

پیش‌بینی برق دستگاه برش اره برای سنگ ساختمانی با روش فازی چندمتغیره

رضا میکائیل^{۱*}، محمد عطایی^۲، وحید سبزی^۳، امیر جعفرپور^۴

- ۱- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه
- ۲- استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
- ۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه
- ۴- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

(دریافت ۱۳۹۸/۰۲/۰۷، پذیرش ۱۳۹۸/۰۷/۰۳)

چکیده

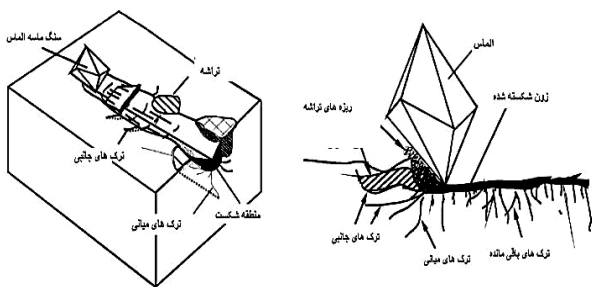
انرژی مصرفی دستگاه‌های برش‌دهنده سنگ یکی از فاکتورهای مهم هزینه‌ساز در طی فرآیند برش سنگهای ساختمانی است. با پیش‌بینی دقیق انرژی مصرفی دستگاه برش، علاوه بر تخمین هزینه‌های برش، می‌توان به شرایط بهینه عملیاتی برش در جهت کاهش مصرف انرژی نزدیک شد. در این پژوهش، سعی شده است تا با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی فازی چند متغیره، میزان قابلیت برش پذیری سنگ‌های ساختمانی نرم را از دیدگاه شدت جریان مصرفی دستگاه برش اره با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی از قبیل مقاومت کششی برزیلی، درصد کوارتز محتوای سنگ، اندازه متوسط دانه، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول یانگ و سختی موس مورد ارزیابی قرار داد. بدین منظور، پس از توسعه سیستم طبقه‌بندی فازی، هفت نمونه سنگ ساختمانی کربناته شامل تراورتن آذرشهر، تراورتن حاجی‌آباد، تراورتن دره‌بخاری، مرمریت هرسین، مرمریت صلصالی، مرمریت انارک و مرمریت هفتومان با استفاده از سیستم فازی ارایه شده، رده‌بندی شد و نتایج با میزان شدت جریان مصرفی دستگاه برش اره مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که سیستم طبقه‌بندی فازی سه رده‌ای، قادر به ارزیابی بهتری از قابلیت برش‌پذیری سنگ‌های ساختمانی نرم از دیدگاه برق مصرفی دستگاه برش سنگ است.

کلمات کلیدی

قابلیت برش سنگ‌های کربناته، ماشین برش اره، طبقه‌بندی فازی، برق مصرفی.

۱- مقدمه

خراشیده می‌شوند، ذرات تشکیل‌دهنده سنگ، سایش می‌یابند که در نتیجه آن، برش سنگ به کمک سگمنت‌های الماسی (جانمایی‌شده بر روی تیغه‌های اره) اتفاق می‌افتد [۲]. فرآیند برش در لحظه برخورد دانه الماس به سطح سنگ مطابق شکل ۲ با استفاده از نظریه شکستگی- فرورفتگی مواد ترد و شکننده توصیف می‌شود. توسعه ترک‌ها و تقاطع ترک‌ها به دلیل فرورفتگی و برش دانه‌های الماس منجر به شکستگی سنگ می‌شود [۳].

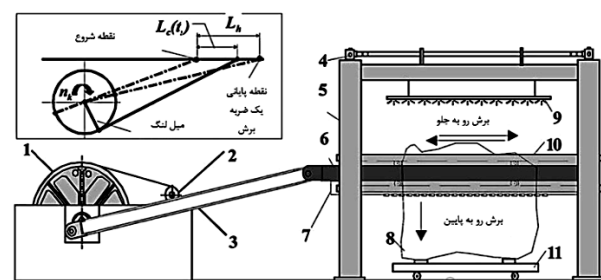


شکل ۲: سطح شیار ایجاد شده و ایجاد برش با الماس [۳]

۲- پیشینه پژوهش

در زمینه برش با دستگاه اره، مطالعات محدودی انجام شده است. اولین تحقیقات در این زمینه را لونس در سال ۱۹۷۰ انجام داد. وی در پژوهش‌های خود به بررسی نیروهای برش و سایش سگمنت‌های الماس با دستگاه اره پرداخت. در این پژوهش، ارتباط میان سایش الماس و نیروهای برش مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان از ارتباط ضعیف میان پارامترهای یاد شده با یکدیگر داشتند [۴]. یانسن در پژوهشی دریافت که تغییر شکل تیغه‌های الماسی تابعی از کشش، گریز از مرکز، ضریب اصطکاک و پارامترهای هندسی تیغه است [۵]. در همین راستا، گراخ و همکاران، با استفاده از یک ماشین اره در مقیاس آزمایشگاهی (با آهنگ تغذیه‌ای در بازه ۱۵ تا ۶۰ سانتی‌متر در ساعت) به بررسی و اندازه‌گیری تغییرات انحراف و کشش تیغه‌ها پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که انحراف تیغه، متاثر از پارامترهای هندسی، گریز از مرکز و کشش تیغه است. در عمل، اصطکاک میان سگمنت و سنگ، مقدار کشش موثر تیغه را کاهش می‌دهد. به طوری که در فرآیند اره‌کاری، کشش موثر تیغه می‌تواند تابعی از نیروهای عمودی در جهت تغذیه باشد که

سنگ‌های تزئینی یکی از مهم‌ترین ذخایر معدنی کشورند که در صورت توجه و استفاده مناسب از آن‌ها، می‌توانند علاوه بر رفع نیازهای داخلی، بخش مهمی از صادرات غیرنفتی کشور محسوب شوند و درآمد چشمگیری را برای کشور به ارمغان آورند. پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی در تخمین هزینه‌ها و همچنین طراحی یک کارخانه فرآوری اهمیت زیادی دارد. شناخت کامل و ارزیابی توانایی تجهیزاتی برش، برنامه‌ریزان تولید را به سمت بهبود سرعت فرآوری و افزایش تولید سوق می‌دهد. نیاز به تولیدی با کیفیت عالی و قابل رقابت در بازارهای جهانی مستلزم استفاده از فناوری و ابزارهای پیشرفته نوین در بخش استخراج و فرآوری سنگ است. به کارگیری صحیح این تجهیزات از یک سو و شناخت و بررسی دقیق عملکرد آن‌ها از سوی دیگر، می‌تواند به افزایش بازدهی و همچنین کیفیت سنگ‌های پرداخت شده کمک کند. تجهیزات برش‌دهنده اره‌ای با توان تولید بالا و همچنین کیفیت برش قابل رقابت به طور نسبتاً گسترده‌ای در حال بهره‌برداری در کارخانه‌های فرآوری‌اند. برش سنگ به وسیله اره، از روش‌های نوین در کارخانه‌های سنگ‌بری است. اره‌های برش عمدتاً در کارخانه‌هایی با ظرفیت تولید بالا به کار گرفته می‌شوند. در این روش، بلوک سنگ به وسیله یک‌سری اره‌های موازی با تیغه‌های الماسی بریده می‌شود. اجزای اصلی دستگاه برش اره در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: اجزای اصلی دستگاه برش [۱]

فرآیند برش سنگ با دستگاه اره را می‌توان مشابه با سایر فرآیندهای برش (مانند برش‌های دیسکی و سیم برش الماسه)، یک فرآیند سایشی تلقی کرد. وقتی دانه‌های الماس قرار گرفته بر روی سگمنت‌های الماسه بر روی سطح سنگ

آن‌ها را بررسی کرد [۱۰]. همچنین میکابیل و همکاران در پژوهشی دیگر، با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چند معیاره پرومیتی^۱ به ارزیابی قابلیت برش‌پذیری سنگ‌های ساختمانی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که با استفاده از این روش و با در نظر گرفتن عوامل مختلف ذاتی و مشخصه‌های مکانیکی سنگ، می‌توان با دقت قابل قبولی به ارزیابی قابلیت برش سنگ‌ها پرداخت [۱۱]. نوس و همکاران نیز پیش‌بینی بازدهی عملیات برش با استفاده از اره‌های چندتیغه‌ای را مطالعه کردند [۱۲]. آریافر و میکابیل در پژوهشی دیگر، به تخمین شدت جریان مصرفی دستگاه برش سنگ پرداختند و با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، این مساله را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۳]. الماسی و همکاران نیز با توسعه یک طبقه‌بندی مبتنی بر خواص سنگ (سایش، سختی و سفتی) به پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی سخت پرداختند [۱۴]. همچنین توماج و همکاران در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۸ به تخمین قابلیت برش سنگ‌ها با ارایه یک سیستم طبقه‌بندی مبتنی بر طبیعت ذاتی سنگ و نیز نوع سنگ و شرایط زمین‌شناسی معادن کواری پرداختند [۱۵]. درمیشی و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی عملکرد دستگاه برش اره با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ پرداختند. آن‌ها در تحقیقشان مدل‌های آماری چند متغیره خطی و غیرخطی را با دقت خوبی برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش ارایه دادند [۱۶]. در ادامه آن‌ها تحقیقاتشان را در این زمینه با کمک روش‌های هوشمند بسط دادند [۱۷]. شفیع‌ی حق‌شناس و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی عملکرد دستگاه‌های برش اره (پیش‌بینی شده جریان مصرفی دستگاه) در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی کربناته بر اساس تلفیق محاسبات نرم و مدل‌های رگرسیونی (خطی و غیرخطی) چند متغیره پرداختند [۱۸].

به طور کلی، مراحل و روش انجام پژوهش را می‌توان به مطالعات کتابخانه‌ای برای شناسایی پارامترهای موثر بر قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی و مکانیزم برش سنگ با استفاده از تجهیزات برش‌دهنده اراهی، ارایه سیستم طبقه‌بندی فازی برای پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی در طی فرآیند برش با تجهیزات اراهی، مطالعات میدانی برای بررسی برش سنگ‌های مورد مطالعه در کارخانه فرآوری سنگ‌های ساختمانی، انجام مطالعات آزمایشگاهی برای جمع‌آوری اطلاعات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه و در نهایت ارزیابی و

در شرایط مختلف با تغییر مشخصه‌های سنگ تغییر می‌یابد [۶]. در ادامه این مطالعات، ویمن و همکاران مطالعات خود را در زمینه بررسی و ارزیابی دستگاه اره انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که کشش تیغه‌های الماسی نقش مهمی را در فرآیند برش دستگاه اره بازی می‌کند. نتایج حاصل از بررسی‌های آن‌ها نشان داد که تنش کششی از نوک تیغه به انتهای پایین آن کشیده شده است و این مقدار در موقعیت‌های اندازه‌گیری مختلف (جلو، میانه، انتها) متفاوت است. در نهایت، در فرآیند اره‌کاری، تغییر فرکانس کشش در تیغه‌های الماسی اره و تاثیر آهنگ تغذیه روی تنش کششی تیغه‌ها از جمله عوامل مهم و موثر بر عملکرد برش است [۷]. وانگ و کلاوزن، پژوهشی را با ابزار برش تک‌نقطه‌ای (تک‌سگمندی) بر روی یک نمونه سنگ کربناته تحت شرایط مختلف برش انجام دادند. آن‌ها در مطالعات خود، شرایط سطوح تماس میان سنگ و دانه الماس و همچنین مکانیزم برش ترد سنگ را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که مکانیزم برش سنگ مرمر می‌تواند به صورت یک تغییر شکل پلاستیک (ناحیه خرد شده) با شکستگی ترد تشریح شود. تغییر شکل پلاستیک و شکست ترد متاثر از شرایط برش مانند عمق برش، خنک‌کننده برش، شکل نوک ابزار برش و مشخصه‌های سنگ است. نظریه فرورفتگی سنگ می‌تواند برای آشکار ساختن برخی سناریوها در دستگاه برش اره استفاده شود. فقط تعداد محدودی از دانه‌های الماس در روی سطح سگمنت در هر ضربه از دستگاه اره در فرآیند برش شرکت می‌کنند. نیروهای برشی مستقیماً در ارتباط با موقعیت دانه الماس در زمان برش، جهت برش، مسیرهای برش و عمق برش‌اند [۳]. وانگ و کلاوزن، بررسی‌های خود را در زمینه فرآیند برش اراهی، معطوف به شبیه‌سازی کامپیوتری این فرآیند کردند. شبیه‌سازی برش اره می‌تواند یک جایگزین عملی برای طراحی به ویژه محاسبه تعداد دانه‌های الماس و توزیع آن‌ها بر روی سگمنت تیغه‌های اره فراهم کند [۸]. بایرام بر اساس شاخص مشخصه‌های سنگ، به پیش‌بینی قابلیت برش سنگ پرداخت. در این پژوهش آزمایشگاهی، پارامترهایی مانند ضریب سختی، مقاومت فشارشی تک‌محوره، مقاومت کششی و تردی سنگ‌ها مورد توجه بوده است و اثرگذاری آن‌ها بر قابلیت برش سنگ مورد بررسی قرار گرفت [۹]. توماج نیز با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی پرداخت و استفاده از اره‌های برش دیسکی در برش

اعتبارسنجی سیستم طبقه‌بندی تقسیم‌بندی کرد.

۳- روش‌شناسی پژوهش

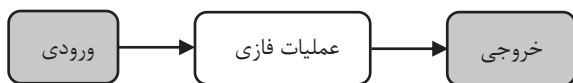
در این پژوهش، به منظور ارزیابی یک سیستم طبقه‌بندی برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش ااره در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی نرم، تئوری مجموعه‌های فازی و رویکرد طبقه‌بندی فازی چندفاکتوره به کار گرفته شده است. برای ارزیابی سیستم طبقه‌بندی فازی به منظور پیش‌بینی شدت جریان مصرفی، ابتدا با ارزیابی تئوری روش‌شناسی مورد نظر، مساله به چالش کشیده شده و سپس با انجام محاسبات و تحلیل نتایج خروجی حاصل از روش ارزیابی شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. اولین گام از تحلیل داده‌ها، تعیین درجه اهمیت معیارها برای ایجاد سیستم طبقه‌بندی جدید است. میزان اهمیت هر یک از معیارهای یاد شده با استناد به نظر متخصصان تعیین شده است. در این مرحله، ابتدا فرم پرسش‌نامه برای کارشناسان خبره در زمینه برش سنگ ارسال شده و پس از جمع‌آوری فرم‌های پرسش‌نامه، درجه اهمیت هر یک از معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) و همچنین روش پیشنهادی ساعتی محاسبه شد. گام بعدی پس از تعیین درجه اهمیت معیارها، طبقه‌بندی معیارها در سه رده کیفی متفاوت (خوب، متوسط و ضعیف) است. پس از تعیین رده‌های کیفی مربوط به هر معیار، برای هر یک از معیارها، یک تابع عضویت تعریف شده و سپس توابع عضویت سه رده‌ای برای تمامی معیارها ارزیابی شدند. در ادامه، روش پژوهش به تفصیل تشریح شده و پس از آن، کاربرد روش ارزیابی شده در قالب مطالعه موردی ارزیابی می‌شود.

۳-۱- ارزیابی سیستم طبقه‌بندی فازی چند فاکتوره

مجموعه‌های فازی به مجموعه‌هایی گفته می‌شود که اعضای آن‌ها به صورت مبهم و نادقیق‌اند (مانند مجموعه اعداد بزرگ). خواص و ویژگی‌هایی که برای تعیین اعضای مجموعه فازی بیان می‌شوند، به صورت فازی است و یک توصیف دقیق نیستند. بنابراین می‌توان از توابع تعلق مختلف برای نشان دادن یک مجموعه فازی استفاده کرد [۲۰، ۱۹].

در مجموعه‌های فازی عضویت بعضی از اعضا یا تمامی آن‌ها به طور کامل واضح و مشخص نیست و عناصر آن به صورت نسبی به آن مجموعه تعلق دارند. اگر یک مجموعه دو ارزشی کلاسیک تعمیم داده شود، یک مجموعه چند ارزشی

فازی به وجود می‌آید که هر مقداری در بازه $[0, 1]$ می‌تواند به آن تعلق داشته باشد. بنابراین در مجموعه‌های فازی میزان عضویت عناصر مختلف بین صفر و یک متغیر است. یکی از روش‌های فازی، روش فازی چند فاکتوره است که در حل مسایل مختلف مهندسی می‌توان از آن استفاده کرد. این روش به ترتیب شامل تعریف ورودی‌های مساله، انجام عملیات فازی بر روی داده‌ها و در نهایت، خروجی مساله است که در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۱].

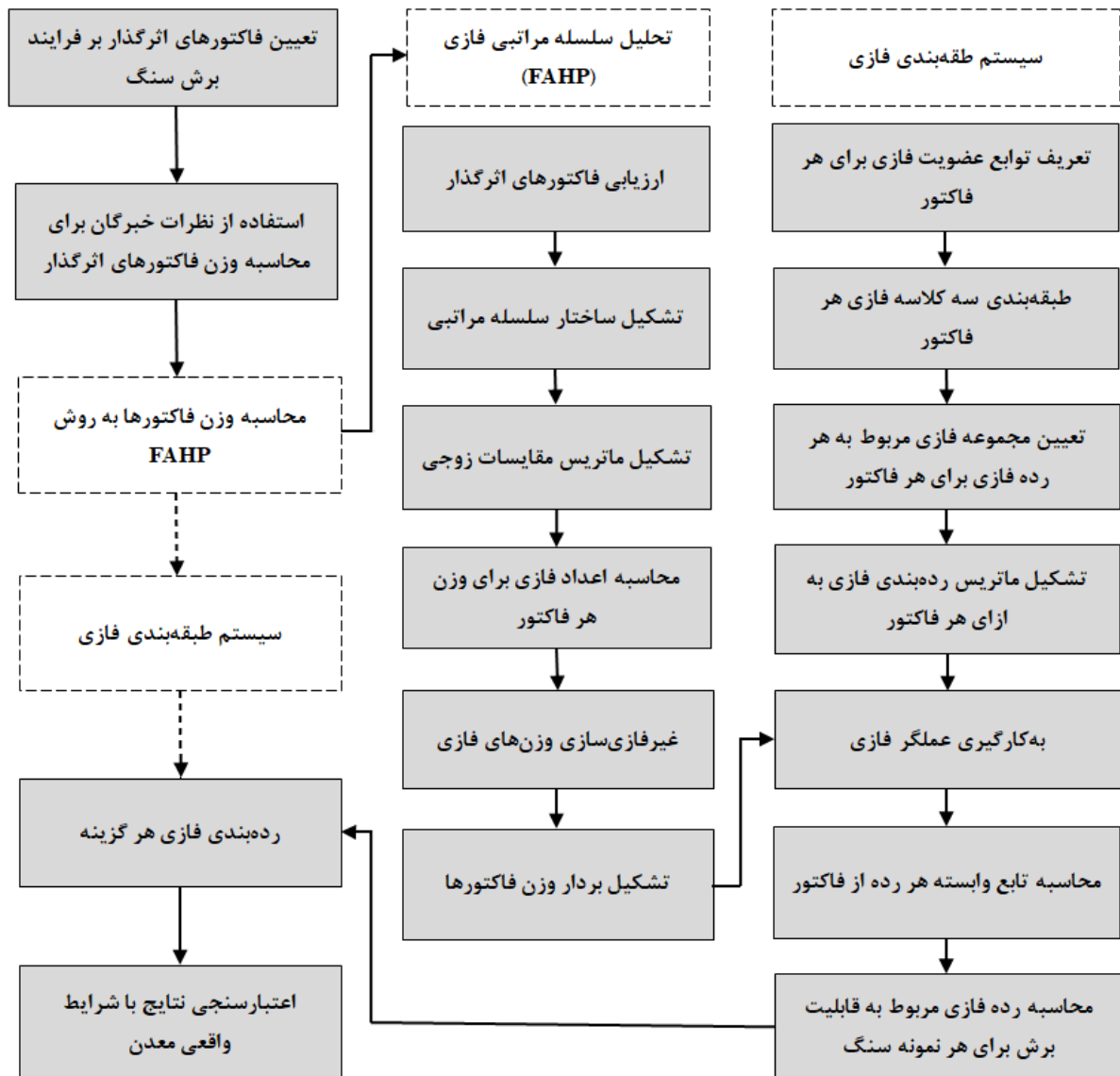


شکل ۳: مراحل روش فازی چند فاکتوره [۲۱]

نتایج حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی که بر روی نمونه سنگ‌ها انجام می‌شود، به عنوان ورودی‌های مساله در نظر گرفته می‌شود. عملیات فازی شامل تعیین فاکتورها، بردار وزن، توابع عضویت و توابع تصمیم‌گیرنده (عملگرها) است. در نهایت، پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های مطالعه شده با استفاده از سیستم طبقه‌بندی خروجی مساله است. فلوجارت مراحل انجام روش ترکیبی مورد استفاده در این پژوهش، در شکل ۴ نشان داده شده است.

۳-۲- تعیین معیارهای مساله

به طور کلی، پارامترهای موثر در فرآیند برش سنگ را می‌توان در سه بخش اصلی شامل مشخصات قطعه کار یا سنگ، مشخصات برش و مشخصات مدیریتی (از قبیل مهارت اپراتور و شرایط محیطی کار) مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. از میان این عوامل، پارامترهای عملیاتی و مشخصات طرح برش به عنوان پارامترهای قابل کنترل (پارامترهای وابسته) و پارامترهای مربوط به مشخصات سنگ به عنوان پارامترهای غیرقابل کنترل (پارامترهای مستقل) در فرآیند برش سنگ مطرح‌اند که در این پژوهش سعی شد تا در سیستم طبقه‌بندی فقط پارامترهای غیرقابل کنترل (پارامترهای مرتبط با مشخصات مکانیکی سنگ) مورد بررسی قرار گیرد. از جمله مهم‌ترین عوامل غیرقابل کنترل می‌توان به پارامترهای مقاومتی، مشخصات الاستوپلاستیسیته، سختی و ساینده‌گی سنگ‌ها اشاره کرد. پس از انجام بررسی‌های لازم، پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، شاخص



شکل ۴: فلوچارت روش‌شناسی پژوهش

۳-۲-۲- تعریف توابع عضویت

در سیستم طبقه‌بندی جدید توابع عضویت برای هر یک از معیارها به صورت یک تابع مثلثی در سه رده خوب، متوسط و ضعیف تعریف شده‌اند. نمودار این توابع در شکل ۵ نشان داده شده است. برای هر یک از پارامترهای موثر بر قابلیت برش، توابع عضویت مثلثی تعریف شد که در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در این توابع، درجه عضویت معیارها در سه رده با $\mu(x)$ نشان داده شده است. بنابراین، از لحاظ قابلیت برش، سنگ‌ها در سه رده خوب، متوسط و ضعیف طبقه‌بندی می‌شوند.

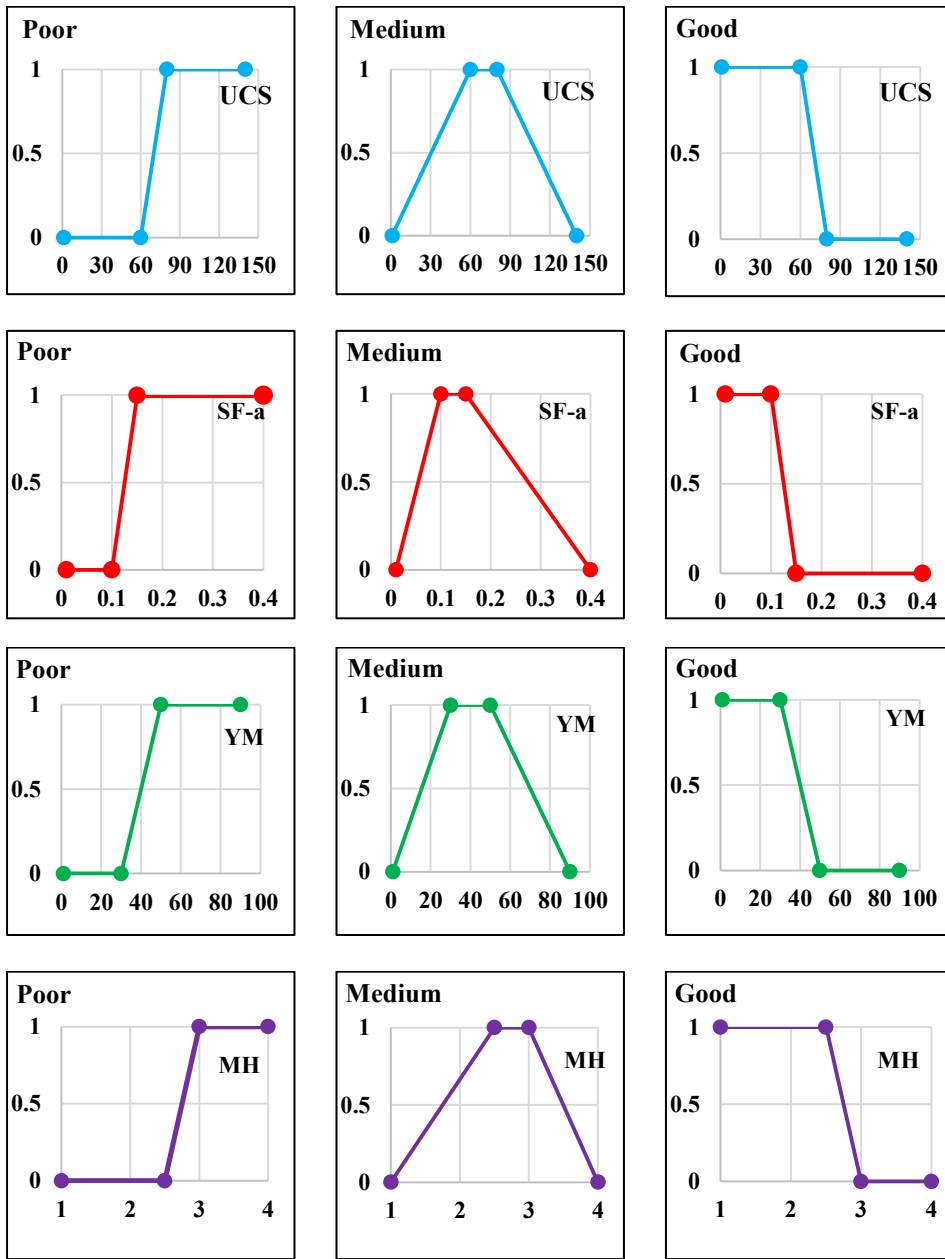
سایندگی شیمازک (SF_a)، مدول یانگ (YM) و سختی موس (MH) به عنوان معیارهای موثر در سیستم طبقه‌بندی فازی انتخاب شدند.

۳-۲-۱- بردار وزن

وزن معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) استخراج شده و نتایج آن به صورت رابطه ۱ است:

$$W = [UCS, SF_a, YM, MH] \quad (1)$$

$$\Rightarrow W = [0,37, 0,36, 0,1, 0,17]$$



شکل ۵: نمودار توابع مثلثی پارامترهای موثر در قابلیت برش برای نمونه سنگ‌های نرم

۳-۲-۳- عملگرهای فازی

طبق عملگرهای ارایه شده توسط دوپویس و پرید [۲۲] و یاگر [۲۳] و با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه، قابلیت برش سنگ‌ها به صورت روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شود:

$$D^W (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m) = \bigwedge_{i=1}^m [(1-w_i) \vee \mu_i] \quad (2)$$

$$D_Y^W (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m) = \bigwedge_{i=1}^m \mu_i^{w_i} \quad (3)$$

۴-۲-۳- توسعه طبقه‌بندی وی و همکاران

در این بخش از پژوهش، به توسعه طبقه‌بندی وی و همکاران برای ارزیابی و قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی با دستگاه اره پرداخته شده است. پارامترهای مورد استفاده در این سیستم طبقه‌بندی فازی شامل UCS، SF_a، YM و MH است. هر معیار، در پنج و سه رده مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۲ رده‌های مربوط به طبقه‌بندی سه رده‌ای را نشان می‌دهد.

جدول ۱: توابع عضویت ارایه شده برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های نرم

پارامتر	ضعیف	متوسط	خوب
UCS	$\mu_1^{(3)}(x) = \begin{cases} 0 & 1 \leq x < 60 \\ \frac{1}{20}(x-60) & 60 \leq x < 80 \\ 1 & 80 \leq x < 140 \end{cases}$	$\mu_1^{(2)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{59}(x-1) & 1 \leq x < 60 \\ 1 & 60 \leq x < 80 \\ \frac{1}{60}(140-x) & 80 \leq x < 140 \end{cases}$	$\mu_1^{(1)}(x) = \begin{cases} 1 & 1 \leq x < 60 \\ \frac{1}{20}(80-x) & 60 \leq x < 80 \\ 0 & 80 \leq x < 140 \end{cases}$
SF _a	$\mu_2^{(3)}(x) = \begin{cases} 0 & 0.01 \leq x < 0.1 \\ \frac{1}{0.05}(x-0.1) & 0.1 \leq x < 0.15 \\ 1 & 0.15 \leq x \leq 1 \end{cases}$	$\mu_2^{(2)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{0.09}(x-0.1) & 0.01 \leq x < 0.1 \\ 1 & 0.1 \leq x < 0.15 \\ \frac{1}{0.85}(x-0.1) & 0.15 \leq x \leq 1 \end{cases}$	$\mu_2^{(1)}(x) = \begin{cases} 1 & 0.01 \leq x < 0.1 \\ \frac{1}{0.05}(0.15-x) & 0.1 \leq x < 0.15 \\ 0 & 0.15 \leq x \leq 1 \end{cases}$
SF _a	$\mu_3^{(3)}(x) = \begin{cases} 0 & 1 \leq x < 30 \\ \frac{1}{20}(x-30) & 30 \leq x < 50 \\ 1 & 50 \leq x \leq 90 \end{cases}$	$\mu_3^{(2)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{29}(x-1) & 1 \leq x < 30 \\ 1 & 30 \leq x < 50 \\ \frac{1}{40}(90-x) & 50 \leq x \leq 90 \end{cases}$	$\mu_3^{(1)}(x) = \begin{cases} 1 & 1 \leq x < 30 \\ \frac{1}{20}(50-x) & 30 \leq x < 50 \\ 0 & 50 \leq x \leq 90 \end{cases}$
SF _a	$\mu_4^{(3)}(x) = \begin{cases} 0 & 1 \leq x < 2.5 \\ \frac{1}{0.5}(x-2.5) & 2.5 \leq x < 3 \\ 1 & 3 \leq x \leq 4 \end{cases}$	$\mu_4^{(2)}(x) = \begin{cases} \frac{1}{0.5}(x-1) & 1 \leq x < 2.5 \\ 1 & 2.5 \leq x < 3 \\ (4-x) & 3 \leq x \leq 4 \end{cases}$	$\mu_4^{(1)}(x) = \begin{cases} 1 & 1 \leq x < 2.5 \\ \frac{1}{0.5}(3-x) & 2.5 \leq x < 3 \\ 0 & 3 \leq x \leq 4 \end{cases}$

$$\mu_i = f(g_i) \cong (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) \in F(C) \quad (6)$$

رابطه ماتریس فازی (R) را می‌توان از f استنباط کرد (رابطه ۷):

$$R \cong R_f = \begin{bmatrix} f(g_1) \\ f(g_2) \\ \vdots \\ f(g_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

سیس با عملگر فازی می‌توان بر اساس رابطه ۸، ماتریس R را به دست آورد:

$$T_R : F(G) \rightarrow F(C), A \rightarrow T_R \cong A \circ R \quad (8)$$

علامت \circ به معنی عملگر فازی است.

ماتریس رده‌بندی فازی نیز مطابق رابطه ۹ است:

$$B = A \circ R = (b_1, b_2, \dots, b_m) \in F(C) \quad (9)$$

که می‌تواند هر فاکتور مطابق روابط ۱۰ و ۱۱ باشد:

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n) = F(G) \quad (10)$$

جدول ۲: طبقه‌بندی معیارها در سه رده

ضعیف	متوسط	خوب	فاکتور
۸۰-۱۴۰	۶۰-۸۰	۱-۶۰	g ₁ : UCS (MPa)
۰.۱۵-۱	۰.۱-۰.۱۵	۰.۱-۰.۱	g ₂ : SF _a (N/mm)
۵۰-۹۰	۳۰-۵۰	۱-۳۰	g ₃ : YM (GPa)
۳-۴	۲.۵-۳	۱-۲.۵	g ₄ : MH (n)

۳-۲-۵- تعیین مجموعه فازی

مجموعه فازی شامل عناصری است که با تغییر فاکتور اعضای آن مجموعه است. این ایده در مجموعه‌های کلاسیک نیز ثابت است، به دلیل این که عناصر یک مجموعه تنها در صورتی می‌تواند اعضای آن باشند که عضویت آن‌ها در مجموعه به صورت کامل باشد [۲۴]. سیستم طبقه‌بندی فازی به طور عادی شامل مجموعه‌های فاکتور، رده‌بندی و یک فاکتور طبقه‌بندی است که در روابط ۴ تا ۶ نشان داده شده‌اند:

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\} \quad (4)$$

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\} \quad (5)$$

$$f : G \rightarrow F(C),$$

جدول ۳: مقادیر وابسته فاکتور در هر رده (طبقه‌بندی سه رده‌ای)

فاکتور		خوب	متوسط	ضعیف
g ₁ : UCS (MPa)	M	۳۰/۵۰	۷۰	۱۱۰
	c	۳۵/۵۴	۱۲/۰۵	۳۶/۱۴
g ₂ : SF _a (N/mm)	M	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۵۸
	c	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۵۱
g ₃ : YM (GPa)	M	۱۵/۵۰	۴۰	۷۰
	c	۱۷/۴۷	۱۲/۰۵	۲۴/۱۰
g ₄ : MH (n)	M	۱/۷۵	۲/۷۵	۳/۵۰
	c	۰/۹۰	۰/۳۰	۰/۶۰

۴- طبقه‌بندی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه با سیستم طبقه‌بندی چندفاکتوره

در این پژوهش، هفت نمونه سنگ نرم (شامل چهار نمونه سنگ مرمریت و سه نمونه سنگ تراورتن) برای ارزیابی قابلیت برش با سیستم طبقه‌بندی جدید مورد مطالعه قرار گرفت. جدول ۴ به ترتیب اطلاعات مربوط به معادن و مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های مورد مطالعه مراحل زیر انجام شد. به عنوان مثال، برای نمونه سنگ A₁، مقادیر یاد شده به صورت رابطه ۱۷ محاسبه شد:

$$A_1 = [UCS, SF_a, YH, MH] \quad (17)$$

$$A_1 = [71.5, 0.14, 32.5, 3.5]$$

طبق جدول ۵ و با توجه به توابع عضویت، مقادیر $U(x)$ در سه رده «خوب»، «متوسط» و «ضعیف» به دست می‌آید. در گام بعدی، با استفاده از عملگر دوبوا و پرید، مقدار $1-w$ به صورت رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$1-w = [UCS, SF_a, YM, MH] \quad (18)$$

$$1-w = [0.63, 0.64, 0.9, 0.83]$$

با توجه به رابطه ۲، بیشینه بین مقادیر $U(x)$ و $1-w$ برای هر رده محاسبه شده و سپس کمینه آن‌ها در نظر گرفته می‌شود (جدول ۶). بیشینه مقدار در آخرین ردیف، رده مربوط به قابلیت برش سنگ را تعیین می‌کند. بدین ترتیب، با استفاده از این روش طبقه‌بندی فازی، اولین سنگ مورد مطالعه در رده «متوسط» قرار می‌گیرد:

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

در صورتی که:

$$b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij}), j = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

۶-۲-۳- ایجاد دستورالعمل‌های وابسته و روابط ماتریس فازی

دقت تعیین فازی اصولاً با تابع وابسته هر فاکتور تاثیر می‌پذیرد. بر اساس مشخصات هر توده سنگ، تابع توزیع استاندارد مطرح می‌شود که تابع وابسته آن به صورت رابطه ۱۳ است [۲۴]:

$$\mu_A(x) = e^{-\left(\frac{x-m}{c}\right)^2}, c > 0 \quad (13)$$

در رابطه ۱۳ در صورتی که مقادیر x و $\mu_A(x)$ به ترتیب برابر با ۵ و ۱ باشند، آنگاه مقادیر وابسته، بیشینه می‌شوند. مقدار m از مقادیر میانگین بیشینه و کمینه به دست می‌آید. اگر مقدار بیشینه یا کمینه بین دو رده قرار گیرد، مقدار وابستگی تقریباً برابر با ۰/۵ است (رابطه ۱۴):

$$e^{-\left(\frac{x_{\min} - m_{\max}}{2c}\right)^2} \approx 0.5 \quad (14)$$

در نتیجه، مقدار c با رابطه ۱۵ حل می‌شود:

$$c = \left| \frac{x_{\min} - x_{\max}}{1.66} \right| \quad (15)$$

در رابطه‌های ۱۴ و ۱۵، x_{\max} و x_{\min} به صورت مقدار کمینه و بیشینه هر رده مربوطه هر فاکتور نمایش داده شده است [۲۴]. مقادیر m و c در جدول ۳ ارائه شده است.

با استفاده از رابطه ۱۳ و تعیین مقدار m و c تابع وابسته هر رده از فاکتور به دست می‌آید. بنابراین تابع وابسته تمامی فاکتورها، رابطه فازی (رابطه ۱۶) است:

$$R = (r_{ij})_{4 \times 5} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{41} & r_{42} & \dots & r_{45} \end{bmatrix} \quad (16)$$

جدول ۴: نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی

پارامترها نمونه سنگ		BTS (MPa)	EQC (%)	GS (mm)	SF _a (N/mm)	UCS (MPa)	YM (GPa)	MH (n)
مرمریت هرسین	A ₁	۶/۸	۳/۶	۰/۵۵	۰/۱۴	۷۱/۵۰	۳۲/۵۰	۳/۵۰
مرمریت انارک	A ₂	۷/۱	۳/۴	۰/۴۵	۰/۱۱	۷۴/۵۰	۳۳/۶۰	۳/۲۰
تراورتن آدرشهر	A ₃	۴/۳	۲/۸	۱/۰۱	۰/۱۲	۵۳	۲۰/۷۰	۲/۹۰
تراورتن حاجی آباد	A ₄	۵/۶	۲/۶	۰/۸۵	۰/۱۲	۶۱/۵۰	۲۱	۲/۹۰
تراورتن دره بخاری	A ₅	۵/۴	۲/۷	۰/۸۷	۰/۱۳	۶۳	۲۳/۵۰	۲/۹۵
مرمریت صلصالی	A ₆	۶/۳	۳/۲	۰/۵۲	۰/۱۱	۶۸	۳۱/۶۰	۳/۱۰
مرمریت هفتومان	A ₇	۷/۲	۴	۰/۶	۰/۱۷	۷۴/۵۰	۳۵/۵۰	۳/۶۰

جدول ۷: مقادیر کمینه مربوط به هر رده با استفاده از عملگر بیگر (نمونه سنگ A₁)

A ₁	خوب	متوسط	ضعیف
UCS	۰/۷۳	۱	۰/۸۱
SF _a	۰/۵۶	۱	۰/۹۲
YM	۰/۹۹	۱	۰/۸۱
MH	۰	۰/۸۹	۱
B	Min = ۰	Min = ۰/۸۹	Min = ۰/۸۱

جدول ۵: مقادیر توابع عضویت U(x) (نمونه سنگ A₁)

A ₁	خوب	متوسط	ضعیف
UCS = ۷۱/۵۰	۰/۴۲۵	۱	۰/۵۷۵
SF _a = ۰/۱۴	۰/۲	۱	۰/۸
YM = ۳۲/۵۰	۰/۸۷۵	۱	۰/۱۲۵
MH = ۳/۵۰	۰	۰/۵	۱

جدول ۶: مقادیر کمینه مربوط به هر رده با استفاده از عملگر دوبوا و پرید (نمونه سنگ A₁)

A ₁	خوب	متوسط	ضعیف
UCS	۰/۶۳	۱	۰/۶۳
SF _a	۰/۶۴	۱	۰/۸
YM	۰/۹	۱	۰/۹
MH	۰/۸۳	۰/۸۳	۱
B	Min = ۰/۶۳	Min = ۰/۸۳	Min = ۰/۶۳

استفاده از سیستم فازی چند فاکتوره انجام شده است.

۴-۱- طبقه‌بندی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه با سیستم طبقه‌بندی وی و همکاران

نتایج حاصل از طبقه‌بندی سیستم طبقه‌بندی توسعه داده‌شده وی و همکاران در جدول‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

۴-۲- اعتبارسنجی سیستم‌های طبقه‌بندی فازی مورد مطالعه

برای بررسی و اعتبارسنجی سیستم طبقه‌بندی فازی ارائه‌شده، مطالعات میدانی در کارخانه فرآوری سنگ‌های ساختمانی انجام شد. بدین منظور، بلوک‌های استخراج شده از معدن برای هر یک از نمونه سنگ‌های مورد مطالعه به وسیله یک دستگاه برش‌دهنده اره‌ای با تیغه‌های الماسی در شرایط عملیاتی ثابت مورد برش قرار گرفتند. دستگاه اره مورد استفاده در این پژوهش، دستگاه اره ۵۰ تیغه‌ای ساخت شرکت برسنی ماشین^۲ کشور ایتالیا (سال ۲۰۱۳) است که جزو ساده‌ترین نوع اره به شمار می‌رود. دستگاه متشکل از شاسی اصلی اره، پایه‌ها، تیغه‌ها، لوله‌های آبرسانی، فلاپویل، تسمه، دینام اصلی، دو

$$B = [۰/۶۳, ۰/۸۳, ۰/۳۶] = [\text{خوب}, \text{متوسط}, \text{ضعیف}]$$

با استفاده از عملگر بیگر و مطابق با رابطه ۳، در هر رده، مقادیر $U(x)$ را به توان وزن مربوطه هر معیار (W_i) رسانده و سپس کمینه آن‌ها در نظر گرفته می‌شود (جدول ۷). رده مربوط به قابلیت برش برای هر نمونه سنگ از محاسبه بیشینه مقدار در آخرین ردیف به دست می‌آید. بدین ترتیب، اولین سنگ مورد مطالعه در رده «متوسط» قرار می‌گیرد:

$$B = [۰, ۰/۸۹, ۰/۸۱] = [\text{خوب}, \text{متوسط}, \text{ضعیف}]$$

در جدول‌های ۸ و ۹ ارزیابی و طبقه‌بندی نمونه سنگ‌ها با

جدول ۸: ارزیابی قابلیت برش سنگ در فرآیند برش با استفاده از سیستم فازی چندفاکتوره

نمونه سنگ	A ₁			A ₂			A ₃			A ₄		
	خوب	متوسط	ضعیف	خوب	متوسط	ضعیف	خوب	متوسط	ضعیف	خوب	متوسط	ضعیف
رده‌بندی UCS	۰٫۴۲۵	۱	۰٫۵۷۵	۰٫۲۷۵	۱	۰٫۷۲۵	۱	۰٫۸۸	۰	۰٫۹۲۵	۱	۰٫۰۷۵
SFa	۰٫۲	۱	۰٫۸	۰٫۸	۱	۰٫۲	۰٫۶	۱	۰٫۴	۰٫۶	۱	۰٫۴
YM	۰٫۸۷۵	۱	۰٫۱۲۵	۰٫۸۲	۱	۰٫۱۸	۱	۰٫۶۸	۰	۱	۰٫۶۹	۰
MH	۰	۰٫۵	۱	۰	۰٫۸	۱	۰٫۲	۱	۰٫۸	۰٫۲	۱	۰٫۸
B (Dubois)	۰٫۶۳	۰٫۸۳	۰٫۶۳	۰٫۶۳	۰٫۸۳	۰٫۶۴	۰٫۶۴	۰٫۸۸	۰٫۶۳	۰٫۶۴	۰٫۹	۰٫۶۳
(Yager) B	۰	۰٫۸۹	۰٫۸۱	۰	۰٫۹۶	۰٫۵۶	۰٫۷۶	۰٫۹۵	۰	۰٫۷۶	۰٫۹۶	۰
نمونه سنگ	A ₅			A ₆			A ₇			وزن پارامترها		
رده‌بندی	خوب	متوسط	ضعیف	خوب	متوسط	ضعیف	خوب	متوسط	ضعیف			
UCS	۰٫۸۵	۱	۰٫۱۵	۰٫۶	۱	۰٫۴	۰٫۲۷۵	۱	۰٫۷۲۵	۰٫۳۷		
SFa	۰٫۴	۱	۰٫۶	۰٫۸	۱	۰٫۲	۰	۰٫۹۸	۱	۰٫۳۶		
YM	۱	۰٫۷۷۵	۰	۰٫۹۲	۱	۰٫۰۸	۰٫۷۲۵	۱	۰٫۲۷۵	۰٫۱		
MH	۰٫۱	۱	۰٫۹	۰	۰٫۹	۱	۰	۰٫۴	۱	۰٫۱۷		
B (Dubois)	۰٫۶۴	۰٫۹	۰٫۶۳	۰٫۶۳	۰٫۹	۰٫۶۳	۰٫۶۳	۰٫۸۳	۰٫۷۲۵	-		
(Yager) B	۰٫۶۸	۰٫۹۷	۰	۰	۰٫۹۸	۰٫۵۶	۰	۰٫۸۶	۰٫۸۸	-		

شدت جریان مصرفی دستگاه برش اندازه‌گیری شد. شکل ۶ نمایی از دستگاه برش اره در طی فرآیند برش نشان می‌دهد. نتایج حاصل از بررسی‌های میدانی برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۳ مقایسه نتایج حاصل از سه طبقه‌بندی پیشنهادی برای ارزیابی قابلیت برش نمونه سنگ‌های ساختمانی در طی فرآیند برش با دستگاه اره و همچنین شدت جریان مصرفی دستگاه برش اره را نشان می‌دهد.

جدول ۹: طبقه‌بندی ارزیابی قابلیت برش سنگ با استفاده از سیستم فازی چند فاکتوره

نمونه سنگ	دوبوا و پرید	ییگر
A ₁	متوسط	متوسط
A ₂	متوسط	متوسط
A ₃	متوسط	متوسط
A ₄	متوسط	متوسط
A ₅	متوسط	متوسط
A ₆	متوسط	متوسط
A ₇	متوسط	ضعیف



شکل ۶: نمایی از دستگاه برش اره در طی فرآیند برش

بازو، دینام بالا و پایین برنده تیغه‌ها، دینام واریاتور است. تیغه‌های این دستگاه به طول ۴٫۳۵ متر است و حدود ۲۷ سگمنت روی این تیغه‌ها جوش داده شده است. فاصله سگمنت اول تیغه تا انبر نگه‌دارنده تیغه حدود ۶۰ سانتی‌متر از دو سر تیغه است. فاصله بین سگمنت‌های موجود روی تیغه حدود ۱۲ تا ۱۳ سانتی‌متر بین دو سگمنت است. فاصله بین هر تیغه تا تیغه بعد به وسیله واسطه‌هایی که قطرشان ۲۲ میلی‌متر است، تنظیم می‌شود و به وسیله انبرهایی جلو و عقب تیغه روی شاسی نصب شده و کاملاً محکم می‌شوند. در طول فرآیند برش، هر یک از نمونه سنگ‌های مورد مطالعه، میزان

جدول ۱۰: پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های مطالعه شده با استفاده از سیستم طبقه‌بندی ارایه شده

نمونه سنگ	A ₁			A ₂			A ₃					
	ضعیف	متوسط	خوب	ضعیف	متوسط	خوب	ضعیف	متوسط	خوب			
رده‌بندی												
UCS	۰٫۳۲	۰٫۹۸	۰٫۲۶	۰٫۳۸	۰٫۸۷	۰٫۲۲	۸٫۳۲E-۰۲	۱٫۳۷E-۰۱	۶٫۷۰E-۰۱			
SF _a	۰٫۴۸	۰٫۹۰	۰٫۱۱	۰٫۴۴	۰٫۷۸	۰٫۳۶	۴٫۵۴E-۰۱	۹٫۷۳E-۰۱	۲٫۳۸E-۰۱			
YM	۰٫۰۹	۰٫۶۸	۰٫۳۹	۰٫۱۰	۰٫۷۵	۰٫۳۴	۱٫۵۲E-۰۲	۷٫۶۸E-۰۲	۹٫۱۵E-۰۱			
MH	۱	۰	۰٫۰۲	۰٫۷۸	۰٫۱۱	۰٫۰۸	۳٫۷۱E-۰۱	۷٫۸۰E-۰۱	۱٫۹۸E-۰۱			
B	۰٫۳۶	۰٫۳۷	۰٫۲۶	۰٫۳۷	۰٫۳۷	۰٫۳۶	۰٫۳۶	۰٫۳۶	۰٫۳۷			
نمونه سنگ	A ₄			A ₅			A ₆			A ₇		
	ضعیف	متوسط	خوب	ضعیف	متوسط	خوب	ضعیف	متوسط	خوب	ضعیف	متوسط	خوب
رده‌بندی												
UCS	۰٫۱۷	۰٫۶۱	۰٫۴۷	۰٫۱۸	۰٫۷۱	۰٫۴۳	۰٫۲۶	۰٫۹۷	۰٫۳۳	۰٫۳۸	۰٫۸۷	۰٫۲۲
SF _a	۰٫۴۶	۱	۰٫۲۰	۰٫۴۷	۱	۰٫۱۷	۰٫۴۳	۰٫۶۴	۰٫۴۳	۰٫۵۴	۰٫۰۸	۰٫۰۱
YM	۰٫۰۲	۰٫۰۸	۰٫۹۱	۰٫۰۲	۰٫۱۵	۰٫۸۱	۰٫۰۸	۰٫۶۲	۰٫۴۳	۰٫۱۳	۰٫۸۷	۰٫۲۷
MH	۰٫۳۷	۰٫۷۸	۰٫۲۰	۰٫۴۳	۰٫۶۴	۰٫۱۷	۰٫۶۴	۰٫۲۶	۰٫۱۱	۰٫۹۷	۰	۰٫۰۲
B	۰٫۳۶	۰٫۳۷	۰٫۳۷	۰٫۳۶	۰٫۳۷	۰٫۳۷	۰٫۳۶	۰٫۳۷	۰٫۳۶	۰٫۳۷	۰٫۳۷	۰٫۲۲

بیشتر و کمتر از ۱۰۰ آمپر است. همین روند برای کمینه مقادیر شدت جریان مصرفی ثبت شده در طی فرآیند برش نمونه سنگ‌های مورد مطالعه قابل مشاهده است. به طوری که متوسط کمینه مقادیر شدت جریان برای نمونه سنگ‌های قرار گرفته در رده خوب، کمتر از ۹۰ آمپر و برای نمونه سنگ‌های قرار گرفته در رده متوسط، بیشتر از ۹۰ آمپر است. بدین ترتیب، نتایج این طبقه‌بندی را در مقایسه با سایر سیستم‌های طبقه‌بندی می‌توان نزدیک‌تر به نتایج حاصل از مطالعات میدانی (شدت جریان مصرفی دستگاه برش اره) دانست. با توجه به نتایج مطالعات میدانی، سیستم‌های طبقه‌بندی پنج رده‌ای و سه رده‌ای چند فاکتوره فازی به ترتیب بعد از سیستم طبقه‌بندی سه رده‌ای مناسب برای پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی‌اند.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به این که امروزه دستیابی به برنامه دقیق برای کارخانه‌های فرآوری سنگ امری مهم و ضروری است باید قابلیت برش سنگ‌ها و تعیین پارامترهای موثر بر آن به صورت کامل و جامع بررسی شود. در این پژوهش، پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی با استفاده از تیغه‌های برش‌دهنده سنگ با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی از قبیل مقاومت فشارشی تک‌محوره، شاخص ساینده‌گی شیمازک، مدول یانگ و سختی موس با کمک سیستم‌های طبقه‌بندی

جدول ۱۱: طبقه‌بندی ارزیابی قابلیت برش سنگ با استفاده از سیستم وی و همکاران

طبقه‌بندی وی و همکاران	نمونه سنگ
رده	
متوسط	A ₁
متوسط	A ₂
خوب	A ₃
خوب	A ₄
خوب	A ₅
متوسط	A ₆
متوسط	A ₇

از میان سه طبقه‌بندی پیشنهادی، طبقه‌بندی سه رده‌ای وی و همکاران به درستی نمونه‌های تراورتن و مرمریت را از هم تفکیک داده است. با توجه به نتایج حاصل از این طبقه‌بندی و همچنین نتایج شدت جریان‌های ثبت شده در طی فرآیند برش می‌توان استنباط کرد که از میان نمونه سنگ‌های نرم مورد مطالعه، سه نمونه سنگ تراورتن آذرشهر، حاجی‌آباد و دره‌بخاری از نظر قابلیت برش مناسب‌تر از نمونه سنگ‌های مرمریت صصلالی، انارک، هفتومان و هرسین‌اند. به طوری که مقادیر متوسط بیشینه و کمینه شدت جریان مصرفی دستگاه نیز تاییدی بر این ادعا است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، بیشینه مقدار شدت جریان مصرفی ثبت شده برای نمونه سنگ‌های قرار گرفته در دو رده متوسط و خوب به ترتیب

جدول ۱۲: نتایج مربوط به شدت جریان مصرفی دستگاه در طی برش نمونه سنگ‌های مورد مطالعه

V	A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		A ₅		A ₆		A ₇	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
۸	۹۳	۱۰۳	۸۵	۱۰۱	۷۹	۸۵	۸۳	۹۳	۸۶	۹۴	۹۲	۱۰۰	۹۰	۹۸
۱۱	۹۳	۱۰۴	۸۸	۱۰۲	۸۰	۸۶	۸۷	۹۵	۸۶	۹۴	۹۳	۱۰۲	۹۰	۱۰۱
۱۴	۹۴	۱۰۵	۸۹	۱۰۴	۸۰	۸۶	۸۹	۹۶	۸۶	۹۵	۹۳	۱۰۲	۹۲	۱۰۱
۱۷	۹۵	۱۰۶	۹۰	۱۰۶	۸۰	۸۶	۸۹	۹۷	۸۶	۹۵	۹۵	۱۰۴	۹۳	۱۰۲
۲۰	۹۶	۱۱۰	۹۰	۱۰۷	۸۱	۸۷	۸۹	۹۹	۸۷	۹۶	۹۵	۱۰۷	۹۳	۱۰۴
۲۳	۹۹	۱۱۲	۹۲	۱۰۹	۸۲	۸۸	۹۰	۱۰۰	۸۸	۹۶	۹۷	۱۰۷	۹۵	۱۰۴
۲۷	۱۰۰	۱۱۴	۹۲	۱۰۹	۸۲	۹۰	۹۰	۱۰۰	۸۸	۹۷	۹۹	۱۰۹	۹۷	۱۰۶
۳۰	۱۰۱	۱۱۵	۹۴	۱۱۰	۸۴	۹۰	۹۰	۱۰۰	۸۸	۹۷	۱۰۰	۱۱۲	۹۹	۱۰۹
۳۳	۱۰۲	۱۱۶	۹۵	۱۱۲	۸۵	۹۱	۹۰	۱۰۱	۸۸	۹۸	۱۰۱	۱۱۲	۱۰۱	۱۱۱
۳۷	۱۰۴	۱۱۸	۹۶	۱۱۵	۸۵	۹۲	۹۱	۱۰۲	۸۹	۹۹	۱۰۳	۱۱۴	۱۰۲	۱۱۳
میانگین	۹۷٫۷	۱۱۰٫۳	۹۱٫۱	۱۰۷٫۵	۸۱٫۸	۸۸٫۱	۸۸٫۸	۹۸٫۳	۸۷٫۲	۹۶٫۱	۹۶٫۸	۱۰۶٫۹	۹۵٫۲	۱۰۴٫۹

جدول ۱۳: مقایسه نتایج طبقه‌بندی سنگ‌های مورد مطالعه با متوسط شدت جریان مصرفی دستگاه برش اره

هانمونه	A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		A ₅		A ₆		A ₇	
وی و همکاران	متوسط		متوسط		خوب		خوب		خوب		متوسط		متوسط	
دوبا و پرید	متوسط		متوسط		متوسط		متوسط		متوسط		متوسط		متوسط	
بیگر	متوسط		متوسط		متوسط		متوسط		متوسط		متوسط		ضعیف	
متوسط شدت جریان مصرفی	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
	۹۷٫۷	۱۱۰٫۳	۹۱٫۱	۱۰۷٫۵	۸۱٫۸	۸۸٫۱	۸۸٫۸	۹۸٫۳	۸۷٫۲	۹۶٫۱	۹۶٫۸	۱۰۶٫۹	۹۵٫۲	۱۰۴٫۹

شرایط بهتری نسبت به نمونه سنگ‌های مرمریت صلصالی، انارک، هفتومان و هرسین دارند. به طوری که مقادیر بیشینه شدت جریان مصرفی ثبت شده برای نمونه سنگ‌های قرار گرفته در دو رده متوسط و خوب به ترتیب بیشتر و کمتر از ۱۰۰ آمپر است. همین روند برای کمینه مقادیر شدت جریان مصرفی ثبت شده در طی فرآیند برش نمونه سنگ‌های مورد مطالعه قابل (رده خوب، کمتر از ۹۰ آمپر و برای نمونه سنگ‌های قرار گرفته در رده متوسط، بیشتر از ۹۰ آمپر) قابل مشاهده است. با مقایسه نتایج سیستم‌های طبقه‌بندی ارایه شده می‌توان مشاهده کرد که طبقه‌بندی وی و همکاران، نتایج بهتری با توجه به شدت جریان مصرفی دستگاه برش اره دارد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از این سیستم طبقه‌بندی فازی و بر اساس چهار مشخصه مهم سنگ، می‌توان با قابلیت بالایی نمونه سنگ‌های نرم را در سه رده خوب، متوسط، ضعیف دسته‌بندی کرد.

فازی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های میدانی برای بررسی صحت و سقم نتایج بر روی هفت نمونه سنگ ساختمانی نرم در یک کارخانه برش سنگ انجام شد. در طی برش هر یک از سنگ‌های مورد مطالعه، میزان شدت جریان مصرفی دستگاه برش در شرایط ثابت عملیاتی اندازه‌گیری شد. مقایسه شدت جریان‌های ثبت شده و رده قابلیت برش برای هر نمونه سنگ نشان از دقت خوب سیستم طبقه‌بندی فازی وی و همکاران در پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های نرم دارد. به طوری که از میان سه طبقه‌بندی بررسی شده، طبقه‌بندی سه رده‌ای وی و همکاران به درستی نمونه‌های تراورتن و مرمریت را در دو رده خوب و متوسط از هم تفکیک داده است. با توجه به نتایج حاصل از این طبقه‌بندی و همچنین نتایج شدت جریان‌های ثبت شده در طی فرآیند برش، می‌توان استنباط کرد که از میان نمونه سنگ‌های نرم مورد مطالعه سه نمونه سنگ تراورتن آذرشهر، حاجی‌آباد و دره‌بخاری از نظر قابلیت برش،

۶- سپاس‌گزاری

از کارشناسان آزمایشگاه‌های دانشگاه صنعتی ارومیه و دانشگاه شاهرود به دلیل همکاری‌های بی‌دریغ‌شان قدردانی می‌شود.

۷- مراجع

- [12] Neves, P. F., e Silva, M. C., Paneiro, G., and Frazão, M. (2016). "Prediction of slab production with multiblade Gang Saw". International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & Mining Ecology Management, 2: 681-686.
- [13] Aryafar, A., and Mikaeil, R. (2016). "Estimation of the ampere consumption of dimension stone sawing machine using of artificial neural networks". International Journal of Mining and Geo-Engineering, 50(1): 121-130.
- [14] Almasi, S. N., Bagherpour, R., Mikaeil, R., and Ozcelik, Y. (2017). "Developing a new rock classification based on the abrasiveness, hardness, and toughness of rocks and PA for the prediction of hard dimension stone sawability in quarrying". Geosystem Engineering, 20(6): 295-310.
- [15] Tumac, D., and Shaterpour-Mamaghani, A. (2018). "Estimating the sawability of large diameter circular saws based on classification of natural stone types according to the geological origin". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 101: 18-32.
- [16] Dormishi, A., Ataei, M., Khalokakaei, R., and Mikaeil, R. (2018). "Energy consumption prediction of gang saws from rock properties in carbonate rocks cutting process". International Journal of Mining and Mineral Engineering, 9 (3): 216-227.
- [17] Dormishi A., Ataei M., Khaloo Kakaie R., Mikaeil R., and Shaffiee Haghshenas S. (2018). "Performance evaluation of gang saw using hybrid ANFIS-DE and hybrid ANFIS-PSO algorithms". Journal of Mining and Environment, 10(2): 543-557. DOI: 10.22044/jme.2018.6750.1496.
- [18] Shaffiee Haghshenas, S., Shirani Faradonbeh, R., Mikaeil, R., Shaffiee Haghshenas, S., Taheri, A., Saghatforoush, A., and Dormishi, A. (2019). "A new conventional criterion for the performance evaluation of gang saw machines". Measurement, 146: 159-170.
- [19] Hellmann, M. (2005). "Fuzzy logic introduction". Laboratoire Antennes Radar Telecom, F.R.E CNRS 2272, Equipe Radar Polarimetrie, University of de Rennes. France.
- [20] Zadeh, L. A. (2008). "Is there a need for fuzzy logic?". Information Sciences, 178(13): 2751-2779.
- [21] Tutmez, B., Kahraman, S., and Gunaydin, O. (2007). "Multifactorial fuzzy approach to the sawability classification of building stones". Construction and Building Materials, 21(8): 1672-1679.
- [22] Dubois, D., and Prade, H. (1986). "Weighted minimum and maximum operations in fuzzy set theory".
- [1] Wang, C.Y., and Rolf, C. (2003). "Frame sawing of stone-Theory and technology". In Key Engineering Materials, Trans Tech Publications, 250: 171-180.
- [2] Tönshoff, H. K., Hillmann-Apmann, H., and Asche, J. (2002). "Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications". Diamond and Related Materials, 11(3-6): 736-741.
- [3] Wang, C. Y., and Clausen, R. (2002). "Marble cutting with single point cutting tool and diamond segments". International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(9): 1045-1054.
- [4] Lons, H. H. (1970). "Basic research on frame sawing with diamond blades". PhD thesis, University of Tu Hanover.
- [5] Jansen, R. (1977). "Das Spannen von Diamantgatterblättern für die Steinbearbeitung". Industrie Diamanten Rundschau, 11(1): 33-36.
- [6] Gerlach, D. (1980). "Beanspruchung des Diamant-Werkzeugs beim Saeen von Agglomerat-Marmor". Bergakademie Freiberg, Building Materials Industry, 24(4): pp. 107.
- [7] Wiemann, H. J., Büttner, A., Ertingshausen, W. and Schwartz, W. (1982). "A new method for the rapid and accurate measurement of the tension of frame saw blade". Advances in Ultra Hard Materials Application Technology, 2: 127-138.
- [8] Wang, C. Y., and Clausen, R. (2003). "Computer simulation of stone frame sawing process using diamond blades". International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43(6): 559-572.
- [9] Bayram, F. (2013). "Prediction of sawing performance based on index properties of rocks". Arabian Journal of Geosciences, 6(11): 4357-4362.
- [10] Tumac, D. (2016). "Artificial neural network application to predict the sawability performance of large diameter circular saws". Measurement, 80: 12-20.
- [11] Mikaeil, R., Abdollahi Kamran, M., Sadegheslam, G., and Ataei, M. (2015). "Ranking sawability of dimension stone using PROMETHEE method". Journal of Mining and Environment, 6(2): 263-271.

Information Sciences, 39(2): 205-210.

[23] Yager, R. R. (1978). "Fuzzy decision making including unequal objectives". Fuzzy Sets and Systems, 1(2): 87-95.

[24] Wei, X., Wang, C. Y., and Zhou, Z. H. (2003). "Study on the fuzzy ranking of granite sawability". Journal of Materials Processing Technology, 139(1-3): 277-280.

¹ PROMETHEE

² Barsanti machine



DOI: 10.30479/jmre.2019.10547.1258

Predicting the Ampere Consumption of Stone Sawing Machine in Cutting Process Using Multi-Element Fuzzy Approach

Mikaeil R.^{1*}, Ataei M.², Sabzi V.³, Jafarpour A.⁴

1- Associate Professor, Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

Reza.mikaeil@uut.ac.ir

2- Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ataei@shahroodut.ac.ir

3- M.Sc, Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

sabzivahid1370@gmail.com

4- Ph. D Student, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

amir.jafarpour@stu.yazd.ac.ir

(Received: 27 Apr. 2019, Accepted: 25 Sep. 2019)

Abstract: Predicting the ampere consumption in carbonate rock sawing process is very important for the determination of the electrical energy cost per unit of production. In addition, ampere consumption prediction may be used for selecting the optimum operation parameters to obtain high production rate. In this study, it is aimed to develop fuzzy classification systems to evaluate and classify the carbonate rock based on physical and mechanical properties such as Brazilian tensile strength, equal quartz content, grain size, uniaxial compressive strength, Young modulus and Mohs hardness. Varieties of seven carbonate rocks such as Azarshahr travertine, Hajiabad travertine, Dare-bukhari travertine, Harsin marble, Salsali marble, Anarak marble and Haftooman marble were classified by developed fuzzy classification system. To validate the classification's results, ampere consumption was recorded during sawing process for each studied rocks. The results of the study show that the three-class fuzzy classification system is capable to evaluate the carbonate rock saw-ability and ampere consumption during soft dimensional stone sawing process.

Keywords: Carbonate rock saw-ability, Stone sawing machine, Fuzzy classification, Ampere consumption.

INTRODUCTION

The dimensional stones are one of the most important mineral reserves in the Iran. Due to the physical and mechanical properties of the rocks, predicting the saw-ability of the dimensional stones is significant for the cost estimation of post-extraction processes and plant design management. Full understanding and evaluation of the ability of cutting/sawing equipment drives production planners to improve processing speed and increase production rate. The need for high quality and competitive production in global markets requires the use of advanced technologies and modern tools in the stone extraction and processing units. Proper use of these equipment and accurate identification and evaluation of their performance can help

to increase the efficiency and quality of the processed stones. The sawing machines with high production capacity and competitive cutting quality are being used in processing plants extensively. The cutting operation of stones with sawing machines is one of the new methods used in stone process plants. The machines are mainly used in stone processing plants with high production capacity. In this method, the stone block is cut by a series of parallel saws made of diamond blades. These machines consume considerable energy. It is necessary to evaluate the amount of electricity power consumed in these devices.

METHODS

One of the fuzzy methods is the multi-factorial fuzzy method which can be used to solve various engineering problems. This method involves defining the problem inputs, performing fuzzy operations on the data, and outputting the problem, respectively (Figure 1).

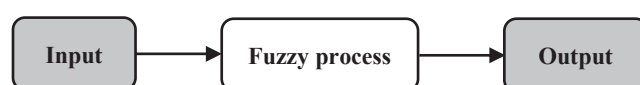


Figure 1. Steps of Multi-factorial fuzzy Method [1]

In this research, the fuzzy set theory and multi-factor fuzzy classification approach have been used in order to present a classification system for predicting ampere consumption of the soft dimensional stone sawing machine in cutting process. The degree of importance determination of the criteria for establishing a new classification system is the first step of data analysis. The importance of each criterion is determined by experts. Also, the questionnaires were sent to experts in the field of stone cutting. Then, by collecting questionnaires, the degree of importance of each criterion was calculated using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) and Saaty's method. The next step is to classify the criteria into three different quality categories (good, medium and poor). After determining the qualitative categories for each criterion, a membership function was defined for each criterion. Then, three-class membership functions were provided for all criteria. In other words, the results of laboratory investigations performed on rock samples are considered as problem inputs. Fuzzy operations include determining factors, weight vectors, membership functions, and decision functions (T-norms). Finally, the prediction of the shear ability of the studied rocks is predicted using the problem output classification system.

FINDINGS AND ARGUMENT

The results of the field surveys for the studied soft stone samples are presented in Table 1. Table 2 shows the comparison of the results of the three proposed classifications for evaluating the saw-ability of dimensional stones during the sawing process with the Barsanti sawing machine and the average ampere consumption of the machine.

Table 1. Classification of stone saw-ability evaluation using Wei et al. [2] method

Stone Sample No.	Class
A ₁	Medium
A ₂	Medium
A ₃	Good
A ₄	Good
A ₅	Good
A ₆	Medium
A ₇	Medium

Table 2. Comparison of the results of studied stones and the ampere consumption of the sawing machine

Samples	A1		A2		A3		A4		A5		A6		A7	
Wei et al. [2]	M		M		G		G		G		M		M	
Dubois and Prade [3]	M		M		M		M		M		M		M	
Yager [4]	M		M		M		M		M		M			
Average ampere consumption	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
	97.7	110.3	91.1	107.5	81.8	88.1	88.8	98.3	87.2	96.1	96.8	106.9	95.2	104.9
G: Good M: Medium P: Poor														

It is obvious that of the three proposed classification systems, the Wei et al. classification system correctly separates travertine and marble samples. Based on the results of this classification and the results of the intensities recorded during the cutting process, it can be deduced that from the studied soft stone samples, samples of Azarshahr, Haji-abad and Dare-Bukhari travertine were more suitable for saw-ability. Also, the saw-ability of Salsali marble, Anarak, Haftooman and Harsin stone samples is low. The average values of the maximum and minimum ampere consumption of the sawing machine also confirm this claim. As can be seen, the maximum value of recorded current ampere consumption for stone samples in the medium and good classes is greater and lesser than 100 amps, respectively. The same trend is observed for the minimum values of intake current recorded during the cutting process of the studied stone samples. Thus, the results of this classification can be compared with other classification systems as a result of field studies. According to the results of field studies, five-class and three-class fuzzy multi-factorial classification systems are suitable for predicting dimensional stone saw-ability after three-class classification system, respectively.

CONCLUSION

In this study, prediction of saw-ability of dimensional stones using rock shear blades was examined with fuzzy classification systems, according to physical and mechanical properties (such as: Uniaxial Compressive Strength, Schimazek's F-abrasiveness index, Young's modulus and Mohs hardness). The field investigations were carried out to evaluate the accuracy and precision of the results on seven soft rock samples in a stone processing plant. During cutting of each of the studied rocks, the amount of ampere consumption of sawing machine was measured under constant operating conditions. The comparison of the recorded ampere consumption and the saw-ability class for each stone sample shows good accuracy of the Wei et al. fuzzy classification system in predicting soft rock saw-abilities. Among the three classifications examined, Wei et al.'s three-class classification system correctly separated the travertine and marble samples into two good and medium classes. Finally, it can be concluded that by using this fuzzy classification system based on four important characteristics of the stone, it is possible to categorize soft rock samples into three categories: good, medium, and poor.

REFERENCES

- [1] Tutmez, B., Kahraman, S., and Gunaydin, O. (2007). "Multifactorial fuzzy approach to the sawability classification of building stones". *Construction and Building Materials*, 21(8): 1672-1679.
- [2] Wei, X., Wang, C. Y., and Zhou, Z. H. (2003). "Study on the fuzzy ranking of granite sawability". *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1-3): 277-280.
- [3] Dubois, D., and Prade, H. (1986). "Weighted minimum and maximum operations in fuzzy set theory". *Information Sciences*, 39(2): 205-210.
- [4] Yager, R. R. (1978). "Fuzzy decision making including unequal objectives". *Fuzzy Sets and Systems*, 1(2): 87-95.