پیش‌بینی ضریب بهره‌وری TBMهای باز

مهدی یاوری[۱] و سعید مهدوری[۲]

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

۲- عضو هیئت علمی دانشکده معدن- دانشگاه صنعتی اصفهان

Mahdevari@yahoo.com

چکیده

در این مقاله ابتدا برخی از روش‌های پیش‌بینی ضریب بهره‌وری مرور شده است. سپس ضمن بررسی ساختار بانک اطلاعاتی استفاده شده جهت پیش‌بینی ضریب بهره‌وری، پارامترهای موثر بر ضریب بهره‌وری معرفی گردیده است. با استفاده از تحلیل آماری دو متغیره و دسته‌بندی داده‌ها، معادلاتی برای تعیین ضریب بهره‌وری بر مبنای یک پارامتر در شرایطی خاص ارائه شده است. در ادامه با بهره‌گیری از تحلیل آماری چند متغیره پارامترهای موثر بر ضریب بهره‌وری بررسی شده و معادلاتی جهت تعیین ضریب بهره‌وری بر مبنای پنج پارامتر موثر بر ضریب بهره‌وری ارائه شده و با استفاده از این معادلات تاثیر برخی از پارامترهای موثر بر ضریب بهره‌وری در قالب نمودارهایی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: ضریب بهره‌وری، TBMهای باز، تحلیل آماری

۱- مقدمه

کاربرد ماشین‌های حفر تونل (Tunnel Boring Machine) به صورت روشی استاندارد در صنعت تونل‌سازی، برای حفر تونل‌های طولانی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده موفقیت‌آمیز از این ماشین‌آلات در پروژه‌های مختلف موجب توسعه کاربری آنها و کسب تجربه‌های زیادی در این زمینه در نقاط مختلف دنیا شده است. انتخاب روش مناسب تونل‌سازی و در نتیجه انتخاب ماشین‌آلات متناسب با این روشها منوط به امکان برآورد سرعت حفاری این ماشین‌آلات است. بدیهی است که در حفاری مکانیزه، ضریب بهره‌وری (Utilization) ماشین زمان تکمیل پروژه و به تبع آن هزینه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و نقش اساسی در انتخاب یا عدم انتخاب حفر مکانیزه به عنوان روش حفر ایفاء می‌کند. لذا پیش‌بینی ضریب بهره‌وری بخش مهمی از هر پروژه حفر مکانیزه است. این ضریب به صورت نسبت زمان حفر ماشین به کل زمان در اختیار بودن ماشین برای حفر یا عملیات روزانه تعریف می‌شود و تابعی از شرایط زمین، نوع ماشین، تأسیسات پشتیبانی، مدیریت

پروژه و در نهایت تجربه پرسنل اجرایی آن است. نرخ پیش‌روی روزانه (Advance Rate) از حاصل‌ضرب نرخ نفوذ (Rate Of Penetration) در ضریب بهره‌وری محاسبه می‌شود. نرخ نفوذ یا نرخ پیش‌روی آنی ماشین تابع ابعاد هندسی تونل، ویژگی‌های سنگ و پارامترهای ماشین می‌باشد.

۲- مطالعات انجام شده در این زمینه

تاکنون تلاش‌های زیادی برای گسترش روشهای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی صورت گرفته و روش‌های گوناگونی توسط کشورها و شرکت‌های مختلف سازنده TBM ارائه شده است. در حالت کلی می‌توان روشهای ارائه شده را به دو گروه روشهای کاملاً تجربی و روشهای تئوری/ تجربی تقسیم کرد. گروه اول بر مبنای داده‌های جمع‌آوری شده از زمین و استفاده از تحلیل رگرسیون میان پارامترهای ماشین، خواص سنگ و نرخ‌نفوذ حاصل شده‌اند. روش NTH (Norwegian Institute Technology) 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 (Colorado School of Mine) در این گروه قرار می‌گیرد[۱].

۲-۱- روش CSM

این مدل را انسیتو مهندسی حفاری معدن کلرادو جهت پیش‌بینی ضریب بهره‌وری TBM بر مبنای ۲۰ سال مطالعات تئوریک، آزمون‌های آزمایشگاهی و ارزیابی داده‌های حاصل از برداشت‌های صحرایی ارائه کرده است. فلسفه این روش تعیین نیروهای وارد بر دیسک (Disc Cutter) برای یک مقدار معین نفوذ و متعاقباً تعیین نیروی پیشروی (Thrust)، گشتاور و توان لازم برای کله‌حفار (Cutter Head) 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 ماشین با مشخصات فنی خاص در زمین با مقاومت معین محاسبه می‌شود. نرخ‌نفوذ محاسبه شده با توجه به فراونی درزه‌ها و تأخیرهای ناشی از تعویض دیسک‌ها، جلو راندن ماشین، جریان آب زیرزمینی، خدمات رسانی، حمل مواد حاصل از حفاری، تعمیرات، نقشه‌برداری و نگهداری تونل و تأخیرات نیروی انسانی مانند تأخیر ناشی از تعویض شیفت و زمان نهار، اصلاح شده و نرخ پیشروی و ضریب بهره‌وری محاسبه می‌شود[۲].

۲-۲- روش NTH

در این روش پارامترهای نیروی نفوذ هر دیسک، سرعت چرخش کله‌حفار، فاصله‌داری دیسک‌ها، توان ماشین، شاخص عمر دیسک (Cutter Life Index)، شاخص نرخ حفاری (Drilling Rate Index)، درزه‌ها و شکستگی‌ها

منظور می‌شود. شاخص نرخ حفاری و شاخص عمر دیسک با استفاده از آزمون‌های سایش (Abrasive Value)، سیورز (Sievers'J Value) و تردی (Brittleness) و روابط مربوطه به دست می‌آیند. نرخ‌نفوذ، 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 جلوراندن 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].

۳- ایجاد بانک اطلاعاتی

پیش‌بینی ضریب بهره‌وری بر اساس بانک اطلاعاتی که از تلفیق مطالعات موردی جمع‌آوری شده توسط نلسون [۳] و نگارندگان 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 فشاری‌تک‌محوره، نوع سنگ، درصد کوارتز، میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی، RQD، قطر دیسک و نیروی نفوذ و غلتشی هر دیسک در بانک اطلاعاتی قطر تونل بر حسب متر، مقاومت فشاری تک‌محوره بر حسب مگاپاسگال، قطر دیسک بر حسب اینچ و نیروی نفوذ و غلتشی 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 است.

جدول ۱- دسته‌بندی و کدگذاری نوع‌سنگ در بانک اطلاعاتی[۴]

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

جدول ۲- دسته‌بندی و کدگذاری RQD، درصد کوارتز و تغییرات زمین‌شناسی[۴]

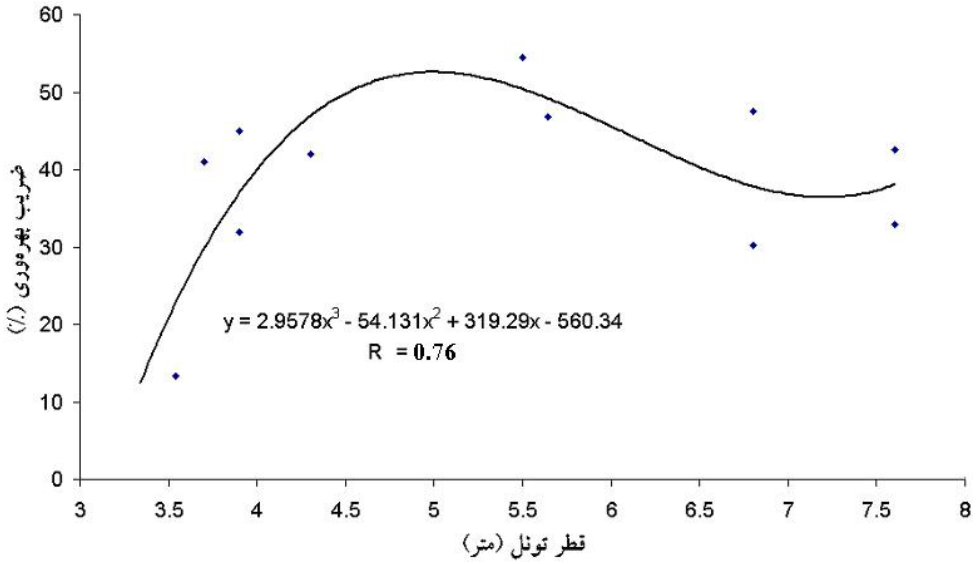
RQD (%)	۱۰۰-۷۵	۷۵-۵۰	۵۰-۲۵	کمتر از ۲۵
کد	۱	۲	۳	۴
درصد کوارتز	۰-۲۰	۲۰-۵۰	۵۰-۷۵	بیش از ۷۵
کد	۱	۲	۳	۴
میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی		یکنواخت	متغیر	خیلی‌متغیر
کد		۱	۲	۳

۴- پیش‌بینی ضریب بهره‌وری

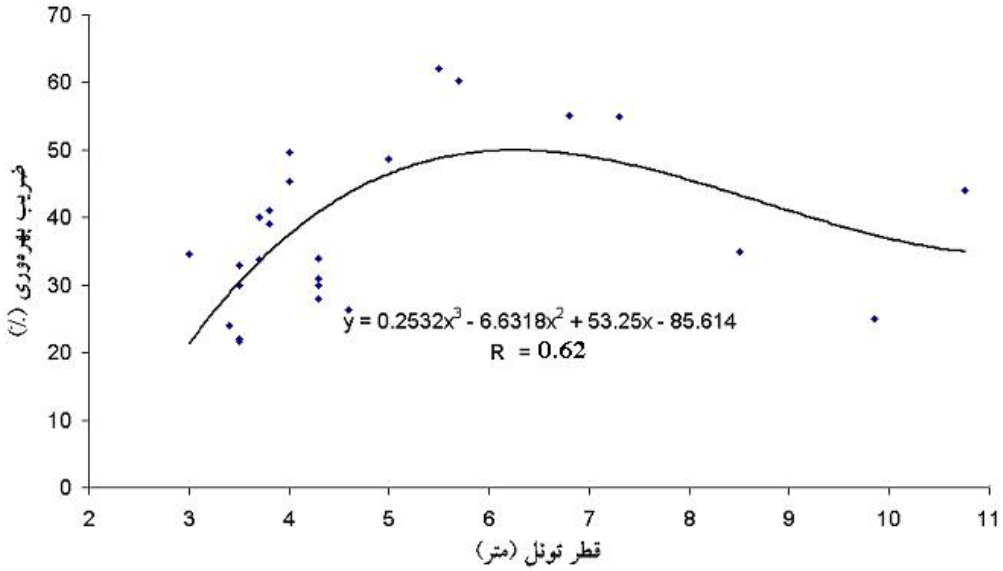
پیش‌بینی ضریب بهره‌وری بر اساس تحلیل آماری بانک اطلاعاتی انجام شده است. تحلیل آماری طی دو مرحله انجام شده که در ادامه شرح داده می‌شود.

۴-۱- مرحله اول: تحلیل آماری

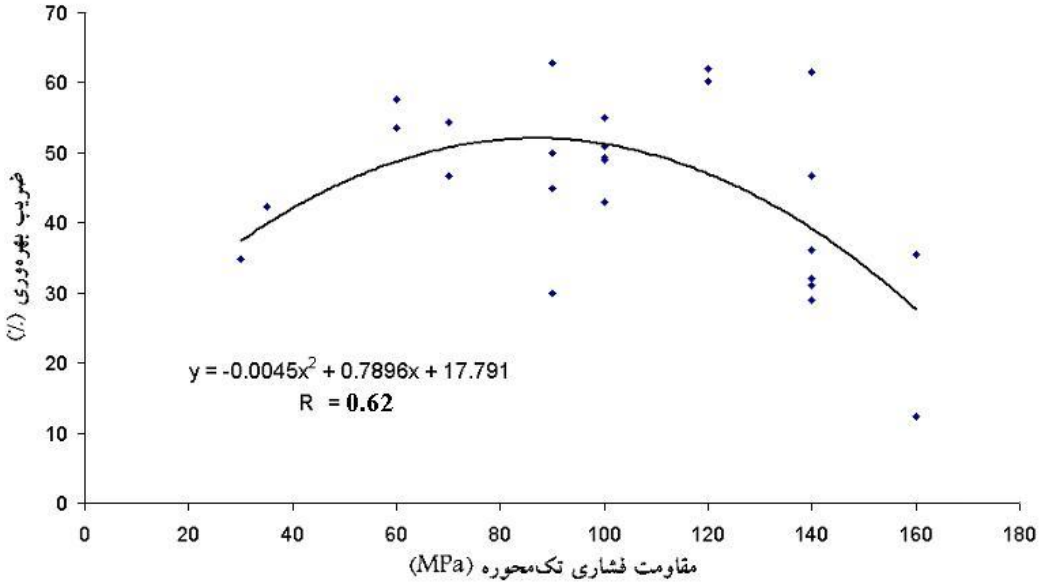
در این مرحله، تغییرات ضریب بهره‌وری در مقابل تغییرات هر یک از پارامترهای قطر تونل، مقاومت فشاری‌تک‌محوره، نوع سنگ، درصد کوارتز، میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی، RQD، قطر دیسک و نیروی نفوذ هر دیسک بررسی شده است. همبستگی میان هر یک از پارامترهای مذکور و ضریب بهره‌وری بسیار ضعیف بود، لذا به منظور افزایش ضریب همبستگی دامنه تغییرات هر یک از پارامترها توسط یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر ضریب بهره‌وری محدود شد که در برخی از موارد منجر به دستیابی به نتایج خوبی گردید. به عنوان مثال ضریب بهروری در مقابل قطر تونل برای سنگ‌های با مقاومت فشاری۶۰-۷۰ و ۱۱۰-۱۲۰ مگاپاسگال در شکلهای ۱ و ۲ 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 باشد. ضریب بهره‌وری در مقابل مقاومت فشاری تک‌محوره برای تونل‌های با قطر ۵-۶ متر در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقاومت فشاری ضریب بهره‌وری افزایش و سپس کاهش می‌یابد. علت افزایش ضریب بهره‌وری می‌تواند، کاهش مشکلات ناشی از نگهداری تونل با افزایش مقاومت فشاری و علت کاهش آن در سنگ‌های با مقاومت فشاری بالا می‌تواند ناشی از زمان تأخیر تعویض دیسک‌ها باشد. در شکل ۴ ضریب بهره‌وری در مقابل تغییرات شرایط زمین‌شناسی برای تونل‌های با قطر ۶-۸ متر نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش میزان تغییرات شرایط زمین‌شناسی ضریب بهره‌وری کاهش می‌یابد.



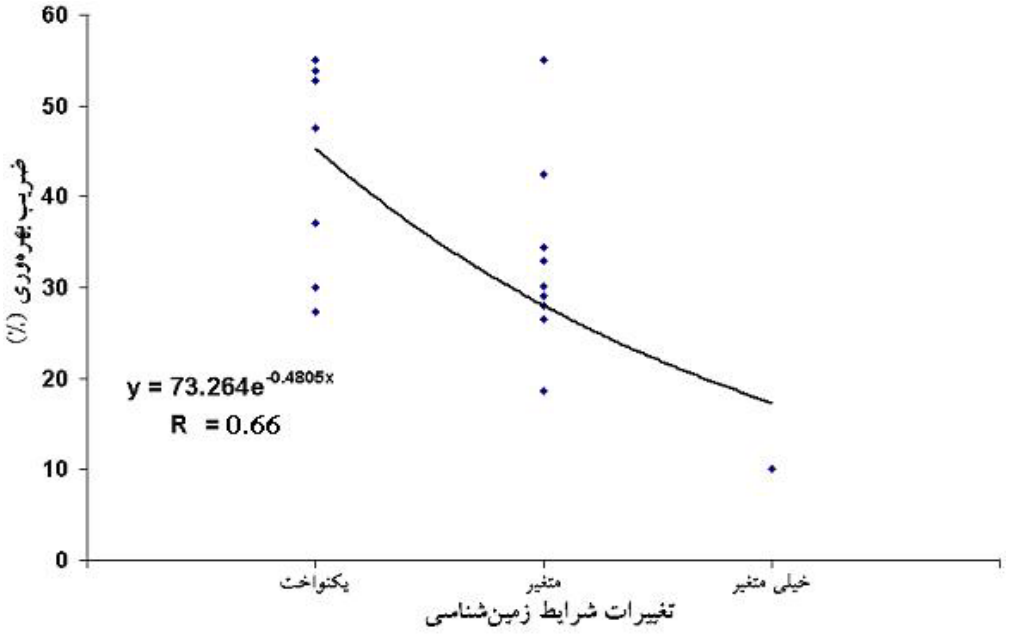
شکل۱- ضریب بهره‌وری در مقابل قطر تونل برای سنگهای با مقاومت فشاری ۶۰-۷۰ مگاپاسگال[۴]



شکل ۲- ضریب بهره‌وری در مقابل قطر تونل برای سنگهای با مقاومت فشاری ۱۲۰-۱۱۰ مگاپاسگال[۴]



شکل ۳- ضریب بهره‌وری در مقابل مقاومت فشاری تک‌محوره برای تونل‌های با قطر ۶-۵ متر[۴]



شکل ۴- ضریب بهره‌وری در مقابل تغییرات شرایط زمین‌شناسی برای تونل‌های با قطر ۶-۸ متر[۴]

۴-۲- مرحله دوم: تحلیل آماری چندمتغیره

پارامترهایی که در این تحلیل بررسی شده‌اند عبارتند از:

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

ترکیب‌های مختلف ۹، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴ و ۳ پارامتری از پارامترهای مذکور توسط معادلات چندجمله‌ای، نمایی و لگاریتمی[۴] مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس تحلیل آماری انجام شده ضریب همبستگی تا مدل‌های پنج پارامتری روند افزایشی داشته و بعد از آن کاهش می‌یابد. علت این موضوع می‌تواند ارتباط متقابل میان پارامترها یا عدم کفایت داده‌های بانک اطلاعاتی برای محاسبه دقیق‌تر ضرایب معادلات ۶، ۷، ۸ و ۹ پارامتری باشد. در مدل‌های با چهار پارامتر و کمتر حذف پارامترهای مؤثر بر ضریب بهره‌وری می‌تواند باعث افت ضریب همبستگی شده باشد. در ادامه دو مدل پنج پارامتری که توانسته‌اند بالاترین ضرایب همبستگی را کسب کنند، بررسی شده است.

۴-۲-۱- مدل اول

پارامترهای ورودی این مدل عبارت‌اند از:

قطر تونل، تغییرات شرایط زمین‌شناسی، درصد کوارتز، نوع سنگ 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 شکل زیر است.

$$R = 0.542 \qquad (۱)$$

$$U = -190 + \frac{484}{D} + \frac{115}{R} + \frac{902}{C} + \frac{929}{Q} + \frac{44}{G} - \frac{1880}{D^2} - \frac{355}{R^2} - \frac{2.9E4}{C^2} - \frac{1728}{Q^2} + \frac{40}{G^2} - \frac{1E4}{D.R.C.Q} + \frac{1E4}{R.C.Q.G} - \frac{1.1E4}{C.Q.G.D} - \frac{85}{Q.G.D.R} - \frac{2.3E4}{D.R.C.Q.G} + \frac{2260}{D^3} + \frac{250}{R^3} + \frac{7E4}{C^3} + \frac{956}{Q^3} - \frac{54}{G^3} + \frac{8.2E4}{D^2.R.C.Q} - \frac{5199}{R^2.C.Q.G} + \frac{8.9E4}{D.C^2.Q.G} + \frac{40}{Q^2.G.D.R} + \frac{3760}{D.R.C.G^2}$$

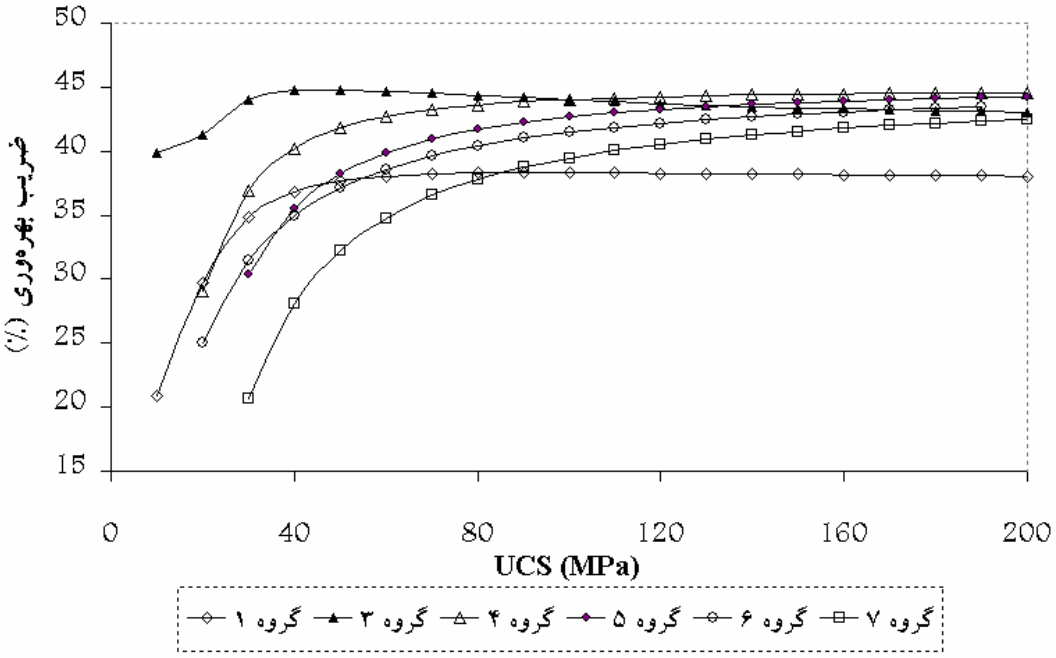
برای بررسی مدل ارائه شده پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوره، تغییرات شرایط زمین‌شناسی، قطر تونل و درصد کوارتز در مقابل ضریب بهره‌وری رسم شده و در ارتباط با روند تغییرات ضریب بهره‌وری بحث شده است.

مقاومت فشاری تک‌محوره

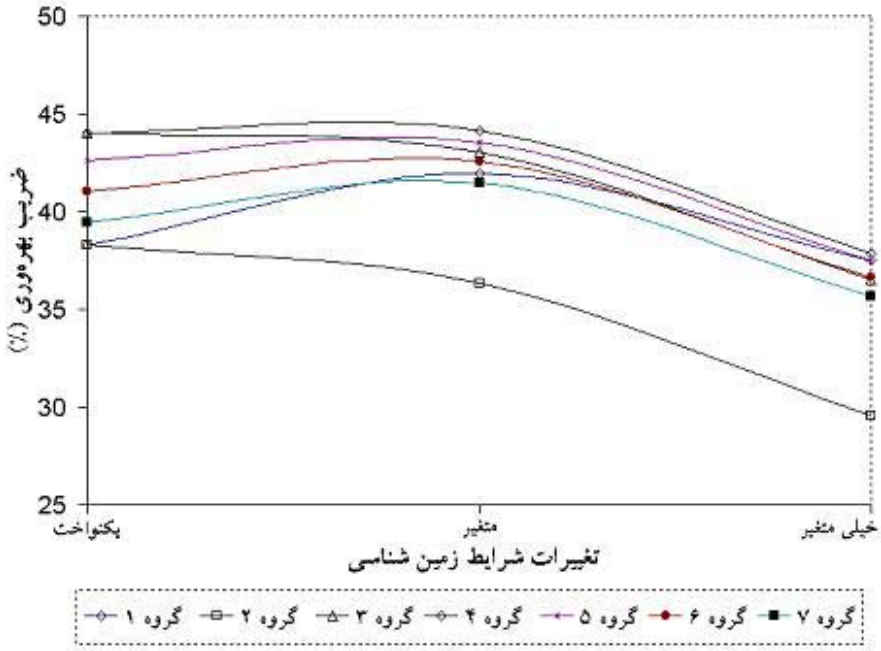
تغییرات ضریب بهره‌وری در مقابل مقاومت فشاری تک‌محوره برای انواع سنگ‌ها در شکل ۵ نمایش داده شده است. برای رسم این نمودار تغییرات شرایط زمین‌شناسی یکنواخت، قطر تونل ۴/۷ متر (متوسط مطابق بانک اطلاعاتی) و درصد کوارتز ۲۰-۰ درصد منظور شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود در تمام گروه سنگ‌ها (به جزء گروه ۲) ضریب بهره‌وری با افزایش مقاومت فشاری تا ۸۰ مگاپاسگال افزایش و بعد از آن تقریباً ثابت مانده است.

تغییرات زمین‌شناسی

ضریب بهره‌وری در مقابل تغییرات شرایط زمین‌شناسی برای انواع سنگ‌ها در شکل ۶ نمایش داده شده است. برای رسم این نمودار مقاومت فشاری تک‌محوره ۱۰۰ مگاپاسگال، قطر تونل ۴/۷ متر و درصد کوارتز ۲۰-۰ درصد منظور شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود در تمام گروه سنگ‌ها تغییرات ضریب بهروری 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.



شکل۵- ضریب بهره‌وری در مقابل مقاومت فشاری تک‌محوره[۴]



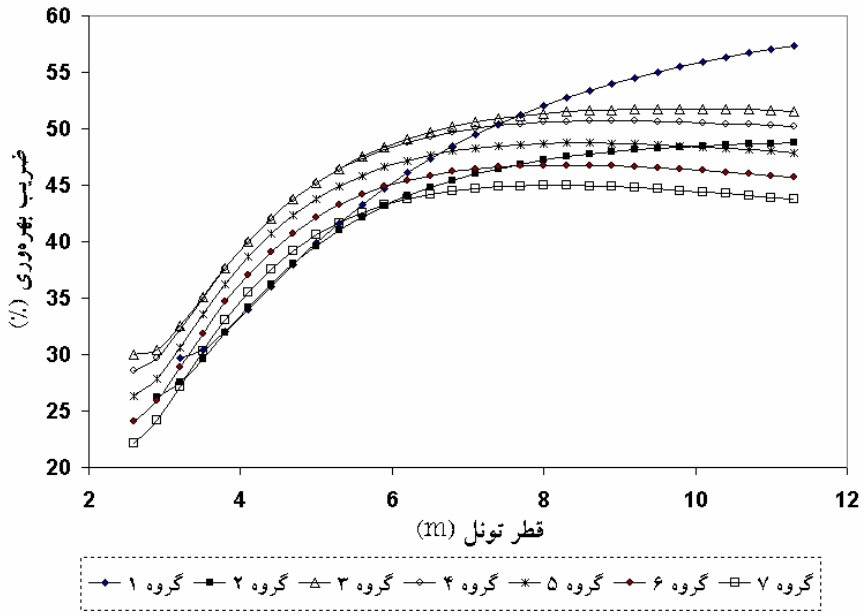
شکل ۶- ضریب بهره‌وری در مقابل تغییرات شرایط زمین‌شناسی[۴]

قطر تونل

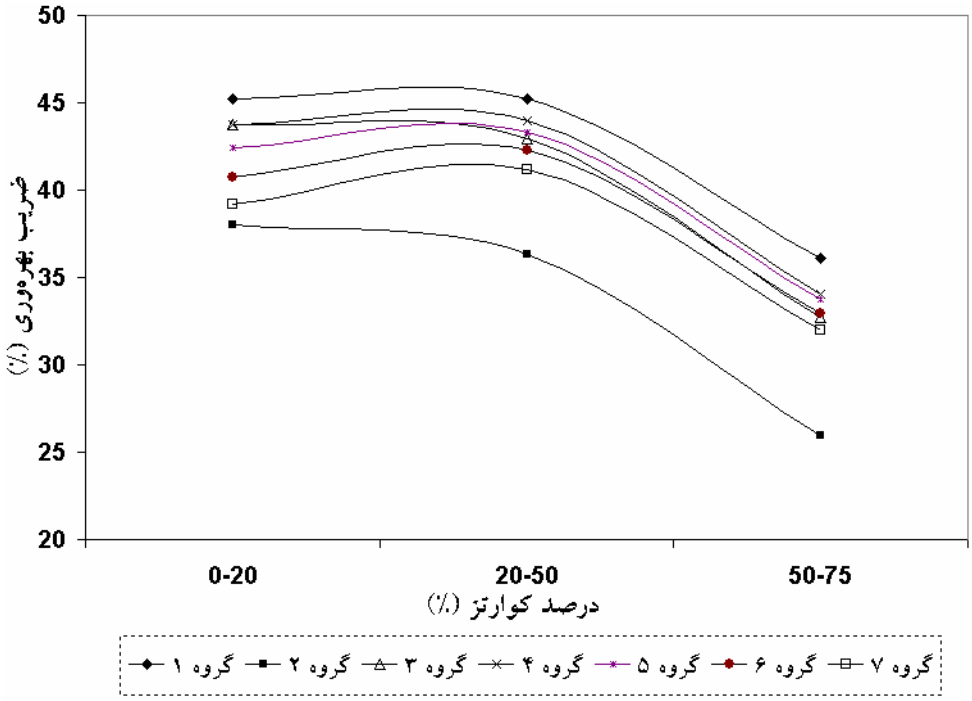
ضریب بهره‌وری در مقابل قطر تونل برای انواع سنگ‌ها در شکل ۷ نمایش داده شده است. برای رسم این نمودار مقاومت فشاری تک‌محوره ۱۰۰ مگاپاسگال، تغییرات شرایط زمین‌شناسی یکنواخت و درصد کوارتز ۲۰-۰ درصد منظور شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش قطر تونل ضریب بهره‌وری تا قطر ۶ متر افزایش یافته و بعد از آن تقریباً ثابت باقی مانده است. علت افزایش ضریب بهره‌وری می‌تواند سهولت در خدمات‌رسانی، ترابری، تهویه، تعویض دیسک‌ها و امکان سرویس ماشین و تأسیسات پشتیبانی با ابزارهای بزرگتر و قوی‌تر با افزایش قطر تونل باشد.

درصد کوارتز

ضریب بهره‌وری در مقابل درصد کوارتز برای انواع سنگ‌ها در شکل ۸ نمایش داده شده است. برای رسم این نمودار مقاومت فشاری تک‌محوره ۱۰۰ مگاپاسگال، تغییرات شرایط زمین‌شناسی یکنواخت و قطر تونل ۴/۷ متر منظور شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود افزایش درصد کوارتز تا ۵۰ درصد بر ضریب بهره‌وری تاثیر نمی‌گذارد ولی زمانی که از ۵۰ درصد تجاوز می‌کند به سرعت باعث افت ضریب بهره‌وری می‌شود.



شکل ۷- ضریب بهره‌وری در مقابل قطر تونل[۴]



شکل ۸- ضریب بهره‌وری در مقابل درصد کوارتز[۴]

۴-۲-۲- 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 انـدیس‌هـای زیـر جـایگزین شـده است.

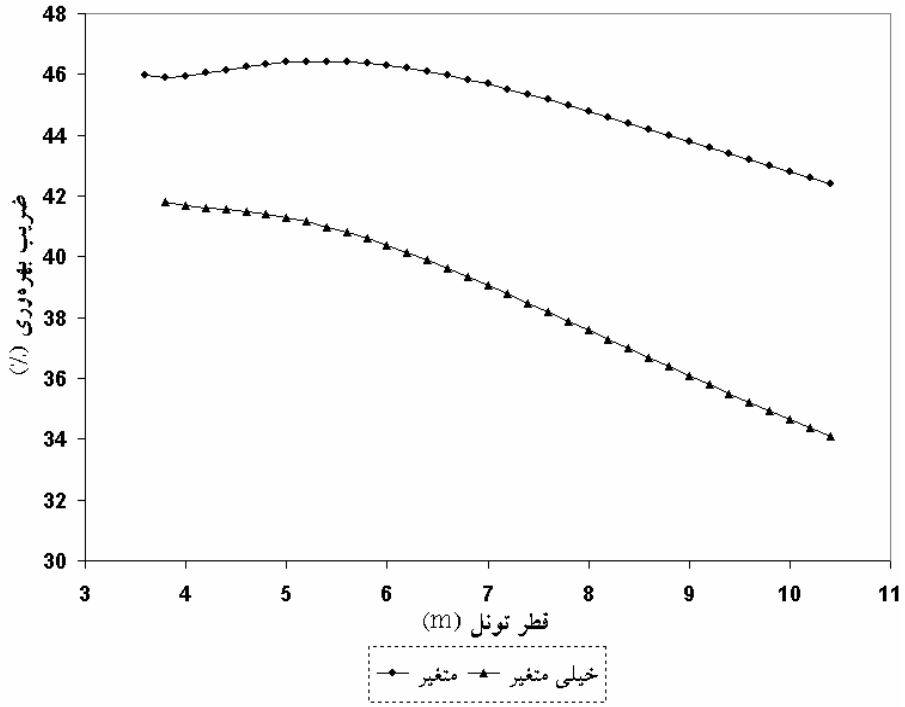
D: قطر تونل، R: نوع سنگ، Q: درصد کوارتز، G: تغییرات شرایط زمین‌شناسی، T: نیروی نفوذ هر دیسـک و U: ضریب بهره‌وری

معادله حاصل از تحلیل آماری به صورت زیر است.

$$R = 0.525 \qquad (۲)$$

$$Y = -185 + \frac{447}{D} + \frac{82}{R} + \frac{880}{Q} + \frac{44}{G} + \frac{7068}{T} - \frac{1859}{D^2} - \frac{279}{R^2} - \frac{1684}{Q^2} + \frac{33}{G^2} + \frac{6.75E5}{T^2} - \frac{8}{D.R.Q.G}$$
$$+ \frac{1.6E4}{R.Q.G.T} + \frac{1.2E4}{Q.G.T.D} + \frac{1000}{G.T.D.R} - \frac{4.9E4}{D.R.Q.G.T} + \frac{2343}{D^3} + \frac{198}{R^3} + \frac{947}{Q^3} + \frac{956}{G^3} + \frac{1.8E7}{X_5^3}$$
$$+ \frac{541}{D^2.R.Q.G} - \frac{9467}{R^2.Q.G.T} - \frac{26550}{D.Q^2.G.T} - \frac{6385}{G^2.T.D.R} + \frac{2.7E6}{D.R.Q.T^2}$$

ضریب بهره‌وری در مقابل قطر تونل برای شرایط زمین‌شناسی متغیر و خیلی متغیر (با استفاده از معادله فوق) در شکل ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۹- ضریب بهره‌وری در مقابل قطر تونل برای شرایط زمین‌شناسی متغیر و خیلی متغیر[۴]

برای رسم نمودار نمایش داده شده در شکل ۹، نیروی نفوذ هر دیسک ۲۰۰ کیلونیوتن، درصد کوارتز ۲۰-۰ درصد و نوع سنگ، گروه ۱ منظور شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود 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.

۵- نتیجه‌گیری

در تحلیل آماری دو متغیره به منظور افزایش همبستگی میان ضریب بهره‌وری و هر یک از پارامترهای مؤثر بر ضریب بهره‌وری داده‌های بانک اطلاعاتی دسته‌بندی شدند، نتایج حاصل از دسته‌بندی داده‌ها به شرح زیر است.

۱) در سنگ‌های با مقاومت فشاری ۶۰-۷۰ و ۱۱۰-۱۲۰ مگاپاسگال ضریب بهره‌وری با افزایش قطر تونل تا ۵-۶ متر افزایش می‌یابد. ضریب همبستگی میان داده‌ها خوب بوده و می‌توان از رابطه حاصل از تحلیل رگرسیون برای برآورد ضریب بهره‌وری در این شرایط استفاده کرد.

۲) ضریب بهره‌وری برای تونل‌های با قطر ۵-۶ متر با افزایش مقاومت فشاری تا ۱۰۰ مگاپاسگال افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره مشکلات ناشی از نگهداری تونل کم شده و ضریب بهره‌وری افزایش می‌یابد. در مقاومت فشاری بیش از ۱۰۰ مگاپاسگال تعویض دیسک‌ها می‌تواند باعث کاهش ضریب بهره‌وری شده باشد.

نتایج حاصل از تحلیل آماری چندمتغیره به شرح زیر است.

۳) با افزایش مقاومت فشاری تا ۸۰ مگاپاسگال ضریب بهره‌وری افزایش و بعد از تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

۴) تغییرات ضریب بهروری 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.

۵) ضریب بهره‌وری با افزایش قطر تونل تا ۶ متر افزایش یافته و بعد از آن تقریباً ثابت باقی مانده است. علت افزایش ضریب بهره‌وری می‌تواند سهولت در خدمات‌رسانی، ترابری، تهویه، تعویض دیسک‌ها و امکان سرویس ماشین و تاسیسات پشتیبانی با ابزارهای بزرگتر و قوی‌تر با افزایش قطر تونل باشد.

۶) 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.

۷) 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.

مراجع

[1] Jamal Rostami and Levent Ozdemir, (1993), "*A New Model For Performance Prediction of Hard Rock TBMs*", Chapter 50, RETC 1993.

[2] U.S. Army Corps of Engineers, (1997), "*Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock*" Department of the Army, Washington, DC 20314-1000, EM 1110-2-2901, Appendix C

[3] Nelson, P.P., A. A. Yousof, and P. E. Laughton, (1994), "*Tunnel Boring project data Bases and construction simulation*", Geotechnical Engineering report GR94-4, Geotechnical Engineering Center, Department civil Engineering, The University of Texas at Austin.

[۴]- مهدوری، سعید، (۱۳۸۳)، "پیش‌بینی ضریب بهره‌وری TBMهای باز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران