه است. فراوانی داده‌ها در باند ۱ و ۴ برای شبکه  $7 \times 12 \times 1$  در شکل ۴ نمایش داده شده است.

### ۳-۳-۲- پیش‌بینی ضریب بهره‌وری با استفاده از شبکه عصبی

پارامترهایی که برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری به عنوان ورودی شبکه بررسی شده‌اند عبارت‌اند از: قطر تونل، نوع سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوره، نیروی نفوذ هر دیسک، قطر دیسک، درصد کوارتز، میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی و RQD خروجی شبکه عصبی ضریب بهره‌وری و بر حسب درصد است. ضرب بهره‌وری در بانک داده‌ها از ۱۰ تا ۶۳ درصد تغییر می‌کند. کلیه شبکه‌های عصبی پیشنهادی با تغذیه پیشرو بوده و دارای یک لایه مخفی و یک لایه خروجی است. توابع انتقال به کار رفته در لایه میانی و خروجی تابع  $tansig$  است. برای اینکه شبکه به اهمیت داده‌های نادر نیز پی ببرد فراوانی داده‌های نادر در بانک اطلاعاتی اصلاح شده است. بانک اطلاعاتی اصلاح شده دارای ۲۷۵ عضو می‌باشد که ۵۵ عضو جهت ارزیابی و ۲۲۰ عضو جهت آموزش شبکه استفاده شده است. تقسیم داده‌های بانک اطلاعاتی به مجموعه‌های آموزش و ارزیابی به صورت تصادفی انجام شده است. هر شبکه چندین مرتبه با مجموعه‌های آموزش و ارزیابی متفاوت تحت آموزش و ارزیابی قرار گرفته و بهترین نتیجه ملاک عمل قرار گرفته است. برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری چهار شبکه متفاوت بررسی شده، که در ادامه شرح داده می‌شوند.

### ۳-۳-۲-الف- شبکه اول

## ۳-۲-۳- شبکه دوم

ورودی شبکه عصبی در این حالت شامل پارامترهای ذیل می‌شود:

قطر تونل، نوع سنگ، نیروی نفوذ هر دیسک، قطر دیسک، مقاومت فشاری تک‌محوره، میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی و درصد کوارتز

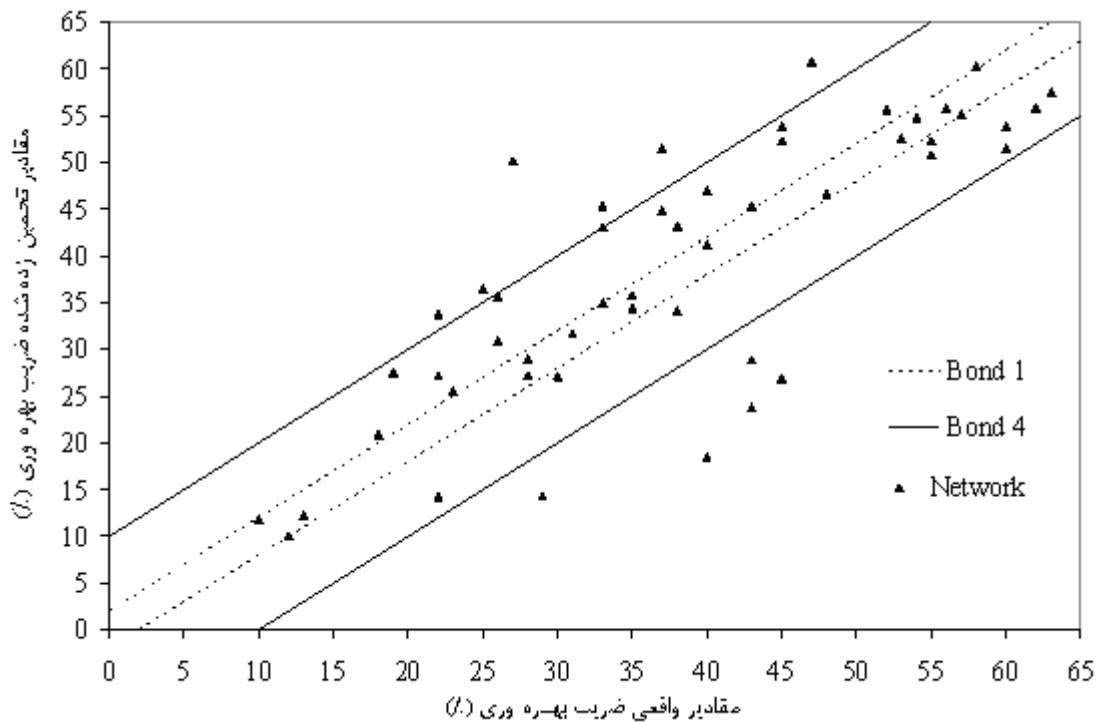
برای مشخص شدن تعداد سلول‌های بهینه در لایه میانی، تعداد سلول‌های لایه میانی ۱۱، ۱۲ و ۱۳ عدد منظور شده است. فراوانی داده‌ها در هر باند برای شبکه‌های  $7 \times 11 \times 1$ ،  $7 \times 12 \times 1$  و  $7 \times 13 \times 1$  در جدول ۵ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود شبکه  $7 \times 12 \times 1$  شبکه بهینه است.

جدول ۳: تعریف باندهای خطا

باند	۱	۲	۳	۴
معادله خط	$Y = X \pm 2$	$Y = X \pm 5$	$Y = X \pm 8$	$Y = X \pm 10$
خطا	۲	۵	۸	۱۰

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

تعداد سلول‌های لایه میانی	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
باند ۱	۱۴	۱۹	۱۹	۱۷	۹
باند ۲	۲۵	۲۸	۳۰	۳۱	۲۲
باند ۳	۳۴	۴۰	۳۹	۳۷	۲۸
باند ۴	۴۳	۴۴	۴۳	۴۳	۴۰
خارج از باند ۴	۱۲	۱۱	۱۲	۱۲	۱۵
خطای متوسط	۷/۳۴	۶/۳۶	۵/۹	۶/۲۲	۶/۸۲

شکل ۴: مقادیر واقعی ضریب بهره‌وری برحسب مقادیر تخمین زده شده برای شبکه  $7 \times 12 \times 1$

جدول ۵: ارزیابی کارایی شبکه دوم با تغییر تعداد سلول‌های لایه میانی  $7 \times 12 \times 1$  و  $7 \times 13 \times 1$  در جدول ۷ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود شبکه  $7 \times 12 \times 1$  شبکه بهینه است.

جدول ۷: ارزیابی کارایی شبکه چهارم با تغییر تعداد سلول‌های لایه میانی

تعداد سلول‌های لایه میانی	۱۱	۱۲	۱۳
باند ۱	۱۳	۹	۸
باند ۲	۲۵	۲۳	۱۸
باند ۳	۳۴	۳۶	۳۲
باند ۴	۳۷	۴۳	۳۸
خارج از باند ۴	۱۸	۱۲	۱۷
خطای متوسط	۸/۴	۶/۹	۸/۱۴

### ۳-۳-۳- مقایسه شبکه‌های ساخته شده

فراوانی داده‌ها در هر باند برای شبکه‌های اول، دوم، سوم و چهارم در جدول ۸ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود کارایی شبکه دوم از بقیه شبکه‌ها بهتر است لذا حذف RQD نسبت به بقیه پارامترها تاثیر کمتری بر روی کارایی شبکه دارد.

جدول ۸: مقایسه شبکه‌های اول، دوم، سوم و چهارم

شبکه	اول	دوم	سوم	چهارم
باند ۱	۱۹	۲۳	۱۶	۹
باند ۲	۳۰	۲۷	۳۱	۲۳
باند ۳	۳۹	۴۴	۳۶	۳۶
باند ۴	۴۳	۴۷	۴۵	۴۳
خارج از باند ۴	۱۲	۸	۱۰	۱۲
خطای متوسط	۵/۹	۵/۰۱	۵/۶۶	۶/۹

شبکه‌های عصبی دیگری با حذف پارامترهای قطر تونل، نیروی نفوذ هر دیسک، تغییرات شرایط زمین‌شناسی و نوع سنگ ساخته شد و کارایی شبکه‌های ساخته شده مورد ارزیابی قرار گرفت. به علت محدود بودن تعداد داده‌های بانک اطلاعاتی امکان آموزش شبکه‌هایی با هشت پارامتر ورودی وجود نداشت، لذا سعی شده با ساختن شبکه‌های متفاوت، پارامتری که کمترین تأثیر را بر روی ضریب بهره‌وری دارد تعیین کرده و از پارامترهای ورودی شبکه حذف گردد. با توجه به شبکه‌های ساخته شده پارامترهای موثر بر ضریب بهره‌وری به ترتیب اهمیت عبارتند از:

جدول ۶: ارزیابی کارایی شبکه سوم با تغییر تعداد سلول‌های لایه میانی

تعداد سلول‌های لایه میانی	۱۱	۱۲	۱۳
باند ۱	۱۷	۲۳	۱۷
باند ۲	۳۳	۳۷	۳۹
باند ۳	۴۲	۴۴	۴۲
باند ۴	۴۴	۴۷	۴۴
خارج از باند ۴	۱۱	۸	۱۱
خطای متوسط	۶/۱۹	۵/۰۱	۵/۸۸

### ۳-۳-۲-ج- شبکه سوم

ورودی شبکه عصبی در این حالت شامل پارامترهای زیر می‌شود:

قطر تونل، نوع سنگ، نیروی نفوذ هر دیسک، RQD، مقاومت فشاری تک‌محوره، میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی و درصد کوارتز برای مشخص شدن تعداد سلول‌های لایه میانی، تعداد سلول‌های لایه میانی ۱۱، ۱۲ و ۱۳ عدد منظور شده است. فراوانی داده‌ها در هر باند برای شبکه‌های  $7 \times 12 \times 1$  و  $7 \times 13 \times 1$  در جدول ۶ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود شبکه  $7 \times 12 \times 1$  شبکه بهینه است.

جدول ۶: ارزیابی کارایی شبکه سوم با تغییر تعداد سلول‌های لایه میانی

تعداد سلول‌های لایه میانی	۱۱	۱۲	۱۳
باند ۱	۱۳	۱۶	۱۶
باند ۲	۳۰	۳۱	۲۳
باند ۳	۳۵	۳۶	۴۰
باند ۴	۴۴	۴۵	۴۶
خارج از باند ۴	۱۱	۱۰	۹
خطای متوسط	۶/۰۴	۵/۶۶	۶/۰۴

### ۳-۳-۲-د- شبکه چهارم

ورودی شبکه عصبی در این حالت شامل پارامترهای زیر می‌شود.

قطر تونل، نوع سنگ، نیروی نفوذ هر دیسک، RQD، مقاومت فشاری تک‌محوره، میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی و قطر دیسک برای مشخص شدن تعداد سلول‌های لایه میانی، تعداد سلول‌های لایه میانی ۱۱، ۱۲ و ۱۳ عدد منظور شده است. فراوانی داده‌ها در هر باند برای شبکه‌های  $7 \times 12 \times 1$  و  $7 \times 13 \times 1$



قطر تونل، نیروی نفوذ هر دیسک، تغییرات شرایط زمین‌شناسی، نوع سنگ، درصد کوارتز، مقاومت فشاری تک‌محوره، قطر دیسک و RQD.

#### ۴. مقایسه شبکه عصبی با تحلیل آماری چند متغیره

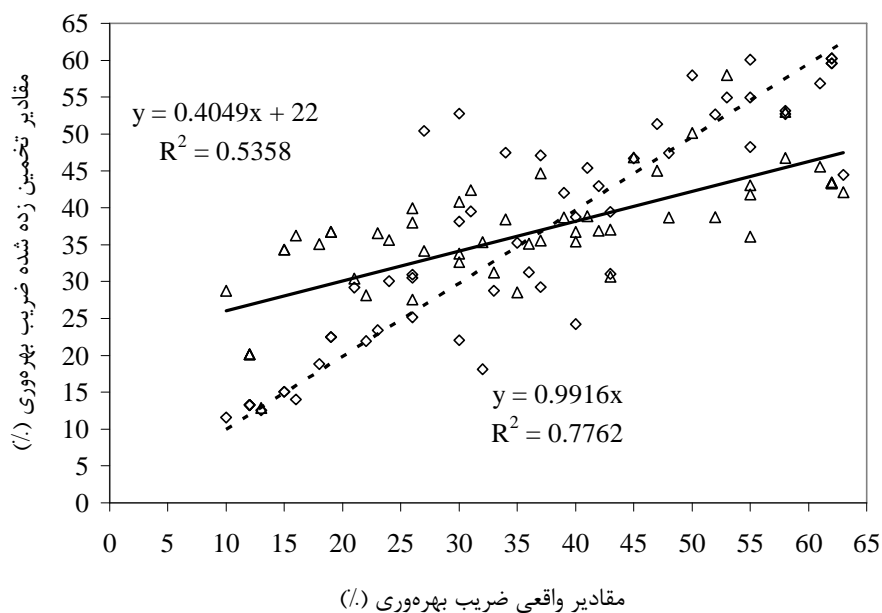
برای مقایسه، مقادیر واقعی ضریب بهره‌وری برحسب تخمین زده شده توسط شبکه عصبی و تحلیل آماری (برای داده‌های ارزیابی) در یک دستگاه مختصات رسم و بر آنها یک خط برازش شده است. هر چه شیب خط برازش شده به یک نزدیک‌تر و ضریب همبستگی میان داده‌ها بیشتر باشد، کارایی بالاتر است. شکل ۵ مقادیر تخمین زده شده ضریب بهره‌وری را برحسب مقادیر واقعی برای شبکه عصبی دوم و مدل آماری اول نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود کارایی شبکه عصبی در پیش‌بینی ضریب بهره‌وری خیلی بهتر است. مطابق شکل ۵ تحلیل آماری چند متغیره تمایل دارد مقادیر ضریب بهره‌وری کمتر از ۳۵ درصد را بیشتر و مقادیر ضریب بهره‌وری بیش از ۳۵ درصد را کمتر تخمین بزند.

#### ۵. پیش‌بینی ضریب بهره‌وری TBM در تونل گاوشان

تونل انتقال آب گاوشان به طول ۲۱۱۸۰ متر در ۳۸ کیلومتری جنوب شهر سنج واقع شده، که حدود ۹۷۹۲ متر آن توسط TBM باز به قطر ۵/۵ متر حفاری می‌شود. سنگ‌های میزبان تونل در قطعه‌ای که توسط TBM حفاری می‌شود 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 ذیل است:

نوع سنگ: سنگ‌های آذرین ریزدانه (گروه ۷)، تغییرات شرایط زمین‌شناسی: متغیر، درصد کوارتز: ۲۰-۵۰ درصد، مقاومت فشاری تک‌محوره: ۷۰ مگاپاسکال، نیروی نفوذ هر دیسک: ۱۸۰ کیلونیوتن و قطر دیسک: ۱۷ اینچ، قطر تونل: ۵/۵ متر

شبکه عصبی مقدار ضریب بهره‌وری را ۲۲ درصد تخمین می‌زند.



— مدل آماری اول    - - - شبکه عصبی    Δ مدل آماری اول    ◇ شبکه عصبی

شکل ۵: مقادیر تخمین زده شده ضریب بهره‌وری برحسب مقادیر واقعی برای داده‌های ارزیابی

## ۶- نتیجه گیری

۱) در سنگ‌های با مقاومت فشاری ۱۱۰-۱۲۰ مگاپاسگال ضریب بهره‌وری با افزایش قطر تونل تا ۶ متر، افزایش و بعد از آن به دلیل مشکلات ناشی از نگهداری تونل کاهش می‌یابد. ضریب همبستگی میان داده‌ها خوب بوده و می‌توان از رابطه حاصل از تحلیل رگرسیون دومتغیره برای برآورد ضریب بهره‌وری در شرایط مذکور استفاده کرد.

۲) تاثیر افزایش درصد کوارتز تا ۵۰ درصد بر ضریب بهره‌وری ناچیز است ولی زمانی که از ۵۰ درصد تجاوز می‌کند به سرعت باعث افت ضریب بهره‌وری می‌شود.

۳) تغییرات ضریب بهره‌وری با تغییر شرایط زمین‌شناسی از حالت یکنواخت به متغیر ناچیز بوده ولی زمانی که شرایط زمین‌شناسی خیلی متغیر باشد ضریب بهره‌وری به طور ناگهانی افت می‌کند.

۴) با استفاده از شبکه عصبی جهت پیش‌بینی ضریب بهره‌وری، امکان بهبود قابلیت مدل‌سازی و رفتارسنجی پارامترهای مختلف وجود دارد. پارامترهای ورودی شبکه‌های ارائه شده شامل قطر تونل، نوع سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوره، نیروی نفوذ هر دیسک، قطر دیسک، درصد کوارتز، میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی و RQD. بوده و نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که کارایی شبکه‌هایی که ۱۲ سلول در لایه میانی دارند نسبت به سایر شبکه‌ها با ۱۱ و ۱۳ سلول در لایه میانی، بهتر است.

۵) بهترین شبکه ارائه شده شامل پارامترهای قطر تونل، نوع سنگ، نیروی نفوذ هر دیسک، قطر دیسک، مقاومت فشاری تک‌محوره، میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی و درصد کوارتز می‌شود و احتمال اینکه خروجی شبکه با مقدار واقعی ضریب بهره‌وری کمتر از ۲، ۵، ۸ و ۱۰ واحد (درصد) تفاوت داشته باشد به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۶۷، ۰/۸۰ و ۰/۸۵ است. این احتمالات، قابلیت شبکه عصبی در تخمین‌های خیلی نزدیک به واقع را نشان می‌دهد.

۶) بر اساس شبکه‌های ساخته شده پارامترهای موثر بر ضریب بهره‌وری به ترتیب اهمیت عبارتند از:

قطر تونل، نیروی نفوذ هر دیسک، تغییرات زمین‌شناسی، نوع سنگ، درصد کوارتز، مقاومت فشاری تک‌محوره، قطر دیسک و RQD.

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که شبکه عصبی قابلیت پیش‌بینی نسبتاً صحیحی از ضریب بهره‌وری ماشین تونل‌بری را برای شرایط مختلف زمین و مشخصات تونل دارا بوده و قابل استفاده در صنعت می‌باشد.

## ۷- منابع

- [۱] حسنی پاک، علی اصغر؛ شرف‌الدین، محمد؛ ۱۳۸۰؛ "تحلیل داده‌های اکتشافی"؛ انتشارات دانشگاه تهران.
- [2] Jamal Rostami; Levent Ozdemir; 1993; "A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMs"; RETC 1993; Chapter 50.
- [3] Ozdemir L; R. Miller; F.D. Wang; 1978; "Mechanical Tunnel Boring Prediction and Machine Design"; Final project Report to NSF APR73-07776-A03; Golden Co.; Colorado School Mines.

- <sup>1</sup> Tunnel Boring Machine  
<sup>2</sup> Advance Rate  
<sup>3</sup> Penetration Rate  
<sup>4</sup> Utilization Factor  
<sup>5</sup> Colorado School of Mines  
<sup>6</sup> Cutter Disc  
<sup>7</sup> Thrust  
<sup>8</sup> Cutter Head  
<sup>9</sup> Cutter Life Index  
<sup>10</sup> Drilling Rate Index  
<sup>11</sup> Sievers'J Value  
<sup>12</sup> Brittleness  
<sup>13</sup> Neuron  
<sup>14</sup> Training  
<sup>15</sup> Validation  
<sup>16</sup> Operation  
<sup>17</sup> Processing Unit  
<sup>18</sup> Hidden Layers  
<sup>19</sup> Feed-Forward Back Prop  
<sup>20</sup> Target