

معادله نرخ نفوذ دستگاه حفاری دورانی براساس آنالیز مولفه‌های اصلی و رگرسیون غیرخطی

امیررضا بردیده

کارشناسی ارشد معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر

نام نویسنده مسئول:

امیررضا بردیده

چکیده

حفاری با استفاده از دستگاه‌های حفاری دورانی حاوی سرمته‌های سه‌مخروطی امروزه به صورت گسترده در ایران و سراسر دنیا برای روباره‌برداری و استخراج در معادن بزرگ استفاده می‌شود. پیش‌بینی نرخ نفوذ دستگاه‌های حفاری دورانی در برنامه‌ریزی معدن بسیار مهم است. دستگاه‌های حفاری باتوجه به مکانیزم‌های مختلف حفاری، معادلات نرخ نفوذ مخصوص به خود دارند بنابراین با استفاده از معادله پیش‌بینی نرخ نفوذ حتی می‌توان نوع مناسب دستگاه حفاری را نیز برای شرایط مختلف زمین‌شناسی انتخاب نمود. در این مقاله یک معادله غیرخطی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی با استفاده از رگرسیون چندمتغیره غیرخطی و براساس استخراج مهمترین پارامترهای موثر در حفاری با استفاده از آنالیز مولفه‌های اصلی پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: حفاری، پیش‌بینی نرخ نفوذ، معدن.

مقدمه

سرمته‌های سه‌مخروطی در حفاری دورانی عمدتاً برای حفر سنگ‌های سخت و ساینده به منظور استخراج منابع زیرزمینی در مهندسی معدن و نفت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالت نوعی، این سرمته متشکل از سه مخروط، بدنه حامل بار برای هر مخروط (شامل بلبرینگ‌ها و یاتاقان نگهدارنده) و بدنه سرمته می‌باشد. سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی که در بیشتر مواقع مواد کارباید سیمانی شده هستند، متشکل از دندانه‌های تنگستن کارباید می‌باشند که درون یک مخروط فرورفته و با کبالت به هم اتصال داده شده‌اند. این نوع سرمته‌ها در منابع به اختصار WC/Co و یا CC/WC به علت ترکیب ساختاری آن از تنگستن کارباید و فاز اتصال کبالت نامگذاری می‌شوند [۱]. مخروط‌ها که به وسیله دندانه‌های کوچکی پوشیده شده‌اند حین حفاری روی بدنه حامل می‌چرخند و با اعمال نیرو منجر به کنده‌شدن و خردشدن سنگ در ته‌چال می‌شوند. مواد کارباید سیمانی شده دارای خصوصیات ضدسایشی فوق‌العاده بالایی می‌باشند و به دلیل دارا بودن ترکیب سختی بالا و مقاومت در برابر ترک خوردگی کاربرد گسترده‌ای در حفاری پیدا کرده‌اند. پیش‌بینی نرخ نفوذ و ارزیابی سایش سرمته‌های WC/CO به منظور برنامه‌ریزی دقیق زمان تعویض سرمته و افزایش تولید معدن بسیار حائز اهمیت می‌باشد. امروزه نرخ نفوذ سرمته‌های دورانی به دلیل استفاده از دستگاه‌های با قدرت بالا و کنترل بهتر پارامترهای عملیاتی با گذشت زمان افزایش یافته که منجر به کاهش هزینه‌های حفاری شده است [۲]. قابلیت حفاری سنگ عبارتست از نرخ نفوذ واقعی یا ظاهری متعادل حفاری در یک سنگ مشخص. گاهی به عنوان ویژگی سنگ مورد توجه قرار می‌گیرد اما در حقیقت نه تنها به نوع سنگ و خصوصیات آن بلکه به فاکتورهای زیادی بستگی دارد [۳]. قابلیت حفاری اصطلاحی است در حفاری که برای تشریح تأثیر تعدادی پارامتر بر سرعت حفاری (یعنی متر از حفاری/ زمان خالص حفاری) و سایش ابزار دستگاه حفاری به کار می‌رود [۴]. نرخ نفوذ دستگاه‌های حفاری شامل دو روش اندازه‌گیری می‌باشد: نرخ نفوذ خالص، نرخ نفوذ کامل. نرخ نفوذ خالص با تقسیم متر از حفاری بر زمان خالص حفاری بدون در نظر گرفتن زمان‌های توقف، تعویض لوله حفاری و سرمته بدست می‌آید درحالی‌که نرخ نفوذ کل زمان‌های ذکر شده نیز اعمال می‌شود [۵]. پیش‌بینی دقیق نرخ نفوذ دستگاه حفاری به برنامه‌ریزی مؤثرتر معدن کمک می‌کند. با تعیین مدل نرخ نفوذ همچنین می‌توان خصوصیات سنگ را در معدن تخمین زد. در این مقاله پارامترهای مؤثر در نرخ نفوذ دستگاه‌های حفاری براساس روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی استخراج می‌شوند سپس توسط رگرسیون چندمتغیره غیرخطی معادله پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه می‌گردد.

ادبیات تحقیق

مطالعات محققین مختلف در زمینه قابلیت حفاری سنگ‌ها و نرخ نفوذ حفاری از سال ۱۹۵۰ میلادی آغاز شده و امروزه ابعاد گسترده‌ای در زمینه حفاری مکانیزه و معدن‌کاری پیدا کرده است. محققین تأثیر پارامترهای مختلف سنگ و دستگاه حفاری را بر نرخ نفوذ حفاری به صورت مجزا و یا همزمان مورد مطالعه قرار داده‌اند.

اولین مطالعات در مورد قابلیت حفاری سنگ و نرخ نفوذ سرمته‌ها توسط پروتودیاکونوف در حفاری ضربه‌ای صورت گرفت [۶]. پروتودیاکونوف براساس آزمایش ضربه ضریب مقاومت سنگ را تعیین کرد و طبقه‌بندی را برای نرخ نفوذ مته در سنگ‌ها ارائه داد. فیش مدلی را برای دستگاه حفاری دورانی ارائه داد که در آن نرخ نفوذ رابطه مستقیم با بار روی مته و نسبت معکوس با مقاومت فشاری داشت [۷]. فلیدر و بلیک تلاش کردند تا ارتباط بین اندازه ذرات خردشده و نرخ نفوذ حفاری سنگ را بدست آورند و نتیجه گرفتند که با افزایش اندازه ذرات نرخ نفوذ دستگاه حفاری افزایش می‌یابد [۸]. ارسوی و والر دریافتند که نرخ سایش سرمته‌ها به اندازه ذرات تولید شده حین حفاری بستگی دارد و هرچه اندازه ذرات بلندتر باشد فرسایش مته سریعتر رخ می‌دهد [۹]. تیل برای اولین بار مفهوم انرژی ویژه و ارتباط آن با مقاومت فشاری سنگ و نرخ نفوذ در دستگاه‌های حفاری دورانی را مطرح کرد، وی مشاهده نمود که انرژی ویژه رابطه معکوسی با نرخ نفوذ دارد بطوریکه با افزایش انرژی ویژه سنگ نرخ حفاری آن کاهش می‌یابد و بالعکس [۱۰]. یاشار و همکاران با استفاده از دستگاه حفاری آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای قابل کنترل دستگاه از جمله بار پشت مته، گشتاور اعمال شده و انرژی ویژه را بر نرخ نفوذ حفاری بررسی کردند و در نهایت روابط تجربی را برای تعیین نرخ نفوذ حفاری بر حسب بار و گشتاور ارائه دادند. براساس این روابط نرخ نفوذ با افزایش بار و گشتاور به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرد بطوریکه با افزایش نرخ نفوذ و بار روی مته میزان انرژی ویژه در هر دو حالت به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند [۱۱]. بائر و کالدر در مطالعه خود کارآیی دندانه تنگستن- کارباید را در مته سه مخروطی در معادن سنگ آهنک سخت در آمریکا مطالعه کردند و رابطه تجربی را برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه دادند [۱۲]. بیلگین و همکاران مدل نرخ نفوذی را برای دستگاه‌های حفاری دورانی براساس آزمایش نفوذ در معادن زغال ترکیه ارائه دادند. آنها دریافتند که با افزایش شاخص نفوذ سنگ میزان نرخ نفوذ حفاری دورانی کاهش می‌یابد [۱۳]. قهرمان داده‌های حاصل از نرخ نفوذ دستگاه حفاری دورانی با مته سه مخروطی را در مناطقی در ترکیه برداشت کرد و در نهایت مدلی را برای پیش‌بینی نرخ نفوذ براساس پارامترهای سنگ با استفاده از رگرسیون غیرخطی ارائه داد [۱۴]. حسینی و همکاران شاخص قابلیت حفاری را براساس پارامترهای ساختاری توده سنگ ارائه دادند، آنها در طبقه‌بندی سختی

سنگ‌ها از روش جیمینو و همکاران استفاده کردند که در آن سنگ‌ها براساس رفتارشان در حفاری از نرم تا خیلی سخت طبقه‌بندی شدند، این طبقه‌بندی نرخ نفوذ سرمته را در سنگ‌های مختلف براساس قابلیت حفاری آنها پیش‌بینی می‌کرد [۱۵]. هوآنگ و وانگ با انجام آزمایش‌های مکانیکی تأثیر پارامترهای سرعت دوران، بار روی مته و قطر سرمته را روی نفوذ سرمته الماسی در سنگ‌های مختلف مطالعه کردند. آنها نتیجه گرفتند که نرخ نفوذ با سرعت دورانی رابطه خطی قوی دارد بطوریکه با افزایش سرعت دورانی نرخ نفوذ افزایش می‌یابد. آنها همچنین برای ارتباط نرخ نفوذ مته الماسی و بار روی مته رابطه نمائی را پیشنهاد کردند. از دیدگاه آنها از میان سه عامل تأثیرگذار دستگاه حفاری یعنی بار روی مته، سرعت دوران و نوع سنگ، بار روی مته بیشترین تأثیر را در عملیات حفاری و نرخ نفوذ مته در سنگ دارد [۱۶]. میلر و بال بیان کردند که بار پشت مته کمتر منجر به سایش مته می‌شود درحالی‌که اعمال بار زیاد باعث فرسایش سریع دندانه‌های الماسی می‌شود. هر دوی شرایط تأثیر منفی روی نرخ نفوذ دارند [۵]. برای یافتن پارامترهای مؤثر و در حقیقت کاهش پارامترهای غیر مؤثر در این تحقیق از تکنیک کاهش ابعادی آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)^۱ استفاده می‌شود. این تکنیک جزء تکنیک‌های تشخیص الگو و از نوع غیرنظارتی می‌باشد. یعنی اجزاء در هر کلاس ناشناخته هستند و تنها معتبرترین کلاس‌ها استخراج می‌شوند. هدف PCA بیان دقیق داده‌ها در یک فضای ابعادی کمتر می‌باشد. واریانس داده‌ها به هر میزانی در فضای بزرگتر وجود داشته باشد بایستی در فضای کوچکتر حفظ شود. این تکنیک داده‌ها را ابتدا متمرکز کرده و سپس با چرخش محورها، آنها را در جهت حداکثر واریانس قرار می‌دهد [۱۷]. مدلسازی احتمالاتی به روش مونت کارلو توجه محققین بسیاری را در زمینه مدلسازی‌های پیچیده در رشته‌های علوم و مهندسی به ویژه در معدن، مکانیک سنگ و زمین‌شناسی مهندسی جلب نموده است. بناردوس و کالیامپاکوس یک اندیس آسیب‌پذیری را برای تعیین مناطق ریسک پذیر در حفاری با TBM بوسیله RES تعریف نمودند. آنها از تکنیک مونت کارلو برای تعیین کردن عدم قطعیت در مقادیر پارامترها استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که با استفاده از این اندیس می‌توان ریسک خطرات در مناطق ریزشی حین حفاری با TBM را به خوبی تعیین کرد. همچنین روش آنها می‌توانست در پیش‌بینی نرخ پیشروی TBM بکار رود که پارامتر بسیار مهمی در موفقیت پروژه حفاری می‌باشد [۱۸]. قاسمی و همکاران ابتدا یک مدل تجربی برای پیش‌بینی فاصله پرتاب سنگ در نتیجه انفجار در معدن مس سرچشمه را براساس آنالیز ابعادی ارائه دادند. از روش مونت کارلو برای شبیه‌سازی توزیع فاصله پرتاب سنگ در آن معدن استفاده کردند و نتیجه گرفتند که شبیه‌سازی مونت کارلو می‌تواند فاصله پرتاب را نسبتاً نزدیک به داده‌های واقعی پیش‌بینی کند [۱۹]. پارک و همکاران از تئوری مجموعه فازی همراه با شبیه‌سازی مونت کارلو برای ارزیابی شکست شیب‌های سنگی استفاده کردند. آنها از عدم قطعیت مجموعه‌های فازی همراه با مونت کارلو در ارزیابی احتمال شکست استفاده کردند و نتیجه گرفتند که کاربرد تئوری فازی و شبیه‌سازی مونت کارلو نتایج قابل قبولی در ارزیابی شکست بدست می‌دهد [۲۰].

روش‌شناسی

در این مقاله از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) که یک روش کاهش ابعادی با وجود داده‌های فراوان است برای استخراج پارامترهای مؤثر استفاده می‌شود. پس از استخراج پارامترهای اصلی از رگرسیون چندمتغیره غیرخطی معادله نرخ نفوذ تعریف می‌شود.

نتایج

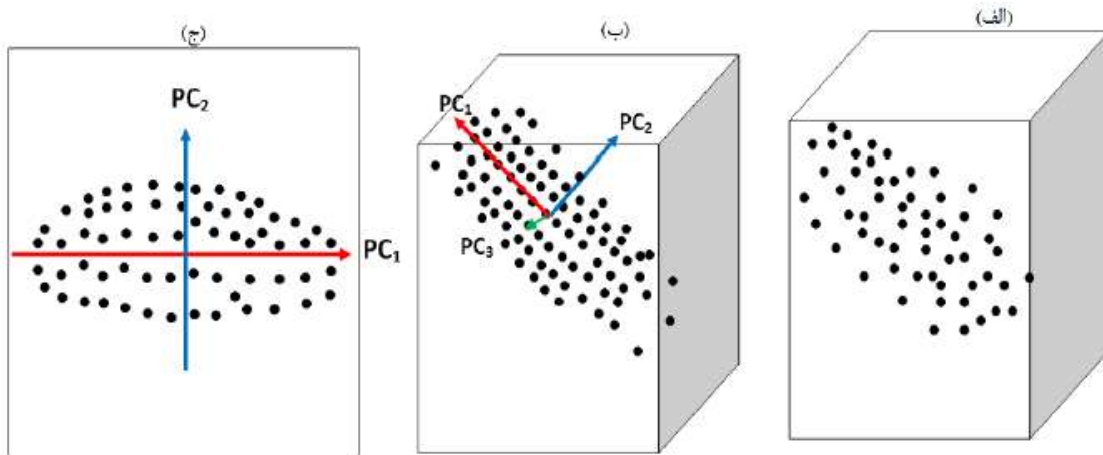
اندازه‌گیری براساس ۱۵۰ داده حفاری در معدن مس سرچشمه صورت گرفته است و در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله پارامترهای دستگاه‌های حفاری دورانی مانند نرخ نفوذ حفاری خالص، قطر سرمته، بار روی مته، سرعت دوران مته مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فاکتورهای عملیاتی دستگاه مانند قطر سرمته، بار روی سرمته و سرعت دوران تأثیر بیشتری روی نرخ نفوذ دارند. آنالیز فاکتوری که شامل آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) نیز می‌شود، به وسیله مجموعه‌ای از فرآیندها داده‌های اضافی از یک مجموعه از متغیرهای دارای همبستگی حذف می‌شوند و آن متغیرها در یک مجموعه کوچکتر بیان می‌شوند. در حقیقت PCA نحوه کاهش مجموعه داده‌های زیاد و پیچیده را به یک بعد کوچکتر فراهم می‌کند. آنالیز مؤلفه‌های اصلی کاربردهای فراوانی در علوم مختلف از پایه تا مهندسی در تحلیل داده‌ها پیدا کرده است. این ابزار، برای کاهش بعد داده‌های زیاد، بسیار کارآمد می‌باشد که به وسیله آن داده‌ها از فضای بزرگ ابعادی به فضای ابعادی کوچکتری کاهش می‌یابند. از مزایای این انتقال می‌توان گفت که بعد کاهش یافته تأثیر اکثر پارامترهای مهم را به همراه دارد درحالی‌که پارامترهای زائد را حذف می‌کند. همچنین روشی را برای درک ساختار داده‌های پیچیده فراهم می‌کند. در حالت تئوری وقتی که n متغیر مشخص مانند X_1, X_2, \dots, X_n داشته باشیم، در PCA بایستی $(m < n)$ متغیر شامل PC_1, PC_2, \dots, PC_m

¹.Principal Component Analysis

داشته باشیم بطوریکه همبستگی بین دو تا از آنها صفر باشد. در معادله (۱) مقدار کوواریانس بین دو متغیر، PC_1 مؤلفه اصلی اول یا فاکتور اول و PC_2 مؤلفه اصلی دوم یا فاکتور دوم و ... می‌باشد.

$$\begin{aligned} PC_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \\ PC_2 &= a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n \\ PC_m &= a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n \end{aligned} \quad (1)$$

در شکل (۱-الف) یک مجموعه شامل سه متغیر نشان داده شده که در فضای مختصات پراکنده شده است. جهات اصلی که داده‌ها در آن تغییر می‌کنند با محور PC_1 به عنوان مؤلفه اصلی اول و محور PC_2 عمود بر محور اول به عنوان مؤلفه اصلی دوم نشان داده می‌شود (شکل ۱-ب). اگر هر محور به راستای مقادیر (PC_1, PC_2) انتقال یابد داده‌ها مجدداً همبستگی پیدا می‌کنند یعنی کوواریانس بین این دو متغیر صفر می‌باشد (شکل ۱-ج).



شکل ۱- (الف) نمای سه بعدی داده‌های پراکنده، (ب) جهات مؤلفه‌های اصلی، (ج) دو مؤلفه اصلی بعد از چرخش

در این مختصات جدید مشاهده می‌شود که واریانس در جهت محور PC_1 بزرگتر از محور PC_2 می‌باشد. PCA متغیرهای جدیدی را محاسبه می‌کند که از ترکیب خطی متغیرهای اصلی بدست می‌آید به عبارتی هر قدر همبستگی متغیرهای اولیه بیشتر باشد واریانس مؤلفه اصلی اول بیشتر است. بنابراین مؤلفه‌های اصلی با تشکیل و محاسبه ماتریس کوواریانس (برای مثال سه متغیر تصادفی ماتریس کوواریانس مطابق معادله (۲) می‌باشد) از داده‌های اولیه و تعیین مقادیر ویژه آن ماتریس از حل معادله (۳) می‌توانند تعیین شوند.

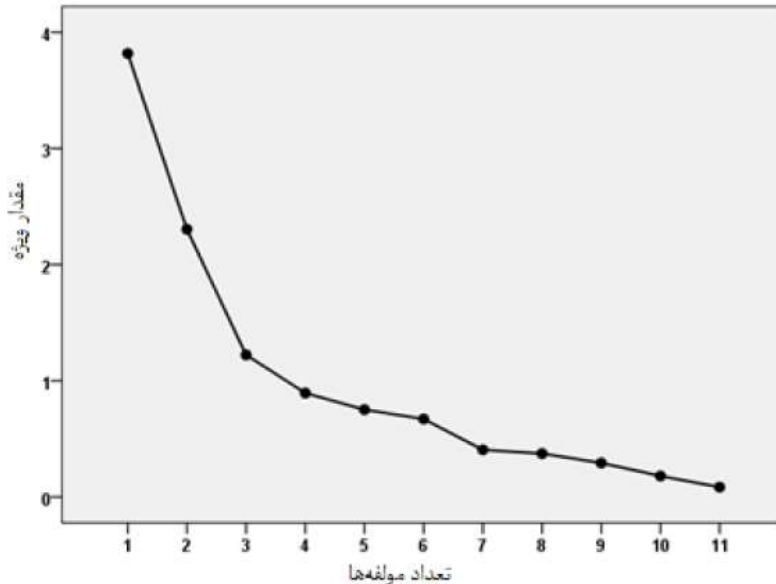
$$\Sigma = \begin{bmatrix} cov(x_1, x_1) & cov(x_1, x_2) & cov(x_1, x_3) \\ cov(x_2, x_1) & cov(x_2, x_2) & cov(x_2, x_3) \\ cov(x_3, x_1) & cov(x_3, x_2) & cov(x_3, x_3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sum X &= \lambda X \\ (\sum -\lambda I)X &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

که I ماتریس یک λ ها مقادیر ویژه (همان مولفه‌های اصلی)، Σ ماتریس کوواریانس و X ها بردارهای ویژه متناظر آن مقادیر می‌باشند. PCA جهات بیشترین واریانس داده‌ها را نشان می‌دهد. بیشتر مواقع درصد کل واریانس مجموعه داده‌ها محاسبه می‌شود که متناظر با همان مقادیر ویژه آن داده‌ها می‌باشد. معمولاً مقادیر ویژه (یا درصد مشارکت) برحسب تعداد مؤلفه‌های اصلی رسم می‌شوند و یک نمودار مفید تحت عنوان اسکری پلات بدست می‌آید که استفاده از آن برای تعیین تعداد مؤلفه‌های اصلی مورد نیاز است که بیشترین تغییرات داده‌ها را دربرداشته باشند (اسکری به معنی سنگریزه‌هایی که در پای صخره می‌ریزند و از آنجا که این نمودار شبیه آن است به اسکری پلات

². Scree plot

معروف شده است). نمودار دیگری که می‌تواند توزیع فضایی کلاس‌های جداشده از متغیرها را به خوبی نشان دهد نمودار سه‌بعدی پراکندگی^۳ است که تا سه مؤلفه اصلی را با توجه به همبستگی بین متغیرها نشان می‌دهد. در این مرحله PCA روی ۱۶۸ داده از هر دو معدن شامل شاخص‌ها (پارامترهای ورودی) و خروجی (نرخ نفوذ) اعمال شد و نسبت واریانس مولفه‌ها بدست آمد. در اینجا نیز پارامترهای حفاری در سه بعد نشان داده می‌شوند و مؤلفه اصلی که پارامتر نرخ نفوذ همراه با سایر پارامترهای با بیشترین واریانس در آن واقع شود به منظور ایجاد معادله نرخ نفوذ استخراج می‌شود. این روش چندمتغیره آماری همچنین تمایل به خوشه‌بندی متغیرها را نیز دارد. بنابراین این نسبت واریانس میزان تشابه بین خروجی و یک سری از شاخص‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمودار اسکری پلات تمام مولفه‌ها

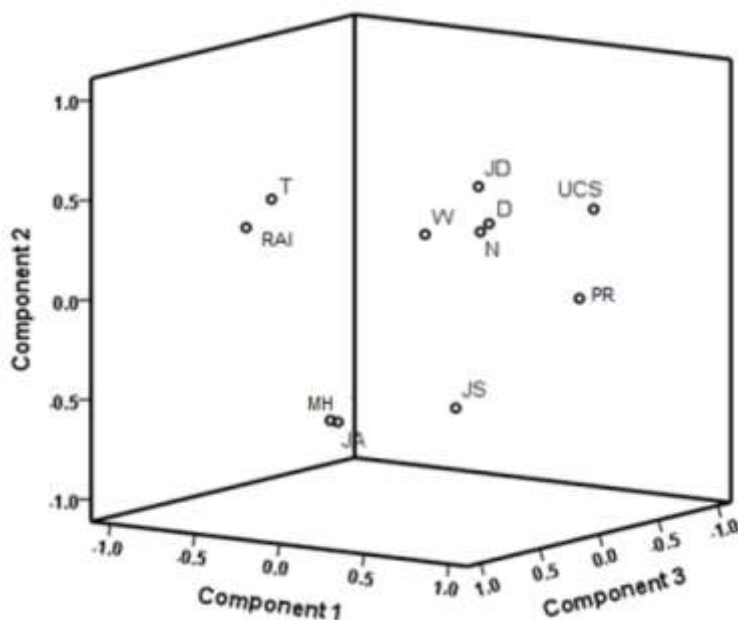
واریانس مولفه‌ها در جدول (۱) نمایش داده شده است. در حقیقت PCA تعداد مولفه‌های سیستم را از یازده مولفه به سه مولفه اصلی با استفاده از تعیین ماتریس مقادیر ویژه داده‌ها طبق روابط (۲) و (۳) کاهش داد. چنانکه ملاحظه می‌شود سه مولفه اول ۶۶.۷۷ درصد کل واریانس را به خودشان اختصاص داده‌اند. بنابراین مشارکت سایر مولفه‌ها کم بوده و از محاسبات حذف می‌شوند. در شکل (۲) اسکری پلات ۱۱ مولفه براساس مقادیر ویژه نمایش داده شده است. در PCA مقدار ویژه بیشتر از یک به عنوان مولفه اصلی در نظر گرفته می‌شود. زمانیکه نمودار شکسته می‌شود، در اینجا در مولفه چهارم، بنابراین به تعداد قبل از آن مولفه اصلی وجود دارند. بنابراین می‌توان گفت که در اینجا سه مولفه اصلی از پارامترهای مؤثر در نرخ نفوذ سرمته در سنگ وجود دارد.

³. 3D scatter plot

جدول (۱): درصد واریانس داده‌ها با استفاده از PCA

مولفه	مقادیر ویژه	% واریانس	% تجمعی
۱	۳.۸۱۸	۳۴.۷۰۶	۳۴.۷۰۶
۲	۲.۳۰۴	۲۰.۹۴۵	۵۵.۶۵۱
۳	۱.۲۲۳	۱۱.۱۱۷	۶۶.۷۶۸
۴	۰.۸۹۵	۸.۱۳۲	۷۴.۹۰۰
۵	۰.۷۵۲	۶.۸۳۴	۸۱.۷۳۴
۶	۰.۶۷۱	۶.۱۰۲	۸۷.۸۳۶
۷	۰.۴۰۶	۳.۶۹۱	۹۱.۵۲۷
۸	۰.۳۷۴	۳.۳۹۷	۹۴.۹۲۴
۹	۰.۲۹۳	۲.۶۶۱	۹۷.۵۸۵
۱۰	۰.۱۸۱	۱.۶۴۶	۹۹.۲۳۱
۱۱	۰.۰۸۵	۰.۷۶۹	۱۰۰.۰۰۰

سه مولفه ابتدایی که در مجموع بیش از ۶۷٪ واریانس داده‌ها را به خود اختصاص داده‌اند به عنوان مولفه‌های اصلی در نظر گرفته می‌شوند. در شکل (۳) نمای سه‌بعدی پارامترهای مؤثر در نرخ نفوذ حفاری و مولفه‌های اصلی نشان داده شده است که پارامترهای اصلی در مولفه اول مشاهده می‌شود.



شکل ۳- سه مولفه اصلی پارامترهای مؤثر در نرخ نفوذ حفاری

در مولفه اول پارامترهای استخراج شده شامل قطر سرمته (D)، سرعت دوران (N)، بار روی سرمته (W)، مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، زاویه درزه‌ها نسبت به جهت حفاری (JD)، فاصله داری درزه‌ها (JS)، همراه با نرخ نفوذ (PR) دارای نسبت واریانس بالایی می‌باشند. از طرف دیگر چهار پارامتر باقیمانده یعنی مقاومت کششی سنگ (T)، سختی موس (MH)، اندیس ساینده سنگ (RAI)، و بازشدگی درزه (JA) مقدار نسبت واریانس منفی در مولفه اول دارند. بعد از تعیین پارامترهای اساسی در نرخ نفوذ تحلیل رگرسیونی چندمتغیره غیرخطی برای تعیین مدل نرخ نفوذ انجام می‌شود.

از آنجا که نرخ نفوذ مته حفاری تحت تاثیر عوامل زیادی است و با مدل‌های رگرسیونی ساده قابل بیان نیست. بنابراین روش‌های رگرسیون چند متغیره غیرخطی بایستی استفاده کرد. رگرسیون چندمتغیره دو نوع هستند خطی و غیرخطی. مدل‌های رگرسیونی به طور گسترده برای پیش‌بینی نرخ نفوذ دستگاه‌های حفاری بکارگرفته شده است. در اینجا از مدل لگاریتمی دوگانه استفاده می‌شود. معادله‌ای که مدل را بیان می‌کند می‌تواند به روش ذیل نوشته شود:

$$Y = aX_1^{b_1} X_2^{b_2} \dots X_n^{b_n} \quad (4)$$

که Y مقدار پیش‌بینی شده برابر با متغیر وابسته، a عرض از مبدأ، X_1, X_2, \dots, X_n متغیرهای مستقل، b_1, b_2, \dots, b_n ضرایب رگرسیونی هستند. با گرفتن لگاریتم از طرفین معادله (4) مدل به شکل خطی تبدیل می‌شود:

$$\log Y = \log a + b_1 \log X_1 + b_2 \log X_2 + \dots + b_n \log X_n \quad (5)$$

اکنون معادله (5) می‌تواند به شکل تابع رگرسیون خطی نوشته شود:

$$Y' = a' + b'_1 X_1 + b'_2 X_2 + \dots + b'_n X_n \quad (6)$$

با انجام رگرسیون خطی بر روی داده‌های موجود می‌توان ضرایب معادله فوق را تعیین کرد. در این مقاله با استفاده از PCA، پارامترهای اصلی با بیشترین واریانس در مولفه اول شامل قطر سرمته (D)، سرعت دوران (N)، بار روی سرمته (W)، مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، زاویه درزه‌ها نسبت به جهت حفاری (JD)، فاصله داری درزه‌ها (JS)، همراه با نرخ نفوذ (PR) بدست آمدند. از مقادیر این پارامترها به تعداد ۱۵۰ داده از هر دو معدن برای ایجاد یک مدل نرخ نفوذ سرمته با استفاده از رگرسیون چندمتغیره غیرخطی استفاده شدند. مدل نرخ نفوذ براساس پارامترهای استخراج شده توسط PCA و توسط رگرسیون چندمتغیره غیرخطی با استفاده از معادلات (4) تا (6) مطابق معادله (7) بدست می‌آید:

$$PR = 0.57 \frac{W^{0.6} N^{1.28} JD^{0.27}}{D^{1.7} UCS^{0.47} JS^{0.14}} \quad (7)$$

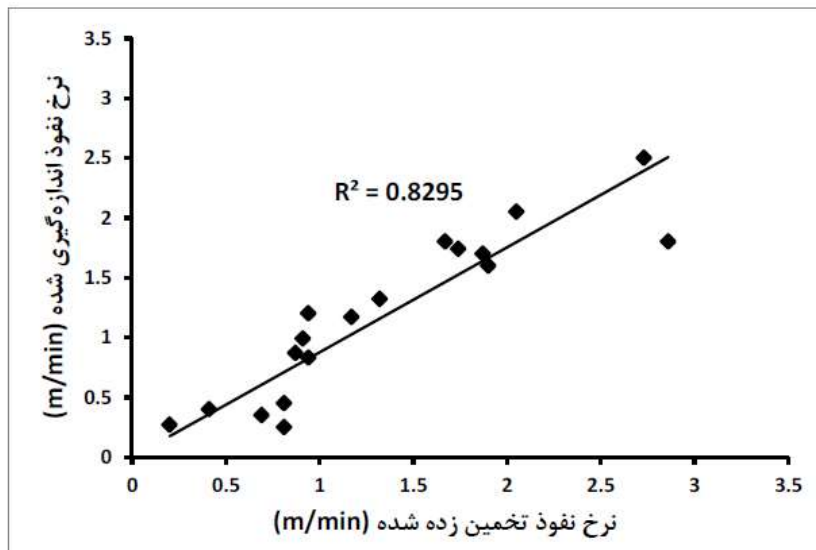
که PR نرخ نفوذ به m/min، W بار روی سرمته به Kg، N سرعت دوران به RPM، JD زاویه درزه نسبت به جهت حفاری به درجه، D قطر سرمته به میلی‌متر، UCS مقاومت فشاری تک محوره به MPa و JS فاصله داری درزه‌ها به cm می‌باشد. برای اعتبارسنجی معادلات رگرسیونی روش‌های آماری مختلفی وجود دارد که مهمترین آنها آزمون ANOVA می‌باشد. در اینجا نیز اعتبار معادله (7) با استفاده از آزمون ANOVA تعیین می‌شود (جدول ۲).

جدول (۲): آزمون ANOVA برای مدل نرخ نفوذ پیشنهاد شده

متغیرها	ضرایب	خطای استاندارد	P-value	R ²	تعداد	F	F-significance
عرض از مبدأ	-۰.۵۵۷	۱.۷۲۸	۰.۷۵۰۳	۰.۹۵	۱۵۰	۴۳.۵۹	۱۰ ^{-۷} *
D	-۱.۷۰۱	۰.۵۱۰	۰.۰۰۳۰	-	-	-	-
w	۰.۶۰۳	۰.۱۲۸	۰.۰۰۰۱	-	-	-	-
N	۱.۲۷۹	۰.۳۳۱	۰.۰۰۰۸	-	-	-	-
UCS	-۰.۴۶۶	۰.۰۴۰	۰.۰۰۰۰	-	-	-	-
JD	۰.۲۷۳	۰.۱۱۰	۰.۰۲۱۲	-	-	-	-
JS	-۰.۱۴۲	۰.۰۵۲	۰.۰۱۳۰	-	-	-	-

* D: قطر سرمته، W: بار روی سرمته، N: سرعت دوران، UCS: مقاومت فشاری تک محوره، JD: زاویه درزه نسبت به جهت حفاری، JS: فاصله داری درزه.

این آزمون اغلب زمانی بکارگرفته می‌شود که مدل‌های آماری به مجموعه‌ای از داده‌ها برازش شده باشد و هدف تعیین مدلی است که بهترین برازش را با داده‌ها داشته باشد. مقدار دقیق F-test اصولاً زمانی فراخوانی می‌شود که مدل با استفاده از حداقل مربعات برازش شده باشد. براساس این آزمون دو فرضیه در نظر گرفته می‌شود: فرضیه صفر: عدم ارتباط بین متغیر وابسته و متغیرهای پیش‌بینی کننده در مقابل فرضیه ثانویه؛ وجود ارتباط بین متغیر وابسته و پارامترهای پیش‌بینی کننده که در آن بایستی مقادیر F-value (محاسباتی) با F-tab (جدولی) مقایسه شود. اگر مقدار F-test بزرگتر از F-tab باشد آنگاه فرضیه صفر رد می‌شود و فرضیه ثانویه قابل قبول است. از آنجا که $F\text{-test} > F\text{-tab} = ۳.۳۲$ و F-significance کوچکتر از $P\text{-value} = ۰.۰۵$ در ۹۵٪ سطح اطمینان است. بنابراین فرضیه صفر رد شده و می‌توان گفت که مدل پیشنهادی معتبر است. نتایج این راستی آزمایی در شکل (۴) ملاحظه می‌شود که همبستگی نسبتاً خوبی بین نرخ نفوذ تخمین زده شده توسط مدل و مقدار واقعی از حفاری را نشان می‌دهد.



شکل ۴- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی نرخ نفوذ دستگاه‌های حفاری در پیشروی حفاری، برنامه‌ریزی معدن، پیش‌بینی خصوصیات سنگ، تعیین زمان تعویض سرمته و کاهش هزینه‌های معدنکاری بسیار ضروری می‌باشد. در این مقاله به بررسی این مقوله پرداخته است. دستگاه‌های حفاری با توجه به مکانیزم‌های مختلف حفاری، معادلات نرخ نفوذ مخصوص به خود دارند بنابراین با استفاده از معادله پیش‌بینی نرخ نفوذ حتی می‌توان نوع مناسب دستگاه حفاری را نیز برای شرایط مختلف زمین-شناسی انتخاب نمود. در این مقاله یک معادله غیرخطی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ دستگاه حفاری دورانی با استفاده از رگرسیون چندمتغیره غیرخطی و براساس استخراج مهم‌ترین پارامترهای موثر در حفاری با استفاده از آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA) پیشنهاد شده است. همانطور که نشان داده شد استفاده از روش کاهش ابعادی PCA برای تحلیل داده‌های زیاد می‌تواند به خوبی پارامترهای موثر در سیستم را استخراج نماید. در اینجا از PCA برای تعیین موثرترین پارامترهایی که در مدل نرخ نفوذ مشارکت دارند استفاده شد. مقاومت فشاری تک محوره سنگ، فاصله‌داری درزه‌ها، شیب درزه‌ها نسبت به جهت حفاری، قطر سرمته، سرعت دوران و وزن روی سرمته پارامترهای موثر تشخیص داده شدند که در مولفه اصلی همراه با نرخ نفوذ بدست آمدند. مدل پیشنهاد شده همبستگی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده از معدن نشان می‌داد.

منابع و مراجع

- [1] Beste, U., Coronel, E., & Jacobson, S. (2006). Wear induced material modifications of cemented carbide rock drill buttons. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 24(1-2), 168-176.
- [2] Beste, U., & Jacobson, S. (2008). A new view of the deterioration and wear of WC/Co cemented carbide rock drill buttons. *Wear*, 264(11-12), 1129-1141.
- [3] Yarali, O., & Kahraman, S. (2011). The drillability assessment of rocks using the different brittleness values. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2), 406-414.
- [4] Thuro, K., & Spaun, G. (1996, January). Introducing the 'destruction work' as a new rock property of toughness referring to drillability in conventional drill-and blast tunnelling. In *ISRM International Symposium-EUROCK 96*. International Society for Rock Mechanics.
- [5] Gokhale, B. V. (2010). *Rotary drilling and blasting in large surface mines*. CRC Press.
- [6] Protodyakonov, M. M. (1962, May). Mechanical properties and drillability of rocks. In *Proceedings of the Fifth Symposium on Rock Mechanics*, University of Minnesota, Minneapolis, MN (pp. 103-118).
- [7] Fish, B. G. (1961). The basic variables in rotary drilling. *Mine and Quarry Engineering*, 27(1), 29-34.
- [8] Pfeleider, E. P., & Blake, R. L. (1953). Research on the cutting action of the diamond drill bit. *Mining Engineering*, 187-195.
- [9] Atici, U., & Ersoy, A. (2009). Correlation of specific energy of cutting saws and drilling bits with rock brittleness and destruction energy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(5), 2602-2612.
- [10] Teale, R. (1965, March). The concept of specific energy in rock drilling. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 2, No. 1, pp. 57-73). Pergamon.
- [11] Yaşar, E., Ranjith, P. G., & Viete, D. R. (2011). An experimental investigation into the drilling and physico-mechanical properties of a rock-like brittle material. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 76(3-4), 185-193.
- [12] Gokhale, B. V. (2010). *Rotary drilling and blasting in large surface mines*. CRC Press.
- [13] Bilgin, N., Eskikaya, S., & Dincer, T. (1993). The performance analysis of large diameter blast hole rotary drills in Turkish Coal Enterprises. In *2nd International Symposium on Mine Mechanization and Automation* (pp. 129-135).
- [14] Kahraman, S. (1999). Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 36(7), 981-989.
- [15] Hoseinie, S. H., Aghababaei, H., & Pourrahimian, Y. (2008). Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDi). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(1), 1-10.
- [16] Huang, S. L., & Wang, Z. W. (1997). The mechanics of diamond core drilling of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4), 134-e1.
- [17] Dougherty, G. (2012). *Pattern recognition and classification: an introduction*. Springer Science & Business Media.
- [18] Benardos, A. G., & Kaliampakos, D. C. (2004). A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling—illustrated by the Athens Metro, Greece. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(6), 987-999.
- [19] Ghasemi, E., Sari, M., & Ataei, M. (2012). Development of an empirical model for predicting the effects of controllable blasting parameters on flyrock distance in surface mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 52, 163-170.
- [20] Park, H. J., Um, J. G., Woo, I., & Kim, J. W. (2012). Application of fuzzy set theory to evaluate the probability of failure in rock slopes. *Engineering Geology*, 125, 92-101.