

توسعه یک طبقه‌بندی فازی برای پیش‌بینی سرعت حفاری در معادن

رضا خالوکاکی^۱، محمد عطایی^{۲*}، سید هادی حسینی^۳، رضا میکائیل^۴

- ۱- استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ kakaie@shahroodut.ac.ir
۲- استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ ataei@shahroodut.ac.ir
۳- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان؛ hoseinie@hut.ac.ir
۴- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی ارومیه؛ reza.mikaeil@gmail.com

(دریافت ۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۹، پذیرش ۲۸ خرداد ۱۳۹۱)

چکیده

در ارزیابی ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها، پارامترهای زیادی به‌طور هم‌زمان بر رفتار توده‌سنگ تأثیر دارد، طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ، رهیافت مناسبی برای مطالعه و پیش‌بینی رفتار مهندسی توده‌سنگ‌ها به شمار می‌آیند. طبقه‌بندی‌های کلاسیک ارائه شده اغلب با محدودیت‌های عملی در کاربرد مواجه هستند. محدودیت استفاده از این طبقه‌بندی‌ها در شرایط مرزی و حالت‌های بینابینی بیشتر بروز می‌کند. در این مقاله به منظور پیش‌بینی سرعت حفاری در معادن و نیز ارزیابی قابلیت حفاری توده سنگ‌ها از تکنیک فازی استفاده شده است. برای این منظور پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی شاخص قابلیت حفاری توده سنگ‌ها (RD_i) مورد استفاده قرار گرفته است. تعدادی تابع فازی بر روی این پارامترها تعریف شده و در نهایت با استفاده از این توابع، کلاس هر توده سنگ از نظر سرعت حفاری تعیین شده است. به منظور مقایسه خروجی طبقه‌بندی فازی و طبقه‌بندی کلاسیک، مطالعه موردی بر روی توده سنگ‌های معدن آهک کارخانه سیمان شاهرود انجام شده است. نتایج مطالعات نشان داد که طبقه‌بندی فازی توانایی بیشتری نسبت به طبقه‌بندی کلاسیک دارد و در شرایط پیچیده، سرعت حفاری و قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها را بهتر پیش‌بینی می‌کند. در پایان، نرم‌افزاری برای انجام محاسبات مربوط به طبقه‌بندی توده سنگ و پیش‌بینی سرعت حفاری تهیه شده است. این نرم‌افزار با استفاده از زبان ++ Visual C تهیه شده و دارای یک پنجره اصلی است که تمامی پارامترهای ورودی مربوط به مشخصات توده‌سنگ در این پنجره وارد شده و خروجی نرم‌افزار شامل امتیاز RD_i و کلاس توده‌سنگ در این پنجره نمایش داده می‌شود.

کلمات کلیدی

حفاری، پیش‌بینی، طبقه‌بندی، فازی.

۱- مقدمه

شوند.

۱-۱- طبقه‌بندی ویلبور

طبقه‌بندی ویلبور به عنوان اولین طبقه‌بندی مهندسی سنگ در حیطه مهندسی حفاری بر مبنای پارامترهای سختی، بافت، شکست سنگ و سازند توده‌سنگ ارائه شده است. بر اساس این طبقه‌بندی سرعت حفاری در توده سنگ‌ها به پنج کلاس سریع، متوسط- سریع، متوسط، متوسط- کند و کند تقسیم می‌شود. در این طبقه‌بندی به حالت سریع در هر پارامتر امتیاز ۸، به حالت متوسط- سریع امتیاز ۴، به حالت متوسط امتیاز ۳، به حالت متوسط- کند امتیاز ۲ و به حالت کند امتیاز ۱ اختصاص داده می‌شود. در مجموع توده سنگ‌ها در بهترین حالت امتیاز ۳۲ و در بدترین حالت امتیاز ۴ می‌گیرند. ساختار کلی این طبقه‌بندی به شرح جدول ۱ است.

چنانچه در جدول ۱ قابل مشاهده است، این سیستم که بر مبنای امتیازدهی کیفی به پارامترها بنا نهاده شده است، قادر است کیفیت و سرعت حفاری را پیش‌بینی کند. با توجه به این‌که ممکن است افراد مختلف بسته به شرایط پیچیده توده سنگ، تعریف‌های متفاوت از آن داشته باشند، بنابراین طبقه‌بندی کیفی در برخی موارد کاربر را دچار سردرگمی می‌کند.

به منظور رفع مشکل کیفی بودن پارامترها و نیز گسسته بودن امتیازها، حسینی و همکاران در سال ۲۰۰۸ یک سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت حفاری توده سنگ‌ها و پیش‌بینی سرعت حفاری ارائه کردند. در ادامه این سیستم طبقه‌بندی به طور خلاصه ارائه می‌شود.

۱-۲- طبقه‌بندی شاخص قابلیت حفاری توده‌سنگ (RD_i)^۲

در توسعه اندیس قابلیت حفاری توده سنگ سه اصل اساسی زیر مورد توجه قرار گرفته است [۱۵]:

- از کمترین تعداد پارامترها برای طبقه‌بندی استفاده شود.
- از بکار بردن پارامترهای هم ارزش و هم ارز پرهیز شود.
- طبقه‌بندی توده سنگ به راحتی در محل قابل انجام باشد (به مطالعات آزمایشگاهی نیاز نباشد).

با در نظر گرفتن سه اصل بالا، پارامترهایی که برای تعیین اندیس قابلیت حفاری توده سنگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارتند از:

- پارامترهای فیزیکی ماده سنگ: بافت و اندازه دانه‌ها.
- پارامترهای مقاومتی ماده سنگ: سختی و مقاومت فشاری تک‌محوری.

در بحث پیرامون تأثیر خصوصیات ماده و توده سنگ بر فرآیند حفاری، متخصصان بسیاری با استفاده از پارامترهای مختلف رفتار سنگ‌ها را تشریح کرده‌اند [۱]، [۱۳]. در سری تحقیقات انجام یافته گذشته، آزمایش‌ها و روش‌های استاندارد همچون "اندیس سرعت حفاری (DRI)"^۱ و "اندیس سایش سرتمه (BWI)"^۲ برای ارزیابی قابلیت حفاری ماده سنگ‌ها و پیش‌بینی سرعت حفاری ارائه شده‌اند. تحقیقات در معادن نشان می‌دهند که هیچ‌کدام از این روش‌ها تمامی پارامترهای بحرانی و کلیدی ماده سنگ را مورد توجه قرار نمی‌دهند و جامعیت لازم برای کاربردهای صحرایی را ندارند. همچنین با دقت در مطالعات انجام شده قبلی، به وضوح آشکار می‌شود که نتایج این تحقیقات در مجموع به یک نتیجه واحد و یک رهیافت اساسی برای پیش‌بینی سرعت حفاری نمی‌انجامد و یافته‌های این مطالعات اغلب واگرا بوده و توانایی و ابزار خاصی برای کاربران صنعتی و علمی این تحقیقات ارائه نمی‌کند.

مشکل عمده تحقیقات پیشین، مطالعه جداگانه پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری و قابلیت حفاری سنگ‌ها است. این در حالی است که قابلیت حفاری هر سنگی به پارامترهای بسیار زیادی وابسته است که این پارامترها در ارتباط تنگاتنگ با هم می‌باشند. بنابراین دستیابی به یک روش جامع که بتوان با استفاده از آن سرعت حفاری در سنگ‌ها را مورد بررسی و ارزیابی قرار داد یکی از اهداف کلیدی محققان علم حفاری به شمار می‌رود.

در مهندسی سنگ به منظور ارزیابی رفتار توده و ماده سنگ، سیستم‌های طبقه‌بندی به عنوان ابزار کارآمد مطرح می‌باشند. بنابراین با توجه به طبیعت پیچیده و پارامترهای مؤثر متعدد در فرآیند حفاری، به نظر می‌رسد استفاده از یک طبقه‌بندی می‌تواند راه‌گشای مناسبی برای برطرف کردن دشواری‌های موجود در ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها باشد.

تاکنون دو طبقه‌بندی عمده برای ارزیابی قابلیت حفاری و پیش‌بینی سرعت حفاری در توده سنگ‌ها ارائه شده است. طبقه‌بندی اول توسط ویلبور [۱۴]^۳ در سال ۱۹۸۴ و طبقه‌بندی بعدی در سال ۲۰۰۸ توسط حسینی و همکاران [۱۵] ارائه شده است. هر دو این طبقه‌بندی‌ها بر مبنای مشخصات ماده سنگ و توده‌سنگ ارائه شده‌اند و هر دو به صورت کلی جزء سیستم‌های طبقه‌بندی کلاسیک مهندسی سنگ به حساب می‌آیند. در ادامه، سیستم‌های طبقه‌بندی بالا به طور اجمالی معرفی می-






نهایی، سرعت حفاری در توده سنگ را به صورت کیفی می‌توان بر طبق جدول ۳ پیش‌بینی کرد. شایان ذکر است برای بررسی پارامترهای مربوط به سیستم درزه‌ها در توده‌سنگ‌های با بیش از یک دسته درزه، ویژگی‌های دسته درزه غالب مورد نظر طبقه‌بندی قرار می‌گیرد. برای مقادیر مرزی، امتیاز مربوط به طبقه پائین‌تر اختصاص داده می‌شود.

چنانچه از دو طبقه‌بندی بال بر می‌آید هر دو طبقه‌بندی از نوع کلاسیک بوده و امتیازدهی به مشخصات مختلف سنگ به صورت گسسته انجام می‌شود. در این نوع سیستم‌ها به علت جدایش کلاس‌های مختلف سنگ توسط یک سری مرزبندی گسسته، برخی از توده‌سنگ‌های دارای شرایط مرزی علی‌رغم واقعیت در یک کلاس نادرست طبقه‌بندی می‌شوند. این مسئله باعث به وجود آمدن عدم قطعیت می‌شود. بنابراین افزایش دقت طبقه‌بندی و نیز افزایش سطح اعتماد آن یکی از الزامات آشکار استفاده از این دو طبقه‌بندی است.

- پارامترهای ساختاری توده سنگ (مشخصات درزه‌ها):
فاصله‌داری درزه‌ها، دهانه و پرکننده درزه‌ها، شیب درزه‌ها. با توجه به اهمیت نسبی پارامترهای مختلف مورد استفاده برای تعیین RD_i، مجموع امتیازات توده سنگ ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. امتیازات بالاتر دلیل بر شرایط مساعد توده سنگ از نظر حفاری است. بنابراین حفاری در چنین توده سنگ‌هایی سرعت بیشتری خواهد داشت.

در سیستم RD_i به منظور امتیازدهی به مقادیر مختلف هر پارامتر، بیشترین امتیاز به بهترین وضعیت (سریع) داده شده است. برای امتیاز حالت‌های متوسط- سریع، متوسط، آهسته- متوسط و آهسته به ترتیب ۷۰٪، ۵۰٪، ۲۵٪ و ۱۰٪ امتیاز ماکزیمم، اختصاص یافته‌است (اعداد بسته به شرایط گرد شده‌اند). با ترتیب امتیازدهی بالا، سعی شده سیستم طبقه‌بندی RD_i غیرخطی باشد. ساختار کلی این طبقه‌بندی به شرح جدول ۲ است.

در نهایت با توجه به مقدار RD_i به دست آمده از جدول

ردیف	خصوصیات سنگ	طبقه‌بندی شرایط حفاری				
		کند	متوسط کند	متوسط	متوسط سریع	سریع
۱	سختی موهس	۸-۹	۷	۵-۶	۳-۴	۱-۲
	امتیاز	۱	۲	۳	۴	۸
۲	بافت	متراکم	پرفیری	گرانیتوئید	شکسته	خلل و فرج‌دار
	کیفیت: ضعیف تا خوب					
۳	امتیاز	۱	۲	۳	۴	۸
	شکست	چکش‌خوار	محکم	قطعه قطعه شونده	ترد	خرد شونده
۳	امتیاز	۱	۲	۳	۴	۸
	ساختار توده سنگ	پهن می‌شود	سخت می‌شکند	قطعه قطعه می‌شود	آسان می‌شکند	ریز می‌شود
۴	بلوکی	رگه‌ای	متورق	لایه‌دار	توده‌ای	
	امتیاز	۱	۲	۳	۴	۸
	مجموع امتیاز	۴	۸	۱۲	۱۶	۳۲

جدول ۱: ساختار کلی طبقه‌بندی ویلبور [۱۴]

جدول ۲: ساختار کلی طبقه‌بندی شاخص قابلیت حفاری توده‌سنگ (RDi) [۱۵]

ردیف‌های ارزش					پارامترها	
متراکم (دانه بندی ریز)	پرفیری	گرانوئیدی (دانه متوسط)	شکسته (نیمه تحکیم یافته)	متخلخل	بافت	
۰/۰۵-۱	ماتریکس: ۰/۵-۱ دانه ها: ۲-۵	۲-۵	>۵	اندازه دانه ها (mm)	۱
۱	۴	۷	۱۰	۱۵	امتیاز	
>۲۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۵۰-۱۰۰	۲۵-۵۰	۱-۲۵	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	۲
مقاومت خیلی بالا	مقاومت بالا	مقاومت متوسط	مقاومت کم	مقاومت خیلی کم	امتیاز	
۲	۶	۱۱	۱۶	۲۲		
>۷	۶-۷	۴/۵-۶	۳-۴/۵	۱-۳	سختی موهس	۳
خیلی سخت	سخت	نسبتاً سخت	نسبتاً نرم	خیلی نرم تا نرم	امتیاز	
۱	۴	۹	۱۳	۱۸		
۰-۰/۱۵	۰/۱۵-۰/۵	۰/۵-۱	۱-۲	>۲	فاصله داری* درزه ها (m)	۴
۱	۵	۹	۱۳	۱۸	امتیاز	
۲-۹	۹-۱۲	۱۲-۲۰	>۲۰	درزه بسته	پرکننده** درزه ها (mm)	۵
۱	۴	۷	۱۰	۱۵	امتیاز	
۰-۲۰	۲۰-۳۵	۳۵-۵۵	۵۵-۷۰	۷۰-۹۰	شیب داری*** درزه ها (°)	۶
۱	۳	۶	۸	۱۲	امتیاز	

* سنگ‌هایی که دارای تورق و شیب‌توزیته قانون‌مند باشند به علت سهولت حفاری در آنها، امتیاز ۱۲ برای فاصله‌داری منظور می‌شود.

** برای درزه‌های پر شده با مواد خاکی و پودرهای بسیار ریز سنگی به‌طور استثنا امتیاز ۷ برای پرکننده‌ها منظور می‌شود.

*** زاویه بین امتداد چال و سطح درزه مد نظر است.

جدول ۳: پیش‌بینی سرعت حفاری بر اساس RDi [۱۵]

۷-۲۰	۲۰-۴۰	۴۰-۶۰	۶۰-۸۰	۸۰-۱۰۰	اندیس قابلیت حفاری (RDi)
آهسته	آهسته-متوسط	متوسط	متوسط-سریع	سریع	سرعت حفاری
۵	۴	۳	۲	۱	شماره کلاس

فازی و فازی‌سازی را وارد علوم ریاضیات و مهندسی کرد. منطق فازی از جمله منطق‌های چند ارزشی بوده، و بر نظریه مجموعه‌های فازی تکیه دارد. مجموعه‌های فازی خود از تعمیم و گسترش مجموعه‌های قطعی به صورتی طبیعی حاصل می‌شوند.

بنیاد منطق فازی بر شالوده نظریه مجموعه‌های فازی استوار است. این نظریه تعمیمی از نظریه کلاسیک مجموعه‌ها در علم ریاضیات است. در تئوری کلاسیک مجموعه‌ها، یک عنصر، یا عضو مجموعه است یا نیست. در حقیقت عضویت عناصر از یک الگوی صفر و یک تبعیت می‌کند. اما تئوری مجموعه‌های فازی این مفهوم را بسط می‌دهد و عضویت درجه‌بندی شده را مطرح می‌کند. به این ترتیب که یک عنصر

منطق فازی به عنوان یک رهیافت ریاضی، راه حل اصلی برای مسائل طبقه‌بندی و حل مشکل شرایط مرزی به شمار می‌آید. در بخش‌های آینده منطق فازی و کاربرد آن در بهبود سطح اعتماد طبقه‌بندی قابلیت حفاری توده سنگ‌ها ارائه خواهد شد.

۲- منطق فازی

تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی اولین بار توسط پروفسور لطفی‌زاده در مقاله‌ای به نام "مجموعه‌های فازی" معرفی شد [۱۶]. هدف اولیه وی، توسعه مدلی کارآمد برای توصیف فرآیند پردازش زبان‌های طبیعی بود. او مفاهیم و اصلاحاتی همچون مجموعه‌های فازی، رویدادهای فازی، اعداد

آرایه‌های ماتریس طبقه‌بندی فازی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$b_i = \bigvee_{j=1}^n (a_i \wedge r_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, m$$

۳-۳-۱ - ارائه طبقه‌بندی فازی برای پیش‌بینی سرعت حفاری در توده‌سنگ‌ها

با استفاده از تئوری منطق فازی و با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر در سرعت حفاری و قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها، مراحل توسعه طبقه‌بندی فازی در ادامه ارائه می‌گردد.

۳-۱-۱ - تعیین جامعه فازی

به منظور توسعه سیستم طبقه‌بندی فازی، اولین گام تعیین پارامترهای موجود در طبقه‌بندی است. از آنجایی که در طبقه‌بندی RD_i از پارامترهای مهندسی سنگ مناسبی برای طبقه‌بندی استفاده شده است که هر یک از این پارامترها از منطق مستحکمی برای انتخاب برخوردارند، بنابراین در طبقه‌بندی فازی ارائه شده نیز از پارامترهای طبقه‌بندی مذکور استفاده شده است.

بدین ترتیب مجموعه فاکتورهای مؤثر در سیستم طبقه‌بندی مورد نظر را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}$$

که در آن:

u₁: مقاومت فشاری تک محوری (MPa)

u₂: شیب درزه‌ها (درجه)

u₃: سختی موهس

u₄: بازشدگی درزه‌ها (mm)

u₅: فاصله‌داری درزه‌ها (m)

u₆: اندازه دانه‌ها (mm)

۳-۲-۲ - تعریف کلاس‌ها و مجموعه طبقه‌بندی

سیستم طبقه‌بندی فازی ارائه شده برای پیش‌بینی سرعت حفاری، در پنج کلاس کیفی خیلی آهسته، آهسته، متوسط، سریع و خیلی سریع، توده سنگ‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد. مجموعه طبقه‌بندی در سیستم فازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$$

کلاس‌ها و مجموعه طبقه‌بندی ارائه شده برای پیش‌بینی سرعت حفاری در جدول ۴ ارائه شده است.

می‌تواند تا درجاتی - و نه به‌طور کامل - عضو یک مجموعه باشد. یک مجموعه فازی A در فضای جهانی U به وسیله یک تابع $\mu_A(x)$ که مقادیری در بازه [0,1] اختیار می‌کند مشخص می‌شود. بنابراین یک مجموعه فازی تعمیم یک مجموعه کلاسیک است که اجازه می‌دهد تابع μ_A هر مقداری را در بازه [0,1] اختیار کند [۱۷].

۲-۱-۲ - تعیین جامعه فازی

یک سیستم طبقه‌بندی فازی به طور معمول شامل مجموعه‌های زیر می‌باشد [۱۷]:

(۱) مجموعه فاکتور $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$

(۲) مجموعه طبقه‌بندی $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$

(۳) فازی ساز $f: U \rightarrow F(V)$,

$$\mu_i \mapsto f(u_i) \cong (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) \in F(V)$$

ماتریس وابسته فازی (R) از تابع f نتیجه می‌شود:

$$R \cong R_f = \begin{bmatrix} f(u_1) \\ f(u_2) \\ \vdots \\ f(u_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

در ادامه عملیات فازی توسط ماتریس وابسته فازی، R به دست می‌آید:

$$T_R: F(U) \rightarrow F(V)$$

$$A \rightarrow T_R(A) \cong A \circ R$$

در روابط بالا \circ معرف عملیات فازی می‌باشد.

ماتریس طبقه‌بندی فازی (R) زمانی به دست می‌آید که وزن هر یک از فاکتورها ($A = (a_1, a_2, \dots, a_n) \in F(U)$) مشخص شده باشند. با مشخص شدن این پارامترها ماتریس طبقه‌بندی فازی B به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R = (b_1, b_2, \dots, b_m) \in F(V) \circ B = A$$

$$(b_1, b_2, \dots, b_m) = (a_1, a_2, \dots, a_n) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

۳-۳- ساختن تابع تعلق و ماتریس وابسته فازی

صحت و سقم کارایی یک سیستم فازی اساساً تحت تأثیر توابع تعلق فاکتورها می‌باشد. با توجه به مشخصات و ارتباط میان فاکتورهای مورد نظر با قابلیت حفاری، یک تابع نمایی با توزیع نرمال به عنوان تابع وابسته به صورت رابطه ۱ انتخاب شده است:

$$\mu_A(x) = e^{-((x-m)/c)^2}, \quad c > 0 \quad (1)$$

جدول ۴: کلاس‌ها و مجموعه طبقه‌بندی ارائه شده

مجموعه طبقه بندی	کلاس کیفی	شماره کلاس
v_5	خیلی آهسته	۵
v_4	آهسته	۴
v_3	متوسط	۳
v_2	سریع	۲
v_1	خیلی سریع	۱

برای محاسبه مقادیر m و c متعلق به هر فاکتور و ساختن ماتریس وابسته فازی، محدوده هر یک از فاکتورهای مورد نظر تعیین شد. جدول ۵ محدوده فاکتورهای مورد نظر را نشان می‌دهد.

در رابطه ۱، اگر مقدار x برابر با مقدار m باشد آنگاه مقدار $\mu(m)$ به بیشترین مقدار خود یعنی ۱ خواهد رسید. مقدار m را می‌توان با میانگین مقادیر ماکزیمم و مینیمم

جدول ۵: محدوده فاکتورهای مورد نظر در طبقه‌بندی فازی

مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	شیب داری درزه‌ها (°)	سختی موهس	بازشدگی درزه‌ها (mm)	فاصله‌داری درزه‌ها (m)	اندازه دانه‌ها (mm)
u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
۲۰۰-۵۰۰	۰-۲۰	۷-۱۰	۲۰-۲۰۰	۰-۰/۱۵	۰-۰/۲۵
۱۰۰-۲۰۰	۲۰-۳۵	۶-۷	۱۵-۲۰	۰/۱۵-۰/۵	۰/۲۵-۲
۵۰-۱۰۰	۳۵-۵۵	۴/۵-۶	۱۰-۱۵	۰/۵-۱	۲-۵
۲۵-۵۰	۵۵-۷۰	۳-۵/۴	۲-۱۰	۱-۲	۵-۱۰
۱-۲۵	۷۰-۹۰	۱-۳	۰-۲	۲-۲۰	۱۰-۵۰

جدول ۶: مقادیر m و c برای هر یک از فاکتورهای مورد استفاده در طبقه‌بندی

u_6		u_5		u_4		u_3		u_2		u_1		طبقه‌بندی کیفی
c	m	c	m	c	m	c	m	c	m	c	m	
۱۲/۰۴	۱۰	۱۰۸/۴	۱۱۰	۰/۰۹	۰/۰۷۵	۰/۱۵	۰/۱۲۵	۱/۸۱	۸/۵	۱۸۰/۷	۳۵۰	خیلی آهسته
۹/۰۴	۲۷/۵	۳/۰۱	۱۷/۵	۰/۲۱	۰/۳۲۵	۱/۰۵	۱/۱۲۵	۰/۶	۶/۵	۶۰/۲۴	۱۵۰	آهسته

کلاس هر فاکتور تعیین کرد. در شرایطی که ماکزیمم و مینیمم بین دو کلاس قرار داشته باشد آنگاه مقدار وابسته به طور تقریبی برابر ۰/۵ در نظر گرفته خواهد شد. بدین ترتیب خواهیم داشت:

$$e^{-((x_{\min} - x_{\max})/2c)^2} \approx 0.5 \quad (2)$$

در نتیجه با توجه به رابطه ۲ مقدار c از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$c = \frac{|x_{\min} - x_{\max}|}{1.66} \quad (3)$$

در رابطه ۳، x_{\min} و x_{\max} به ترتیب معرف مقادیر مینیمم و ماکزیمم هر کلاس برای فاکتورها می‌باشند. مقادیر m و c برای هر یک از فاکتورها با توجه به رابطه ۳ محاسبه و در جدول ۶ آورده شده است. برای مثال در کلاس خیلی ضعیف مقادیر m و c برای پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری با توجه به مقدار حداکثر و حداقل بازه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$m = \frac{200 + 500}{2} = 350$$

$$c = \frac{|200 - 500|}{1.66} = 180.7$$

توابع وابسته به هر کلاس از هر فاکتور را می‌توان با استفاده از رابطه ۱ و مقادیر مندرج در جدول ۵ به دست آورد.

ادامه جدول ۶

متوسط	۷۵	۳۰/۱۲	۵/۲۵	۰/۹	۳/۵	۱/۸	۰/۷۵	۰/۳	۱۲/۵	۳/۰۱	۴۵	۱۲/۰۴
سریع	۳۷/۵	۱۵/۰۶	۳/۷۵	۰/۹	۷/۵	۳/۰۱	۱/۵	۰/۶	۶	۶/۰۲	۶۲/۵	۹/۰۴
خیلی سریع	۱۳	۱۴/۴۵	۲	۱/۲۱	۳۰	۲۴/۱	۱۱	۱۰/۸۴	۱	۱/۲۱	۸۰	۱۲/۰۴

۴- ارزیابی سرعت حفاری در معدن سنگ آهک سیمان شاهرود

به منظور ارزیابی توانایی و اعتبارسنجی سیستم طبقه‌بندی فازی ارائه شده، یک مطالعه موردی در معدن سنگ آهک سیمان شاهرود انجام شده است. در طی این تحقیق در مجموع در هشت سایت آتشفشانی که دارای ویژگی‌های شاخص در معدن بودند، مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها با توجه به پارامترهای موجود در طبقه‌بندی برداشت شده‌اند. پس از مطالعات صحرایی تعدادی نمونه برای تعیین سختی و مقاومت فشاری تک محوری به آزمایشگاه منتقل گردیدند. تمامی آزمایش‌ها تحت استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ انجام شدند. مشخصات ژئومکانیکی توده سنگ‌های مورد مطالعه در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷: مشخصات ژئومکانیکی توده سنگ‌های مورد مطالعه

شماره توده‌سنگ	مقاومت فشاری (MPa)	سختی موهس	اندازه دانه‌ها (mm)	فاصله‌داری درزه‌ها (cm)	بازشدگی درزه‌ها (mm)	شیب‌داری درزه‌ها (°)
۱	۷۴	۳/۵	۰/۲	۴۰	۱۰	۵۵
۲	۴۲	۳	۰/۱۵	۱۱	۲	۲۰
۳	۸۴	۴	۰/۲	۸	۰	۲۰
۴	۸۴	۳/۵	۰/۲	۲۰	۲	۲۵
۵	۸۴	۳/۵	۰/۲	۴۵	۱	۵۰
۶	۷۱	۳/۵	۰/۲	۶	۳	۱۰
۷	۷۱	۳/۵	۰/۲۵	۷۰	۱۲	۳۰
۸	۸۴	۴	۰/۲	۲۰	۱	۴۵

با توجه به نتایج مطالعات صحرایی، میزان شاخص قابلیت حفاری توده سنگ‌های معدن آهک سیمان شاهرود به صورت مقایسه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

بدین ترتیب ماتریس وابسته فازی به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$R = (r_{ij})_{6 \times 5} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & r_{25} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ r_{61} & r_{62} & \cdot & \cdot & \cdot & r_{65} \end{bmatrix} \quad (4)$$

۳-۴- تعیین درجه اهمیت فاکتورها

با توجه به بررسی‌های به عمل آمده، وزن هر پارامتر در سیستم طبقه‌بندی RD_i به عنوان مقادیر وزن هر یک از فاکتورها انتخاب شدند. مبنای اختصاص این وزن‌ها در طبقه‌بندی مذکور، انجام مطالعات صحرایی و ارزیابی حفاری بیش از ۳۵۰ چال حفاری بوده است [۱۵]. مقادیر وزن هر یک از فاکتورها در جدول ۹ نشان داده شده است. به منظور تبدیل امتیاز ۱-۱۰۰ در طبقه‌بندی RD_i به مقیاس ۰-۱ در طبقه‌بندی فازی، کلیه وزن‌ها بر ۱۰۰ تقسیم شده‌اند.

با توجه به محاسبات و مراحل ارائه شده در فصل قبل، نتایج طبقه‌بندی از نظر قابلیت حفاری را می‌توان با توجه به رابطه زیر به دست آورد:

$$B = A \circ R = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$$

در رابطه بالا A بردار وزن فاکتورهاست که با توجه به

جدول ۷، به صورت زیر تعریف می‌شود:

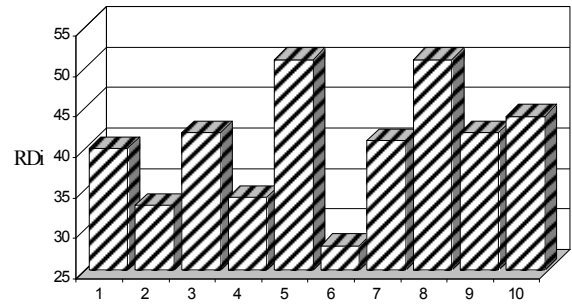
$$A = (0.22, 0.12, 0.18, 0.15, 0.18, 0.15)$$

جدول ۸: مقادیر وزن پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی

وزن	پارامترها
۰/۲۲	مقاومت فشاری تک محوری
۰/۱۲	شیب‌داری درزه‌ها
۰/۱۸	سختی موهس
۰/۱۵	بازشدگی درزه‌ها
۰/۱۸	فاصله‌داری درزه‌ها
۰/۱۵	اندازه دانه‌ها

فازی به صورت جدول ۹ و نیز تعیین کلاس مربوط به توده سنگ شماره یک به عنوان نمونه در جدول ۱۰ ارائه شده است.

با توجه به اینکه بزرگترین آرایه در جدول ۱۰ مربوط به کلاس متوسط می باشد، بنابراین کلاس حفاری در این توده سنگ از نظر طبقه بندی فازی در گروه متوسط پیش بینی شده است. با انجام محاسبات مشابه برای تمامی توده سنگ های مورد مطالعه، کلاس هر توده سنگ از دیدگاه طبقه بندی فازی مشخص گردید. نتایج محاسبات مذکور به دو روش RDi و طبقه بندی فازی در جدول ۹ ارائه شده است.



شکل ۱: میزان شاخص قابلیت حفاری توده سنگ های مورد مطالعه در معدن آهک سیمان شاهرود

۵- تحلیل نتایج

با توجه به طبقه بندی توده سنگ های مورد مطالعه در معدن سنگ آهک سیمان شاهرود با استفاده از روش RDi کلاسیک و طبقه بندی فازی در جدول ۱۱، نتایج حاصل به طور اجمالی در این بخش مورد تحلیل قرار می گیرند. توده سنگ ۱ به عنوان شاخص ترین توده سنگ مورد مطالعه در این تحقیق دارای امتیاز ۴۰ می باشد. امتیاز ۴۰ دقیقاً مرز کلاس سه و چهار در روش کلاسیک می باشد. با توجه به

در این بخش با توجه به مشخصات هر نمونه سنگ، مقادیر m و c محاسبه و به دنبال آن با توجه به رابطه ۱ ماتریس فازی تشکیل می شود. سپس ضرایب m ، c و ماتریس فازی مربوط به هر یک از فاکتورها با تکیه بر داده های حاصل از معدن سنگ آهک سیمان شاهرود تشکیل شده است. پس از این مرحله ماتریس وابسته فازی برای هر توده سنگ مورد مطالعه تشکیل شده و کلاس مربوط به هر توده سنگ تعیین شده است. تمامی مراحل محاسباتی مذکور توسط نرم افزار اکسل^۵ انجام گردیده است. ماتریس فازی مربوط به مقاومت فشاری تک محوری به عنوان نمونه ای از ماتریس های تشکیل شده برای پارامترها در جدول ۶ نشان داده شده است. ماتریس وابسته

جدول ۹: ماتریس فازی مربوط به مقاومت فشاری

			خیلی آهسته	آهسته	متوسط	سریع	خیلی سریع	
UCS	m	c	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}	
1	74	75	30.12	0.0970	0.203582	0.998898	0.002811534	1.82214E-08
2	42	75	30.12	0.054735	0.040186	0.30108	0.914585523	0.017814731
3	84	75	30.12	0.114527	0.30108	0.914586	7.23801E-05	3.27397E-11
4	84	75	30.12	0.114527	0.30108	0.914586	7.23801E-05	3.27397E-11
5	84	75	30.12	0.114527	0.30108	0.914586	7.23801E-05	3.27397E-11
6	71	75	30.12	0.092188	0.179097	0.982518	0.007096783	1.0072E-07
7	71	75	30.12	0.092188	0.179097	0.982518	0.007096783	1.0072E-07
8	84	75	30.12	0.114527	0.30108	0.914586	7.23801E-05	3.27397E-11
9	71	75	30.12	0.092188	0.179097	0.982518	0.007096783	1.0072E-07
10	71	75	30.12	0.092188	0.179097	0.982518	0.007096783	1.0072E-07

جدول ۱۰: ماتریس وابسته فازی (مربوط به توده سنگ ۱)

خیلی آهسته	آهسته	متوسط	سریع	خیلی سریع	(r_{ij})
0.097011	0.203582	0.998898	0.002812	1.82E-08	مقاومت فشاری تک محوری
8.58E-07	9.57E-05	0.501657	0.502423	0.013414	شیب داری درزه ها
0.000485	1.39E-11	0.022803	0.925741	0.215072	سختی موهس
0.427179	0.002012	0.501657	0.643074	9.4E-25	جدایش درزه ها
2.17E-06	0.880249	0.256376	0.034697	0.384347	فاصله داری درزه ها
0.778801	0.460208	0.034697	0.00279	0.216759	اندازه دانه ها

جدول ۱۱: جدول تعیین کلاس نهایی توده سنگ شماره ۱

خیلی سریع	سریع	متوسط	آهسته	خیلی آهسته
۰/۱۴۲۰۱۹	۰/۳۳۰۶۶۸	۰/۴۱۰۶۶۱	۰/۲۵۲۷۷۱	۰/۲۰۲۳۲۷

دارد، با انجام محاسبات فازی، این توده مشابه طبقه‌بندی کلاسیک در کلاس چهار قرار گرفته است و از این بابت دو طبقه‌بندی سازگاری مناسبی نشان می‌دهند.

توده‌سنگ ۵ و ۸، طبق تشخیص صحیح هر دو روش طبقه‌بندی در کلاس متوسط (۳) قرار می‌گیرند. توده سنگ ۶ با توجه به امتیاز ۲۸، در سیستم کلاسیک در کلاس چهار قرار گرفته اما با توجه به محاسبات فازی انجام شده در کلاس پنج فازی قرار می‌گیرد. دلیل این موضوع احتمالاً به شرایط تک‌تک پارامترهای توده‌سنگ و شرایط مرزی تعدادی از آن‌ها مربوط است.

توده سنگ ۷ در هر دو روش طبقه‌بندی به کلاس متوسط تعلق گرفته است. گرچه این توده‌سنگ در حالت کلی دارای شرایط مرزی است اما در نهایت در سیستم فازی نیز به طور قطعی در کلاس سه طبقه‌بندی شده است. این موضوع به نحوه امتیازدهی و نگرش منطق فازی به پارامترهای مورد ارزیابی بر می‌گردد.

علاوه بر تحلیل توده‌سنگ‌ها از دیدگاه کلی، توده‌سنگ‌های مورد مطالعه را می‌توان از دیدگاه تک‌تک پارامترها مورد ارزیابی قرار داد. با توجه به مشخصات توده‌سنگ‌های مورد مطالعه، در هفت توده سنگی که نتایج طبقه‌بندی کلاسیک با طبقه‌بندی فازی اختلاف دارند، تعدادی از پارامترها دارای شرایط مرزی خاصی هستند که در نهایت باعث بروز اختلاف در کلاس این توده سنگ‌ها می‌شوند. جدول ۱۲ پارامترهای دارای شرایط مرزی در توده سنگ‌هایی که طبقه‌بندی فازی و کلاسیک اختلاف کلاس دارند را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲: پارامترهای دارای شرایط مرزی در توده سنگ‌هایی که طبقه‌بندی فازی و کلاسیک اختلاف کلاس دارند

نام توده	پارامترها
۱	بازشدگی درزه‌ها، شیب‌داری درزه‌ها
۲	سختی موهس، بازشدگی درزه‌ها، شیب‌داری درزه‌ها
۳	شیب‌داری درزه‌ها
۶	شیب‌داری درزه‌ها

چنانچه دیده می‌شود، وجود این تعداد پارامتر مرزی در یک

جدول ۱۲: نتایج حاصل از طبقه‌بندی توده‌سنگ‌های معدن سنگ آهک سیمان شاهرود

نام توده	RD _i	روش RD _i	شماره کلاس	طبقه‌بندی فازی	شماره کلاس
۱	۴۰	هم آهسته-متوسط هم متوسط	۳ و ۴	متوسط	۳
۲	۳۳	آهسته تا متوسط	۴	خیلی آهسته	۵
۳	۴۲	متوسط	۳	خیلی آهسته	۵
۴	۳۴	آهسته تا متوسط	۴	آهسته	۴
۵	۵۱	متوسط	۳	متوسط	۳
۶	۲۸	آهسته تا متوسط	۴	آهسته	۵
۷	۴۱	متوسط	۳	متوسط	۳
۸	۵۱	متوسط	۳	متوسط	۳

محاسبات ریاضی مربوط به روش فازی، این توده سنگ در کلاس سه قرار می‌گیرد. این در حالی است که روش کلاسیک در اختصاص این توده به یک کلاس خاص ناتوان است.

توده‌سنگ ۲ با توجه به قرارگیری در کلاس چهار در طبقه‌بندی کلاسیک، در طبقه‌بندی فازی در کلاس پنج قرار گرفته است. از آنجایی که امتیاز این توده (۳۳) تقریباً در محدوده میانی بازه ۲۰-۴۰ می‌باشد، احتمالاً چنین تشخیصی توسط سیستم فازی مربوط به ضرایب پارامترها در این روش و یا سادگی سیستم کلاسیک در امتیازدهی می‌باشد.

توده‌سنگ ۳ با امتیاز ۴۲، با توجه به طبقه‌بندی کلاسیک دارای شرایط مرزی حادی است، اما با توجه به محاسبات فازی انجام شده در کلاس پنج قرار می‌گیرد. علت این اختلاف در این توده‌سنگ را می‌توان در شرایط تک‌تک پارامترها نسبت به شرایط مرزی دانست.

توده‌سنگ ۴ با توجه به امتیاز کسب کرده در سیستم کلاسیک که در محدوده نزدیک به مرکز بازه ۲۰-۴۰ قرار

بسیار نزدیک به هم برخوردارند. در این تحقیق سعی شد تا با تکیه بر منطق فازی و با استفاده از عملگرهای فازی طبقه‌بندی جدیدی برای پیش‌بینی سرعت حفاری ارائه شود.

در این تحقیق به منظور افزایش توانایی و توسعه کاربرد شاخص قابلیت حفاری توده سنگ (RDi)، با استفاده از پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی مذکور تعدادی تابع فازی بر روی این پارامترها تعریف شده و در نهایت با استفاده از این توابع کلاس هر توده سنگ از نظر حفاری تعیین شده است. به منظور مقایسه خروجی طبقه‌بندی فازی و طبقه‌بندی کلاسیک، توده سنگ‌های معدن آهک کارخانه سیمان شاهرود به عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج مطالعات نشان داد که طبقه‌بندی فازی از توانایی بالاتری نسبت به طبقه‌بندی کلاسیک برخوردار بوده و در شرایط پیچیده، سرعت حفاری را بهتر تحلیل می‌نماید.

با توجه به اطلاعات به دست آمده، مشخص شد که نتایج طبقه‌بندی فازی در ۵ مورد از ۸ سایت آتشفکاری مورد مطالعه (۶۲٪) نتایج طبقه‌بندی فازی با طبقه‌بندی RDi یکی است اما در سایر موارد که اکثراً شرایط مرزی نیز می‌باشند، طبقه‌بندی فازی با توانایی بالاتری نسبت به طبقه‌بندی کلاسیک، رده‌های متفاوتی نسبت به آن طبقه‌بندی ارائه می‌کند. این تکنیک در ۳۵ درصد موارد مورد مطالعه باعث شفافیت بیشتر طبقه‌بندی توده‌سنگ‌ها شده و ابهام طبقه‌بندی RDi را برطرف می‌نماید.

۸- تقدیر و تشکر

از مدیران محترم و پرسنل سختکوش معدن سنگ آهک سیمان شاهرود که شرایط مناسب را برای کارهای صحرایی در آن معدن فراهم نمودند سپاسگزاریم.

منابع

- [1] Akun, M. E. & Karpuz, C. 2005, "Drillability studies of surface-set diamond drilling in Zonguldak region sandstones from Turkey", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 42, 473-479 .
- [2] Ersoy, A. & Waller, M. D. 1995a, "Textural characterization of rocks". J. of Engineering Geology, June, Vol. 39, Issues 3-4, 123-136 .
- [3] Ersoy, A. & Waller, M.D. 1995b, "Prediction of drill-bit performance using multi-variable linear regression analysis". Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry, , Vol. 104, May-August, pp. A101-114.

توده سنگ در نهایت سیستم فازی را به سمت یک کلاس دیگر سوق می‌دهد تا بتواند بهترین شرایط و مناسب‌ترین کلاس سنگ را پیش‌بینی و پیشنهاد کند.

۶- تهیه نرم‌افزار طبقه‌بندی قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها

پس از ارائه سیستم طبقه‌بندی فازی، با توجه به حجم بالای محاسبات ریاضی و نیاز به دقت بالا در این محاسبات، نرم‌افزاری برای انجام محاسبات و ارائه کلاس توده‌سنگ تهیه گردید. این نرم‌افزار با استفاده از زبان Visual C++ تهیه شده و دارای یک پنجره اصلی است. در پنجره اصلی این برنامه از کاربر خواسته می‌شود تا کمیت‌های مربوط به شش پارامتر طبقه‌بندی شامل مقاومت فشاری، سختی موهس، اندازه دانه‌ها، فاصله‌داری، جدایش و شیب‌داری درزه‌ها به صورت عددی وارد نماید. سپس باید نوع طبقه‌بندی مورد نظر از بین گزینه طبقه‌بندی RDi و طبقه‌بندی فازی انتخاب شود. با اجرای برنامه، خروجی برنامه به دو صورت امتیاز RDi و نیز کلاس مربوط به توده‌سنگ از نظر طبقه‌بندی انتخاب شده، در در گوشه پایین سمت راست پنجره اصلی نشان داده می‌شود. شکل ۲ پنجره اصلی نرم‌افزار تهیه شده را نشان می‌دهد.

شکل ۲: پنجره اصلی نرم‌افزار تهیه شده

نتایج حاصل از این نرم‌افزار دقیقاً با نتایج نرم‌افزار اکسل مطابقت دارد با این تفاوت که با استفاده از این نرم‌افزار نیاز کاربر به فرمول‌نویسی در نرم‌افزار اکسل کاملاً مرتفع شده و سرعت، دقت و سهولت محاسبات بسیار افزایش می‌یابد.

۷- نتیجه‌گیری

طبقه‌بندی‌های کلاسیک در مهندسی معدن و مکانیک سنگ از محدودیت‌هایی در تشخیص شرایط مرزی و نیز تفکیک شرایط

- [11] Singh, T. N, Gupta, A. R. & Sain, R. 2006, "A comparative analysis of cognitive system for the prediction of drillability of rocks and wear factor", Geotechnical and Geological Engineering, 24: 299-312.
- [12] Tanaino, A. S., 2005, "Rock classification by drillability. Part 1: Analysis of the available classification". Journal of Mining Science, Vol. 41, No. 6, pp. 541-549 .
- [13] Thuro, K, 1997, "Drillability prediction-geological influences in hard rock drill and blast tunneling", Geol Runsch, 86: 426-438 .
- [14] Wilbur, L. 1982. "Rock Tunnel Engineering Handbook". Edited by BickeL and kuesel, Publication of Van Norstrand Reinhold Company.
- [15] Hoseinie, S.H, Aghababaei. H, Pourrahimian, Y. 2008, "Development of a new classification system for assessing of Rock mass Drillability index (RD_i)", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 45, 1-10.
- [16] Zadeh L.A., 1965, "Fuzzy sets". Information and Control 8: 338-353
- [۱۷] وانگ، لی، (۱۳۷۸)، سیستم‌های فازی و کنترل فازی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ترجمه محمد تشنه‌لب.
- [4] Jimeno, C. L, Jimeno. E. L. & Carcedo, F. J. A. 1995, "Drilling and blasting of rocks". A.A Balkema, Pub Rotterdam ,
- [5] Jung. S. J, Prisbrey. K & Wu. G. 1994, "Prediction of rock hardness and drillability using acoustic emission signatures during indentation". International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 31, Issue 5, 561-567 .
- [6] Kahraman S., Bilgin N. & Feridunoglu C. 2003, "Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 40. 711-723 .
- [7] Kahraman, S. Balci, C. Yazici, S. & Bilgin, N. 2000, "Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drilling using a new drillability index". International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 37: 729-743 .
- [8] Kaiser. P. K & McCreath. D. R. 1994, "Rock mechanics considerations for drilled or bored excavations in hard rock". Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 9, Issue 4, October, 425-437 .
- [9] Li, X., Rupert, G., Summers, D. A., Santi, P. & Liu, D. 2000, "Analysis of impact hammer rebound to estimate rock drillability", Journal of Rock Mechanics & Rock Engineering, 33(1), 1-13 .
- [10] Rao KUM, Misra B. "Principles of rock drilling", Rotterdam: Balkema; 1998 .

زیرنویس‌ها

¹ Drilling Rate Index

² Bit Wear Index

³ Wilbur

⁴ Rock mass Drillability index

⁵ Excel