پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی با استفاده از روش تحلیل سلسه مراتبی فازی

*رضا میکائیل: دانشکدهٔ مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
رضا یوسفی: دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
محمد عطایی: دانشکدهٔ مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ: دریافت ۹۰/۳/۲۲ **پذیرش**۹۰/۸/۱۵

چکیده

در این تحقیق سعی شده است تا با توجه به پارامترهای مهم و مؤثر در فرایند برش سنگ، یک سیستم طبقه‌بندی جامع برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌ها ارائه شود. در سیستم طبقه‌بندی جدید ٤ مشخصهٔ مهم از سنگ شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، سختی موهس، فاکتور ساینده‌گی شیمیازک و مدول الاستیسیته برای ارزیابی قابلیت برش سنگ انتخاب شدند که در مجموع به سنگ‌ها امتیازی از ۱۰ تا ۱۰۰ اختصاص داده و قابلیت برش سنگ‌ها را در دو گروه سخت و نرم به پنج کلاس خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی می‌کند. شاخص به‌دست آمده از سیستم طبقه‌بندی جدید می‌تواند به‌عنوان شاخصی مهم و کاربردی برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی استفاده شود. در مقالهٔ حاضر، ارتباط میان شدت جریان مصرفی و شاخص قابلیت برش و پارامترهای ماشین کاری با استفاده از برازش چند متغیره بررسی شد. بدین منظور دوازده نوع سنگ ساختمانی در آزمایشگاه با دستگاه برش تحت شرایط مختلف ماشین‌کاری (عمق‌های مختلف برش و نرخ‌های مختلف پیشروی) آزمایش شدند. نتایج حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی به‌عنوان ورودی نرم افزار آماری SPSS در نظر گرفته شدند و در نهایت مدل‌های پیش‌بینی شدت جریان مصرفی با توجه به پارامترهای ماشین‌کاری و شاخص قابلیت برش ارائه شدند. با استفاده از این مدل‌ها در کارخانجات فراوری می‌توان به دیدگاه نسبتاً خوبی از نظر نرخ مصرف انرژی برای برش سنگ‌های ساختمانی دست پیدا کرد.

واژه‌های کلیدی: سیستم طبقه‌بندی، قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی، شدت جریان مصرفی، مدل‌های آماری، نرم افزار SPSS.

*نویسنده مسئول

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

مقدمه

امروزه صفحه‌های برش‌دهندهٔ سنگ در کارخانه‌های تولید سنگ‌های ساختمانی به‌طور چشم‌گیری استفاده می‌شوند. شناخت کامل سنگ‌های ساختمانی و ارزیابی توانایی اجرایی دستگاه‌های برش در کارخانه‌های فرآوری، طراحان و برنامه‌ریزان تولید را به‌سمت بهبود سرعت فرآوری و افزایش تولید سوق می‌دهد. نیاز به تولید بیش‌تر، کیفیت عالی و رقابت مؤثر در بازارهای جهانی مستلزم استفاده از تکنولوژی و ابزارهای پیشرفته در بخش استخراج و فرآوری سنگ است. به‌کارگیری صحیح این وسایل از یک سو و شناخت و بررسی دقیق عمل‌کرد آن‌ها از سوی دیگر می‌تواند به نحو چشم‌گیری در بالا بردن بازدهی و کیفیت سنگ‌های فرآوری شده کمک کند. تاکنون پژوهش‌های نسبتاً خوبی در مقیاس‌های صنعتی و آزمایشگاهی در زمینه قابلیت برش سنگ‌ها صورت گرفته شده است [۱] تا [٤٥]. در این میان عده‌ای از محققان به بررسی پارامترهای سنگ و برخی هم به بررسی مشخصات طرح برش و برخی دیگر نیز به بررسی پارامترهای عملیاتی در زمینهٔ فرایند برش پرداختند.

در مقالهٔ حاضر سعی شد تا با استفاده از پژوهش‌های آماری به بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری و مشخصات سنگ بر میزان مصرف انرژی در فرایند برش پرداخته شود. نخست مکانیسم برش سنگ و پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ بررسی شد. سپس سیستم طبقه‌بندی جدیدی با توجه به مشخصات سنگ برای ارزیابی و پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های نرم و سخت ارائه می‌شود. در نهایت پس از انجام بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی ۱۲ نمونه سنگ ساختمانی، مدل‌های آماری برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی با توجه به مشخصات سنگ و پارامترهای ماشین‌کاری پیشنهاد می‌شود.

فرایند برش سنگ و پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ

فرآیند برش سنگ یک فرآیند سایشی است چنان که می‌توان برش سنگ به کمک قطعه‌های الماسی را سایش ذرات تشکیل دهندهٔ سنگ با عبور دانه‌های الماس روی سطح سنگ دانست. برای درک بهتر این فرآیند و شرایط حاکم بر دانهٔ الماس در حال برش، شناخت مکانیسم برش و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

پارامترهای مؤثر بر آن لازم و ضروری است. به‌طور کلی فرایند برش سنگ با استفاده از تجهیزات الماسی را می‌توان در طی دو مرحله به‌طور خلاصه بیان کرد:

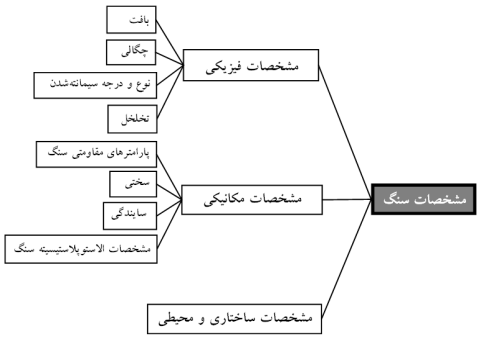
مرحلهٔ نخست از فرایند برش سنگ را می‌توان در نتیجهٔ حرکت قطعه‌های الماسی بر روی سطح برش و به‌دنبال آن تشکیل تراشهٔ سنگ در نتیجهٔ نفوذ دانه‌های الماس در داخل سنگ دانست. در طی این فرایند، دانهٔ الماس با خراشیدن و شکافتن سطح برش موجب تشکیل تراشه و ایجاد سطح جدید برای دانهٔ الماس بعدی می‌شود. هنگامی که سنگ با ابزار الماسی تحت برش قرار می‌گیرد تعامل مکانیکی میان ابزار و سنگ، نیروهای فرایند را ایجاد می‌کنند که عمدتاً ناشی از فاکتورهایی نظیر تغییر شکل الاستیکی و پلاستیکی در سنگ، اصطکاک میان دانهٔ الماس و ماتریس با سنگ و تراشه‌های حاصل از برش است.

به‌طورکلی پارامترهای مؤثر در فرآیند برش سنگ را می‌توان در سه بخش اصلی شامل الف) مشخصات قطعه‌کار یا همان سنگ ب) مشخصات برش شامل پارامترهای عملیاتی و مشخصات طرح برش و ج) مشخصات مدیریتی از قبیل مهارت اپراتور و شرایط محیطی کار تجزیه و تحلیل کرد. از میان این پارامترها، پارامترهای عملیاتی و مشخصات طرح برش به‌عنوان پارامترهای قابل کنترل (پارامترهای وابسته) و پارامترهای مربوط به مشخصات سنگ، به‌عنوان پارامترهای غیرقابل کنترل (پارامترهای مستقل) در فرآیند برش سنگ مطرح هستند. هر کدام از این دسته پارامترها به‌نحو خاصی در کارآیی و توان تولید فرآیند برش تأثیرگذار هستند که در این میان با فرض ثابت‌بودن شرایط برش (شرایط دستگاه و تجهیزات برش و مهارت اپراتور)، مشخصات سنگ از اهمیت زیادی در میزان نرخ تولید برخوردار است.

مشخصات سنگ یکی از پارامترهای مؤثر در فرآیند برش به‌خصوص در فرآیند تشکیل تراشه است. سنگ به‌عنوان میزبان عملیات برش، از نقش حیاتی در فرآیند برش و تولید برخوردار است. مشخصات سنگ تعیین کنندهٔ شرایط، کیفیت و کمیت اندرکنش میان سنگ و ماشین بوده لذا مکانیسم تشکیل براده و پیش‌روی ابزار را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به‌گستردگی مشخصات سنگ به‌منظور سهولت در تجزیه و تحلیل و بررسی این پارامترها، آن‌ها را می‌توان در سه گروه مشخصات فیزیکی، مکانیکی و مشخصات ساختاری تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]



شکل ۱. پارامترهای مؤثر از مشخصات سنگ در فرایند برش سنگ

ارائهٔ یک سیستم طبقه‌بندی جدید برای تعیین قابلیت برش سنگ

تاکنون پژوهش‌های متنوعی در زمینهٔ ارتباط میان پارامترهای مؤثر، شامل پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بر قابلیت برش سنگ انجام شده است که در بیش‌تر این بررسی‌ها اندرکنش بین پارامترهای سنگ و قابلیت برش با سیستم‌های طبقه‌بندی و معادلات آماری بررسی شدند. در این تحقیق با توجه به شناخت حاصل از فرایند برش از طریق مرور همهٔ منابع معتبر و نیز شناسایی بسیاری از پارامترهای مهم مؤثر، تلاش شده است تا یک سیستم طبقه‌بندی جامع برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌ها ارائه شود. با توجه به‌بررسی‌های به‌عمل آمده، در طی این تحقیق، همهٔ پارامترهای مهم مربوط به سنگ که در قابلیت برش سنگ مؤثرند به تعداد دوازده پارامتر بدین شرح تشخیص داده شدند: ۱) بافت سنگ، ۲) اندازه و شکل دانه‌های سنگ، ۳) میزان کوارتز محتوی، ٤) نوع ماتریکس و کیفیت سیمانته شدن، ۵) سختی، ٦) ساییدگی، ۷) هوازدگی، ۸) چگالی، ۹) سختی چکش اشمیت، ۱۰) مقاومت فشاری تک‌محوری، ۱۱) مقاومت کششی، ۱۲) مدول الاستیسیته.

مهم‌ترین مرحله در ارائهٔ یک سیستم طبقه‌بندی جامع، انتخاب پارامترها و تعیین وزن آن‌ها است. با توجه به طبیعت ذاتی سنگ و تأثیرپذیری هر یک از پارامترها از یک‌دیگر، ارزیابی نهایی برای رسیدن به وزنی معین برای هر پارامتر کمی سخت است. یکی از روش‌های مناسب برای وزن‌دهی به پارامترهای مؤثر در پدیده‌ای در مهندسی سنگ، روش تحلیل سلسله مراتبی فازی است. در این روش، از نظرات و تجربیات متخصصان برای دست‌یابی به وزنی مشخص استفاده می‌شود. بدین‌ترتیب دایره تجربیات افراد پشتوانهٔ روش خواهد بود. در این مقاله مراحل مختلف تشکیل سیستم طبقه‌بندی جدید با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی آورده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

۱. تعیین وزن پارامترها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است. اگرچه این روش در زمینه‌های مختلف استفاده شده است ولی هنوز این روش قادر نیست به‌خوبی تفکر بشر را بازتاب کند [٤٦]. این روش، برای بیان دقیق نظر تصمیم‌گیرنده‌ها در گزینه‌های مقایسه‌ای دارای نقص است [٤٧]. همچنین از این روش به‌علت مقیاس نامتوازن در قضاوت‌ها و عدم‌قطعیت و نادقیق بودن مقایسه‌های زوجی انتقاد شد. تصمیم‌گیرندگان اغلب در قضاوت‌هایشان ارائهٔ یک بازه را نسبت به‌یک عدد ثابت ترجیح می‌دهند زیرا آن‌ها به‌علت طبیعت فازی مقایسه‌های زوجی قادر نیستند به صراحت نظرشان را در مورد برتری‌ها اعلام کنند [٤٨]. روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) می‌تواند راه حل خوبی برای غلبه و رفع همهٔ این نقایص و مشکلات باشد [٤٩]. در حال حاضر این روش به‌عنوان روشی شناخته شده و مؤثر در دنیا مطرح شده است و تاکنون کاربردهای گسترده‌ای از این روش در مجلات معتبر علمی به‌چاپ رسیده است [٥٠] تا [٥٣]. در این تحقیق نیز از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی ارائه شده به‌وسیلهٔ چنگ (Chang)، برای تعیین وزن پارامترهای مؤثر در سیستم طبقه‌بندی استفاده شد. بر اساس روش تحلیل گسترش چنگ، اگر $X=\{x_1,x_2,x_3,...,x_n\}$ مجموعه اشیاء و $G=\{g_1,g_2,g_3,...,g_n\}$ مجموعه اهداف باشد، برای هر هدف انجام شده، هر شی گسترش پیدا می‌کند. بنا بر این m تحلیل گسترش یافته برای هر شی می‌تواند طبق این رابطه به‌دست بیاید [٥٤]:

$$M_{gi}^1, M_{gi}^2, ..., M_{gi}^m, \quad i=1,2,3,....,n \tag{۱}$$

مراحل مختلف محاسباتی این روش به‌ترتیب شامل این موارد است:

الف) تعیین ماتریس مقایسهٔ زوجی با تصمیم گیرنده‌ها.

ب) تشکیل ماتریس مقایسهٔ زوجی فازی

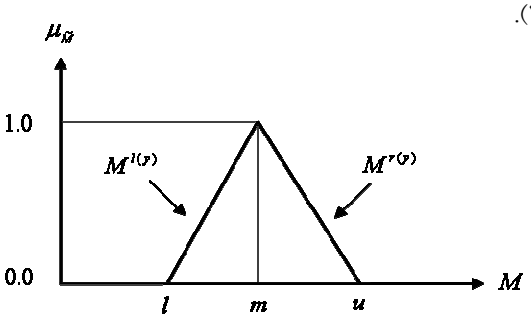
ماتریس مقایسه زوجی بدین ترتیب است:

$$(\tilde{A})=\begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{12} & 1 & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

اگر کمیتهٔ تصمیم‌گیرنده دارای چندین تصمیم گیرنده باشد، درایه‌های ماتریس مقایسهٔ زوجی جامع که در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به‌کار می‌رود، یک عدد فازی مثلثی است که مولفهٔ اول آن حداقل نظر سنجی‌ها، مولفهٔ دوم آن میانگین نظر سنجی‌ها و مولفهٔ سوم آن حداکثر نظر سنجی‌ها است (شکل ۲).



شکل ۲. اعدد فازی مثلثی

ج) محاسبهٔ S_i برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسهٔ زوجی. S_i که خود عددی فازی مثلثی است از این رابطه محاسبه می‌شود:

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} \otimes \left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} \right]^{-1} \qquad (۲)$$

در رابطهٔ بالا i بیان‌گر شمارهٔ سطر و j بیان‌گر شمارهٔ ستون است. M_{gi}^{j} در این رابطه اعداد فازی مثلثی ماتریس‌های مقایسهٔ زوجی هستند. برای به‌دست آوردن $\sum_{j=1}^{m} M_{gj}^{j}$، عمل جمع فازی $M_{gi}^{j}(j=1,2,...,m)$ بدین صورت است:

$$\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} = \left(\sum_{j=1}^{m} l_j, \sum_{j=1}^{m} m_j, \sum_{j=1}^{m} u_j \right) \qquad (۳)$$

و سپس مقدار معکوس رابطهٔ بالا بدین صورت به‌دست می‌آید:

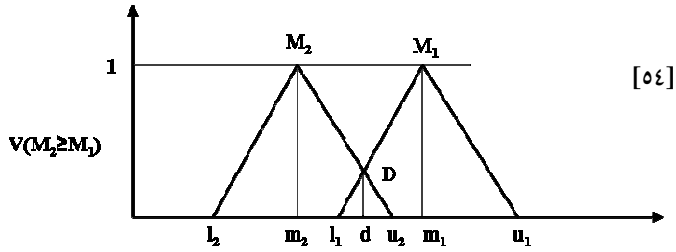
$$\left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} l_i} \right) \qquad (٤)$$

در روابط بالا l_1، m_1 و u_1 به‌ترتیب مولفه‌های اول تا سوم اعداد فازی هستند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

د) مقایسهٔ اعداد فـازی و تعیـین مقـادیر $V(M_2>M_1)$. بـه‌طـورکلی اگـر $M_1=(l_1,m_1,u_1)$ و $M_2=(l_2,m_2,u_2)$ دو عدد فازی مثلثی باشند، مطابق شکل ۳ درجهٔ بزرگی M_1 نسب به M_2 به‌صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل۳. تعامل بین M_1 و M_2 [٥٤]

$$V(M_2\geq M_1)=\begin{cases}1 & if\ m_2\geq m_1\\ 0 & if\ l_1\geq u_2\\ \dfrac{l_1-u_2}{(m_2-u_2)-(m_1-l_1)} & otherwise\end{cases} \qquad (٥)$$

از طرف دیگر میزان بزرگی عددی فازی مثلثی از عدد فازی مثلثی دیگر از این رابطه به‌دست می‌آید:

$$V(M\geq M_1,M_2...,M_k)=V[(M\geq M_1)and\,(M\geq M_2)and\,...and\,(M\geq M_k)]$$
$$=\min V(M\geq M_i)\qquad i=1,2,3,...,k \qquad (٦)$$

ه) محاسبهٔ وزن هر یک از پارامترها در ماتریس مقایسهٔ زوجی. وزن هـر یـک از پـارامترهـا از این رابطهٔ قابل محاسبه است.

$$d'(A_i)=\min V(S_i\geq S_k)\qquad k=1,2,\cdots,n\quad,\quad k\neq i \qquad (٧)$$

بنا بر این بردار وزن نرمالایزه نشده بدین صورت است:

$$W'=(d'(A_1),d'(A_2),...,d'(A_n))^T \qquad (٨)$$

و) محاسبهٔ بردار وزن نهایی. برای محاسبهٔ بردار وزن نهایی باید بـردار وزن محاسـبه شـده در مرحلهٔ قبل را نرمالیز کرد بنا بر این خواهیم داشت:

$$W=(d(A_1),d(A_2),...,d(A_n))^T \qquad (٩)$$

گام‌های محاسباتی برای تعیین وزن پارامترها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی عبارتند از:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

گام۱: تکمیل فرم نظرسنجی با تصمیم‌گیرنده‌ها

فرم‌های نظرسنجی مشتمل بر همهٔ پارامترهای مؤثر بر قابلیت برش، برای ٦ تن از متخصصان در داخل و خارج از کشور ارسال شد. این فرم‌های تکمیل شده برای ورود به‌روش تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده شدند. در فرم‌های فرستاده شده میزان اهمیت هر یک از پارامترها با توجه به امتیاز مقایسهٔ زوجی ساعتی بررسی شدند [۵۵]. به‌طوری‌که امتیاز گزینه‌ها با درجهٔ اهمیت بسیار بالا (۹)، با اهمیت (۷)، اهمیت متوسط (۵)، کم اهمیت (۳) و یا بدون اهمیت (۱) در نظر گرفته شدند. نمونه‌ای از ماتریس مقایسهٔ زوجی تهیه شده با یکی از تصمیم‌گیرنده‌ها، در زیر نشان داده شده است.

$$D_1 = \begin{array}{c} \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \\ c_8 \\ c_9 \\ c_{10} \\ c_{11} \\ c_{12} \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccccccc} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 & c_7 & c_8 & c_9 & c_{10} & c_{11} & c_{12} \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 1 & 1 & 1 & 5 & 5 & 3 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 3 & 3 & 1 & 1/5 & 1/3 & 1 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1 & 1 & 1/3 & 1/9 & 1/5 & 1/3 \\ 1 & 3 & 5 & 1 & 1 & 1 & 5 & 5 & 3 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1 & 3 & 5 & 1 & 1 & 1 & 5 & 5 & 3 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1 & 3 & 5 & 1 & 1 & 1 & 5 & 5 & 3 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1 & 1 & 1/3 & 1/9 & 1/5 & 1/3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1 & 1 & 1/3 & 1/9 & 1/5 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 3 & 3 & 1 & 1/5 & 1/3 & 1 \\ 3 & 7 & 9 & 3 & 3 & 3 & 9 & 9 & 5 & 1 & 3 & 5 \\ 1 & 3 & 5 & 1 & 1 & 1 & 5 & 5 & 3 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 3 & 3 & 1 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

گام۲: تشکیل ماتریس مقایسهٔ زوجی $(\tilde{A})$ با به‌کارگیری اعداد فازی. ماتریس مقایسهٔ زوجی نهایی فازی در جدول ۱ نشان داده شده است:

گام ۳: مقادیر S_i برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسهٔ زوجی فازی محاسبه و مقدار آن در زیر آورده شده است:

$$S_{C_1} = (8.51,12.8,17.9) \otimes (1/216,1/160,1/111) = (0.039,0.08,0.162)$$
$$S_{C_2} = (9.11,12.4,15.4) \otimes (1/216,1/160,1/111) = (0.042,0.077,0.148)$$
$$S_{C_3} = (7.01,10.4,15.4) \otimes (1/216,1/160,1/111) = (0.032,0.065,0.139)$$
$$S_{C_4} = (12.5,16.7,21.7) \otimes (1/216,1/160,1/111) = (0.058,0.104,0.196)$$
$$S_{C_5} = (12.9,17.7,23.7) \otimes (1/216,1/160,1/111) = (0.06,0.11,0.214)$$
$$S_{C_6} = (11.2,15.4,19.9) \otimes (1/216,1/160,1/111) = (0.052,0.096,0.18)$$
$$S_{C_7} = (5.87,8.79,13.4) \otimes (1/216,1/160,1/111) = (0.027,0.055,0.121)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

$$S_{C_8} = (6.44,8.87,12.2) \otimes (1/216,1/160,1/111) = (0.03,0.055,0.11)$$
$$S_{C_9} = (5.85,10.5,15.4) \otimes (1/216,1/160,1/111) = (0.027,0.066,0.14)$$
$$S_{C_{10}} = (12.5,18.8,23.7) \otimes (1/216,1/160,1/111) = (0.058,0.117,0.214)$$
$$S_{C_{11}} = (9.11,14.4,18.3) \otimes (1/216,1/160,1/111) = (0.042,0.09,0.166)$$
$$S_{C_{12}} = (9.52,13.3,18.3) \otimes (1/216,1/160,1/111) = (0.044,0.083,0.166)$$

گام٤: محاسبهٔ مقادیر $V(M_2>M_1)$. مقادیر محاسبه شده برای هر درایه در زیر آورده شده است:

$V(S_{c_1} \geq S_{c_2}) = 1,\ V(S_{c_1} \geq S_{c_3}) = 1,\ V(S_{c_1} \geq S_{c_4}) = 0.81,\ V(S_{c_1} \geq S_{c_5}) = 0.77,$
$V(S_{c_1} \geq S_{c_6}) = 0.869,\ V(S_{c_1} \geq S_{c_7}) = 1,\ V(S_{c_1} \geq S_{c_8}) = 1,\ V(S_{c_1} \geq S_{c_9}) = 1,$
$V(S_{c_1} \geq S_{c_{10}}) = 0.736,\ V(S_{c_1} \geq S_{c_{11}}) = 0.921,\ V(S_{c_1} \geq S_{c_{12}}) = 0.971;$
$V(S_{c_2} \geq S_{c_1}) = 0.978,\ V(S_{c_2} \geq S_{c_3}) = 1,\ V(S_{c_2} \geq S_{c_4}) = 0.768,$
$V(S_{c_2} \geq S_{c_5}) = 0.73,\ V(S_{c_2} \geq S_{c_6}) = 0.83,\ V(S_{c_2} \geq S_{c_7}) = 1,\ V(S_{c_2} \geq S_{c_8}) = 1,$
$V(S_{c_2} \geq S_{c_9}) = 1,\ V(S_{c_2} \geq S_{c_{10}}) = 0.693,\ V(S_{c_2} \geq S_{c_{11}}) = 0.89,$
$V(S_{c_2} \geq S_{c_{12}}) = 0.95;$
$V(S_{c_3} \geq S_{c_1}) = 0.87,\ V(S_{c_3} \geq S_{c_2}) = 0.89,\ V(S_{c_3} \geq S_{c_4}) = 0.672,$
$V(S_{c_3} \geq S_{c_5}) = 0.636,\ V(S_{c_3} \geq S_{c_6}) = 0.74,\ V(S_{c_3} \geq S_{c_7}) = 1,\ V(S_{c_3} \geq S_{c_8}) = 1,$
$V(S_{c_3} \geq S_{c_9}) = 1, V(S_{c_3} \geq S_{c_{10}}) = 0.608,\ V(S_{c_3} \geq S_{c_{11}}) = 0.79,$
$V(S_{c_3} \geq S_{c_{12}}) = 0.84;$
$V(S_{c_4} \geq S_{c_1}) = 1,\ V(S_{c_4} \geq S_{c_2}) = 1,\ V(S_{c_4} \geq S_{c_3}) = 1, V(S_{c_4} \geq S_{c_5}) = 0.96,$
$V(S_{c_4} \geq S_{c_6}) = 1,\ V(S_{c_4} \geq S_{c_7}) = 1,\ V(S_{c_4} \geq S_{c_8}) = 1,\ V(S_{c_4} \geq S_{c_9}) = 1,$
$V(S_{c_4} \geq S_{c_{10}}) = 0.92,\ V(S_{c_4} \geq S_{c_{11}}) = 1,\ V(S_{c_4} \geq S_{c_{12}}) = 1;$
$V(S_{c_5} \geq S_{c_1}) = 1,\ V(S_{c_5} \geq S_{c_2}) = 1,\ V(S_{c_5} \geq S_{c_3}) = 1,\ V(S_{c_5} \geq S_{c_4}) = 1,$
$V(S_{c_5} \geq S_{c_6}) = 1,\ V(S_{c_5} \geq S_{c_7}) = 1,\ V(S_{c_5} \geq S_{c_8}) = 1,\ V(S_{c_5} \geq S_{c_9}) = 1,$
$V(S_{c_5} \geq S_{c_{10}}) = 0.96,\ V(S_{c_5} \geq S_{c_{11}}) = 1,\ V(S_{c_5} \geq S_{c_{12}}) = 1;$
$V(S_{c_6} \geq S_{c_1}) = 1,\ V(S_{c_6} \geq S_{c_2}) = 1,\ V(S_{c_6} \geq S_{c_3}) = 1,\ V(S_{c_6} \geq S_{c_4}) = 0.94,$
$V(S_{c_6} \geq S_{c_5}) = 0.89,\ V(S_{c_6} \geq S_{c_7}) = 1,\ V(S_{c_6} \geq S_{c_8}) = 1,\ V(S_{c_6} \geq S_{c_9}) = 0.88,$
$V(S_{c_6} \geq S_{c_{10}}) = 0.86,\ V(S_{c_6} \geq S_{c_{11}}) = 1,\ V(S_{c_6} \geq S_{c_{12}}) = 1;$
$V(S_{c_7} \geq S_{c_1}) = 0.77,\ V(S_{c_7} \geq S_{c_2}) = 0.78,\ V(S_{c_7} \geq S_{c_3}) = 0.89,$
$V(S_{c_7} \geq S_{c_4}) = 0.56,\ V(S_{c_7} \geq S_{c_5}) = 0.53,\ V(S_{c_7} \geq S_{c_6}) = 0.63,$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

$V(S_{c_7} \geq S_{c_8}) = 1$, $V(S_{c_7} \geq S_{c_9}) = 0.9$, $V(S_{c_7} \geq S_{c_{10}}) = 0.51$,
$V(S_{c_7} \geq S_{c_{11}}) = 0.69$, $V(S_{c_7} \geq S_{c_{12}}) = 0.73$;
$V(S_{c_8} \geq S_{c_1}) = 0.75$, $V(S_{c_8} \geq S_{c_2}) = 0.76$, $V(S_{c_8} \geq S_{c_3}) = 0.9$,
$V(S_{c_8} \geq S_{c_4}) = 0.52$, $V(S_{c_8} \geq S_{c_5}) = 0.48$, $V(S_{c_8} \geq S_{c_6}) = 0.59$, $V(S_{c_8} \geq S_{c_7}) = 1$,
$V(S_{c_8} \geq S_{c_9}) = 0.89$, $V(S_{c_8} \geq S_{c_{10}}) = 0.46$, $V(S_{c_8} \geq S_{c_{11}}) = 0.66$,
$V(S_{c_8} \geq S_{c_{12}}) = 0.703$;
$V(S_{c_9} \geq S_{c_1}) = 0.87$, $V(S_{c_9} \geq S_{c_2}) = 0.89$, $V(S_{c_9} \geq S_{c_3}) = 1$, $V(S_{c_9} \geq S_{c_4}) = 0.68$,
$V(S_{c_9} \geq S_{c_5}) = 0.64$, $V(S_{c_9} \geq S_{c_6}) = 0.74$, $V(S_{c_9} \geq S_{c_7}) = 1$, $V(S_{c_9} \geq S_{c_8}) = 1$,
$V(S_{c_9} \geq S_{c_{10}}) = 0.612$, $V(S_{c_9} \geq S_{c_{11}}) = 0.79$, $V(S_{c_9} \geq S_{c_{12}}) = 0.84$;
$V(S_{c_{10}} \geq S_{c_1}) = 1$, $V(S_{c_{10}} \geq S_{c_2}) = 1$, $V(S_{c_{10}} \geq S_{c_3}) = 1$, $V(S_{c_{10}} \geq S_{c_4}) = 1$,
$V(S_{c_{10}} \geq S_{c_5}) = 1$, $V(S_{c_{10}} \geq S_{c_6}) = 1$, $V(S_{c_{10}} \geq S_{c_7}) = 1$, $V(S_{c_{10}} \geq S_{c_8}) = 1$,
$V(S_{c_{10}} \geq S_{c_9}) = 1$, $V(S_{c_{10}} \geq S_{c_{11}}) = 1$, $V(S_{c_{10}} \geq S_{c_{12}}) = 1$;
$V(S_{c_{11}} \geq S_{c_1}) = 1$, $V(S_{c_{11}} \geq S_{c_2}) = 1$, $V(S_{c_{11}} \geq S_{c_3}) = 1$, $V(S_{c_{11}} \geq S_{c_4}) = 0.88$,
$V(S_{c_{11}} \geq S_{c_5}) = 0.84$, $V(S_{c_{11}} \geq S_{c_6}) = 0.95$, $V(S_{c_{11}} \geq S_{c_7}) = 1$,
$V(S_{c_{11}} \geq S_{c_8}) = 1$, $V(S_{c_{11}} \geq S_{c_9}) = 1$, $V(S_{c_{11}} \geq S_{c_{10}}) = 0.799$, $V(S_{c_{11}} \geq S_{c_{12}}) = 1$;
$V(S_{c_{12}} \geq S_{c_1}) = 1$, $V(S_{c_{12}} \geq S_{c_2}) = 1$, $V(S_{c_{12}} \geq S_{c_3}) = 1$, $V(S_{c_{12}} \geq S_{c_4}) = 0.836$,
$V(S_{c_{12}} \geq S_{c_5}) = 0.797$, $V(S_{c_{12}} \geq S_{c_6}) = 0.9$, $V(S_{c_{12}} \geq S_{c_7}) = 1$, $V(S_{c_{12}} \geq S_{c_8}) = 1$,
$V(S_{c_{12}} \geq S_{c_9}) = 1$, $V(S_{c_{12}} \geq S_{c_{10}}) = 0.761$, $V(S_{c_{12}} \geq S_{c_{11}}) = 0.95$;

گام۵: محاسبهٔ وزن هر یک از پارامترها در ماتریس مقایسهٔ زوجی با استفاده از رابطهٔ ۷.

$d'(C_1) = \min(1,1,0.81,0.77,0.87,1,1,1,0.736,0.92,0.97) = 0.736$
$d'(C_2) = \min(0.98,1,0.78,0.73,0.83,1,1,1,0.693,0.89,0.95) = 0.693$
$d'(C_3) = \min(0.87,0.89,0.67,0.64,0.74,1,1,1,0.608,0.79,0.89) = 0.608$
$d'(C_4) = \min(1,1,1,0.96,1,1,1,1,0.92,1,1) = 0.92$
$d'(C_5) = \min(1,1,1,1,1,1,1,1,0.96,1,1) = 0.96$
$d'(C_6) = \min(1,1,1,0.94,0.89,1,1,0.88,0.86,1,1) = 0.86$
$d'(C_7) = \min(0.77,0.78,0.89,0.56,0.53,0.63,1,0.9,0.51,0.69,0.73) = 0.51$
$d'(C_8) = \min(0.75,0.76,0.9,0.52,0.48,0.59,1,0.89,0.46,0.66,0.7) = 0.46$
$d'(C_9) = \min(0.87,0.89,1,0.68,0.64,0.74,1,1,0.612,0.79,0.84) = 0.612$
$d'(C_{10}) = \min(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1) = 1$
$d'(C_{11}) = \min(1,1,1,0.88,0.84,0.95,1,1,1,0.799,1) = 0.799$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

$$d'(C_{12}) = \min(1,1,1,0.84,0.8,0.9,1,1,1,0.761,0.95) = 0.761$$

گام ٦: محاسبهٔ بردار وزن نهایی با استفاده از رابطهٔ ۹. بدین ترتیب وزن نهایی هر یک از پارامترها محاسبه و مقادیر آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. وزن اولیه و نهایی هر یک از پارامترها

پارامتر	وزن اولیه	وزن نهایی
بافت	۰/۷۳٦۲	۰/۰۸۲۷
اندازهٔ و شکل دانه‌ها	۰/٦۹۲۸	۰/۰۷۷۸
نوع ماتریس و سیمان سنگ	۰/٦۰۸۷	۰/۰٦۸٤
درصد کوارتز	۰/۹۱۵۷	۰/۱۰۲۸
سختی	۰/۹۵۸٦	۰/۱۰۷۷
ساینده‌گی	۰/۸۵۵	۰/۰۹٦
هوازدگی	۰/۵۰۵	۰/۰۵٦۷
چگالی	۰/٤۵۸۷	۰/۰۵۱۵
سختی چکش اشمیت	۰/٦۱۲٤	۰/۰٦۸۸
مقاومت فشاری تک‌محوری	۱	۰/۱۱۲۳
مقاومت کششی	۰/۷۹۹۳	۰/۰۸۹۸
مدول الاستیسیته	۰/۷٦۱۳	۰/۰۸۵۵

چنان‌چه از جدول بالا مشخص است مقاومت فشاری تک محوری دارای بیش‌ترین وزن و چگالی کم‌ترین وزن را در میان پارامترها به‌خود اختصاص دادند.

۲. انتخاب بهینه پارامترها برای سیستم طبقه‌بندی

در مهندسی سنگ، همواره انتخاب پارامترهای مهم و ترکیب آن‌ها در کنار هم یکی از مهم‌ترین اصول به‌شمار می‌رود. همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامترهای بررسی شده، می‌توانند همهٔ مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ را به‌خوبی پوشش دهند. از طرفی برخی از پارامترها مثل هوازدگی و نوع ماتریکس و سیمان سنگ دارای شاخص کمّی و آزمایشگاهی نیستند. همچنین تعدادی از پارامترهای اشاره شده، با یک‌دیگر همپوشانی دارند و برخی از پارامترها را در بر می‌گیرند. با توجه به مطالب مذکور، ٤ آزمایش شناخته شده شامل: مقاومت فشاری تک‌محوری، فاکتور سایش شیمیازک، سختی موهس و مدول الاستیسیته به‌عنوان مهم‌ترین مشخصهٔ سنگ در بررسی‌های آماری فرایند برش سنگ، در این تحقیق پیشنهاد و استفاده شدند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

الف) مقاومت فشاری تک‌محوری

این پارامتر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مهندسی سنگ در اکثر پژوهش‌های مهندسی استفاده شده است. این پارامتر می‌تواند نمایندهٔ بسیاری از مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ از قبیل مقاومت، بافت، چگالی، میزان هوازدگی و نیز کیفیت و نوع ماتریکس سنگ باشد. از طرفی این آزمایش، بسیار شناخته شده و قابل دسترس است که از این نظر می‌توان پارامترهای بدون کمیت مثل هوازدگی را با آن بررسی کرد. لذا با توجه به همهٔ تفاسیر، مجموع وزن پنج پارامتر (برابر با امتیاز ۰/۳۷) مذکور، به‌عنوان وزن نهایی پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری در سیستم طبقه‌بندی جدید در نظر گرفته شد.

ب) فاکتور سایش شیمیازک

ساینده‌گی یکی از مهم‌ترین پارامترهای سنگ از نظر قابلیت برش است. این پارامتر سرعت برش و استهلاک تجهیزات برش را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها پیشنهاد شده است. در این میان شاخص سایش شیمازک به‌دلیل در نظر گرفتن مقاومت کششی، اندازهٔ دانه‌ها و نیز میزان کوارتز محتوی نسبت به‌سایر روش‌ها برتری دارد و به‌علت در نظر گرفتن ترکیب میکروسکوپی سنگ از قابلیت زیادی در ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌ها برخوردار است. با توجه به مطالب ذکر شده، فاکتور سایش شیمازک به‌عنوان شاخص کمّی ارزیابی ساینده‌گی سنگ استفاده شده است. وزن این پارامتر نیز از مجموع وزن مقاومت کششی، ساینده‌گی و میزان کوارتز محتوی و اندازه دانه‌ها (برابر با امتیاز ۰/۳۶) محاسبه شد.

ج) سختی موهس

سختی یکی از مهم‌ترین پارامترهای هر کانی به‌شمار می‌رود که تأثیر بسیار زیادی بر سختی کل سنگ و در نهایت قابلیت برش آن دارد. از آن‌جا که سختی واقعی و علمی سنگ از بررسی مقطع نازک و ترکیب کانی‌شناسی آن حاصل می‌شود لذا در این تحقیق مقیاس سختی موهس برای ارزیابی سختی استفاده شده است. از عمده دلایل استفاده از سختی موهس را می‌توان به شهرت و آشنایی خوب کاربران و دقت بالای آن (به‌دلیل استفاده از مقطع نازک)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

بیان کرد. وزن نهایی اختصاص داده شده به این پارامتر نیز از مجموع وزن دو پارامتر سختی و سختی چکش اشمیت (برابر با امتیاز ۰/۱۷) به‌دست آمد.

د) مدول الاستیسیته

با توجه به رفتار سنگ‌ها در فرآیند شکست و تشکیل تراشه در فرایند برش، نحوهٔ رسیدن سنگ به مقاومت فشاری حداکثر، بر قابلیت برش سنگ تأثیرگذار است. الاستیسیته را می‌توان پارامتری مستقل دانست که رفتار خاصی در سنگ ایجاد می‌کند و گرچه از سایر مشخصات سنگ اثر می‌پذیرد با این حال به اثرگذاری، بیش‌تر از تأثیرپذیری آن توجه می‌شود. لذا در این تحقیق مدول الاستیسیته به‌عنوان معرف رفتار الاستیسیتهٔ سنگ استفاده شده است. وزن این پارامتر نیز به‌عنوان وزن نهایی در سیستم طبقه‌بندی (برابر با امتیاز ۰/۱) استفاده شد.

۳. امتیازدهی و تقسیم‌بندی پارامترها به کلاس‌های مختلف و ارائه سیستم طبقه‌بندی

در سیستم طبقه‌بندی جدید به منظور امتیازدهی به مقادیر مختلف هر پارامتر، بیش‌ترین امتیاز به بهترین وضعیت (خیلی خوب) داده شده است. برای امتیاز حالت‌های خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف به ترتیب ۷۰٪، ۵۰٪، ۲۵٪ و ۱۰٪ امتیاز ماکزیمم، اختصاص یافته است. بدین ترتیب سعی شد تا سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی غیرخطی شود. زیرا سیستمی غیرخطی بهتر می‌تواند به طبقه‌بندی تودهٔ سنگ‌های ضعیف بپردازد [۵۶]. با توجه به توضیحات ارائه شده، سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی و پیش‌بینی قابلیت برش هر دو گروه از سنگ‌های ساختمانی سخت (گرانیتی) و نرم (کربناته) پیشنهاد شد (جدول ۳). این سیستم طبقه‌بندی که اندیس قابلیت برش سنگ را مشخص می‌کند، در مجموع به سنگ‌ها امتیازی از ۱۰ تا ۱۰۰ اختصاص داده و قابلیت برش سنگ‌ها را در دو گروه سخت و نرم به پنج کلاس خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی می‌کند. شاخص به‌دست آمده از این سیستم طبقه‌بندی می‌تواند به‌عنوان شاخصی مهم و کاربردی برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی استفاده شود. از جمله کاربردهای مهم این شاخص، می‌توان به پیش‌بینی میزان شدت جریان مصرفی در فرایند برش اشاره کرد. در ادامه، ارتباط میان شدت جریان مصرفی و شاخص قابلیت برش و پارامترهای ماشین‌کاری با استفاده از برازش چند متغیره بررسی خواهد شد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

جدول ۳. سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌ها

	پارامترها		ردیف‌های ارزش				
۱	مقاومت فشاری تک‌محوری *(MPa)*	نرم	۲۵>	۲۵–۵۵	۵۵–۸۵	۸۵–۱۱۵	۱۱۵<
		سخت	۵۰>	۵۰–۹۰	۹۰–۱٤۰	۱٤۰–۲۰۰	۲۰۰<
			مقاومت خیلی کم	مقاومت کم	مقاومت متوسط	مقاومت زیاد	مقاومت خیلی زیاد
	امتیاز		۳۷	۲۵/۹	۱۸/۵	۹/۲۵	۳/۷
۲	فاکتور سایش شیمازک *(N/mm)*	نرم	۰/۰۵>	۰/۰۵–۰/۱	۰/۱–۰/۱۵	۰/۱۵–۰/۲	۰/۲<
		سخت	۲/۵>	۲/۵–۵	۵–۷/۵	۷/۵–۱۰	۱۰<
			ساینده‌گی خیلی کم	ساینده‌گی کم	ساینده‌گی متوسط	ساینده‌گی زیاد	ساینده‌گی خیلی زیاد
	امتیاز		۳٦	۲۵/۲	۱۸	۹	۳/٦
۳	سختی موهس *(n)*	نرم	۲>	۲–۲/۵	۲/۵–۳	۳–۳/۵	>۳/۵
		سخت	۳>	۳–٤/۵	٤/۵–٦	٦–۷	>۷
			خیلی نرم تا نرم	نسبتاً نرم	نسبتاً سخت	سخت	خیلی سخت
	امتیاز		۱۷	۱۱/۹	۸/۵	٤/۲۵	۱/۷
٤	مدول یانگ *(GPa)*	نرم	۱۰>	۱۰–۳۰	۳۰–۵۰	۵۰–۷۰	۷۰<
		سخت	۱۵>	۱۵–٤۰	٤۰–٦۵	٦۵–۹۰	۹۰<
			خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
	امتیاز		۱۰	۷	۵	۲/۵	۱

٤. پیش‌بینی شدت جریان مصرفی

به‌منظور ارائه مدل‌های آماری برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی، آزمایش‌های متنوعی بر روی ۱۲ نمونهٔ سنگ ساختمانی انجام شدند. در این بخش به بررسی شرایط آزمایش شامل مشخصات دستگاه برش، ابزار برش و قطعه کارهای آزمایش شده پرداخته می‌شود.

الف) آزمایش‌های برش

۱. مشخصات دستگاه برش

به‌منظور انجام آزمایش‌های برش، دستگاه برشی در مقیاس آزمایشگاهی تهیه شد (شکل ٤). قسمت‌های مختلف دستگاه به‌گونه‌ای طراحی شد که امکان تغییر پارامترهای ماشین‌کاری با تغییرات جزئی در ماشین میسر باشد. اجزای دستگاه آزمایش شامل بستر دستگاه (متشکل از دو ریل راهنما برای میز متحرک ماشین)، قسمت فوقانی شاسی (محل قرارگیری محور اصلی ماشین)، قسمت تحتانی شاسی (برای جمع‌آوری گل، آب و براده‌های حاصل از برش) است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]



شکل ٤. نمای کلی دستگاه آزمایش

میز متحرک دستگاه دارای سطحی تخت است که قطعات سنگ برای عملیات برش روی این صفحه ثابت می‌شوند. میز دستگاه با مکانیسم چرخ و زنجیر به موتوری هیدرولیکی روی ریل آن حرکت می‌کند. استفاده از سیستم هیدرولیک امکان کنترل و تنظیم سرعت حرکت میز که همان سرعت پیش‌روی است را فراهم می‌آورد. انتقال نیرو به محوراصلی با پولی و تسمه لاستیکی انجام می‌شود. صفحه برشی در بین دو واشر چدنی با مکانیسم پیچ و مهره نصب و محکم می‌شود. کل‌گلویی بر روی بستری فولادی که روی بستر اصلی یاتاقان‌بندی شده است ثابت می‌شود. یاتاقان‌بندی بستر گلویی به‌گونه‌ای است که امکان حرکتی چرخشی بسیار محدود تقریباً 8° را به آن می‌دهد. موتور اصلی اسپیندل با توان ۷/۵ کیلو وات در بالای بستر نصب می‌شود. پیش‌روی عمودی با مکانیسمی ترکیبی با یک موتور هیدرولیکی انجام می‌شود. این مکانیسم که پایه و اساس آن پیچ و مهره است قابلیت تنظیم عمق برش با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر را فراهم می‌آورد. برای راه‌اندازی موتورهای محرک میز (پیش‌روی افقی) و بستر گلویی (پیش‌روی عمودی) از یک واحد هیدرولیکی استفاده شده است. این سیستم امکان کنترل سرعت‌های پیش‌روی را فراهم می‌کند. مدار الکتریکی دستگاه به‌گونه‌ای است که کنترل حرکات پیش‌روی ماشین را در سه حالت دستی و نیمه‌خودکار و تمام خودکار امکان‌پذیر می‌کند. با شمارش‌گری الکترونیکی سرعت پیش‌روی سنجیده می‌شود. در هر مرحله از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

آزمایش‌ها قطعات سنگ به‌طول ۳۰ سانتی‌متر بر روی میز دستگاه برش ثابت، و سپس عمل برش صورت می‌گیرد. در طی انجام آزمایش، میزان شدت جریان مصرفی دستگاه با آمپرسنجی دقیق در شرایط مختلف ماشین‌کاری شامل نرخ‌های مختلف پیش‌روی (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ٤۰۰ سانتی‌متر بر دقیقه) و عمق‌های مختلف برش (۱±۱٦، ۱±۱،۲۳، ۳۰±۱ و ۱± ۳۵ میلی‌متر) ثبت و اندازه‌گیری شد. در تمامی آزمایش‌های برش در حالت موافق (جهت حرکت قطعه‌کار هم راستا با چرخش صفحه) و از آب به‌عنوان سیال خنک کننده استفاده شد.

۲. مشخصات ابزار برش

در آزمایش‌های برش از دو دیسک فلزی (سخت بر و نرم بر) به قطر ٤۱ cm و ضخامت ۲/۷ mm استفاده شده است. قطعه‌های الماس آن با ابعاد ۳×۱۰×٤۰ mm و ۲۸ عدد از آن‌ها در پیرامون بدنه فولادی لحیم شده‌اند. دانه‌های الماس مصنوعی به‌شکل کریستال‌های مکعب هشت وجهی با مش ٤۰/۵۰ برای صفحه سخت‌بر و مش ۳۰/٤۰ برای صفحه نرم‌بر و درصد وزنی ۲۵ تا ۳۰ و ۳۰ تا ٤۰ به‌ترتیب برای صفحه نرم‌بر و سخت‌بر در باند فلزی توزیع شدند. مشخصات صفحه‌های استفاده شده در آزمایش‌های برش در جدول ٤ آورده شده است.

جدول ٤. مشخصات صفحه‌های استفاده شده در آزمایش‌های برش

نوع صفحه	درصد وزنی الماس به‌کار رفته در باند	اندازهٔ مش کریستال‌های الماس
سخت بر	۳۰ درصد تا ٤۰ درصد	٤۰/۵۰
نرم بر	۲۵ درصد تا ۳۰ درصد	۳۰/٤۰

۳. مشخصات قطعه‌کار (سنگ)

نمونه سنگ‌های بررسی شده در این تحقیق شامل دو گروه از سنگ‌های ساختمانی متشکل از ۷ نوع سنگ ساختمانی نرم و ۵ نوع سنگ ساختمانی سخت بودند. برای انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی و تعیین پارامترهای مورد نظر، در مجموع از هر نمونه سنگ، بلوک‌های سنگی تهیه و سپس به آزمایشگاه منتقل شدند. همهٔ آزمایش‌ها تحت استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ و با دقت زیاد انجام گرفته شدند [۵۷]. برای بررسی و اطلاع دقیق از مشخصات کانی‌شناسی یک مقطع نازک از بخش تیپیک سنگ‌های پژوهش تهیه و بررسی شد. نمونه‌ای از مقطع نازک تهیه شده برای بررسی، در شکل ۵ نشان داده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

شده است. با استفاده از این مقطع نوع و درصد کانی‌های تشکیل دهنده، میزان کوارتز محتوی معادل هر سنگ برای تعیین مشخصات ساینگی و سختی محاسبه شدند. نتایج حاصل از پژوهش‌های آزمایشگاهی (مشخصات مکانیکی و فیزیکی نمونهٔ سنگ‌های بررسی شده در آزمایشگاه) به‌همراه شاخص قابلیت برش هر نمونه سنگ در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۵. شکل دیجیتالی از مقطع نازک متعلق به نمونهٔ سنگ تراورتن قرمز

جدول ۵. مشخصات مکانیکی و فیزیکی سنگ‌های بررسی شده

نام معدن	نوع و نام سنگ	EQC (%)	BTS MPa	GS (n)	MH (n)	YM (GPa)	UCS (MPa)	SF-a (N/mm)	RSi (n)
قلعهٔ خرگوشی	گرانیت قرمز	۵۷/۶۵	۸/۵۲	۲/۹	۶/۱	۴۳/۶	۱۴۲	۱۴/۲۴	۲۲/۱
چابان	گرانیت مشکی	۶۰/۰۶	۱۵	۰/۸۷	۶/۶	۴۸/۶	۱۷۳	۷/۶	۲۷/۵
نهبندان	گرانیت سفید	۶۴/۳	۹/۲	۴/۱	۵/۷۵	۳۵/۵	۱۴۵	۲۴/۲۵	۲۸/۳۵
خوش‌طینت	گرانیت شکلاتی خرمده	۳۲/۲	۸/۳	۳/۹	۵/۶۵	۲۸/۹	۱۳۳	۱۰/۴۲	۳۷/۶
گرانیت خاتم	گرانیت مروارید	۳۰/۳	۷/۴	۳/۸	۵/۶	۳۱/۲	۱۲۵	۸/۵	۴۳
ذوالفقار علی (ع)	مرمریت کرم هرسین	۳/۶	۶/۸	۰/۵۵	۳/۵	۳۲/۵	۷۱/۵	۰/۱۳۵	۴۵/۷۵
گل‌سنگ	مرمریت صورتی انارک	۳/۴	۷/۱	۰/۴۵	۳/۲	۳۳/۶	۷۴/۵	۰/۱۰۹	۴۵/۷۵
آذرشهر	تراورتن قرمز	۲/۸	۴/۳	۱/۰۱	۲/۹	۲۰/۷	۵۳	۰/۱۲۲	۵۹/۴
حاجی‌آباد	تراورتن حاجی آباد	۲/۶	۵/۶	۰/۸۵	۲/۹	۲۱	۶۱/۵	۰/۱۲۴	۵۲
درهٔ بخاری	تراورتن دره بخاری	۲/۷	۵/۴	۰/۸۷	۲/۹۵	۲۳/۵	۶۳	۰/۱۲۷	۵۲
صلصالی	مرمریت صلصالی	۳/۲	۶/۳	۰/۵۲	۳/۱	۳۱/۶	۷۳	۰/۱۰۵	۴۵/۷۵
هفتومان	مرمریت صورتی هفتومان	۴	۷/۲	۰/۶	۳/۶	۳۵/۵	۷۴/۵	۰/۱۷۳	۳۴/۲

RSi: شاخص قابلیت برش، EQC: کوارتز محتوی، BTS: مقاومت کششی، GS: اندازهٔ دانه‌ها، MH: سختی موهس، YM: مدول الاستیسیته، UCS: مقاومت فشاری تک محوری، SF-a: فاکتور ساینگی شیمیازک

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

ب) ارائه مدل‌های آماری برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی

در بررسی‌های انجام شده برای هر دو گروه از سنگ‌های بررسی شده، شدت جریان مصرفی به‌عنوان متغیر وابسته و سه پارامتر شاخص قابلیت برش، عمق برش و نرخ پیش‌روی قطعه کار به‌عنوان پارامترهای مستقل در نظر گرفته شدند. در طول آزمایش، مقادیر پارامترهای مستقل تغییر کرده و مقادیر شدت جریان مصرفی در هر مرحله اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. پس از انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی در مجموع بیش از ۱۸۰ نمونه آزمایش تحت شرایط مختلف ماشین‌کاری ثبت شد. پس از جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی، ارتباط میان شدت جریان مصرفی و شاخص قابلیت برش سنگ و پارامترهای ماشین‌کاری با کمک نرم‌افزار SPSS بررسی شد و در ادامه مدل‌های آماری جدیدی برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای هر دو گروه از سنگ‌های‌گرانیتی و کربناته بدین صورت ارائه شد:

مدل (۱)
$$I_G = \frac{D_c^{0.66} \times F_r^{0.494}}{10^{0.297} \times RS_i^{0.488}}$$

مدل (۲)
$$I_C = \frac{D_c^{0.541} \times F_r^{0.432}}{10^{0.077} \times RS_i^{0.402}}$$

در مدل‌های بالا I_C و I_G به‌ترتیب معرف شدت جریان مصرفی برای سنگ‌های کربناته و گرانیتی بر حسب آمپر، D_c عمق برش بر حسب میلی‌متر، F_r نرخ پیش‌روی بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه، RSi شاخص قابلیت برش هستند.

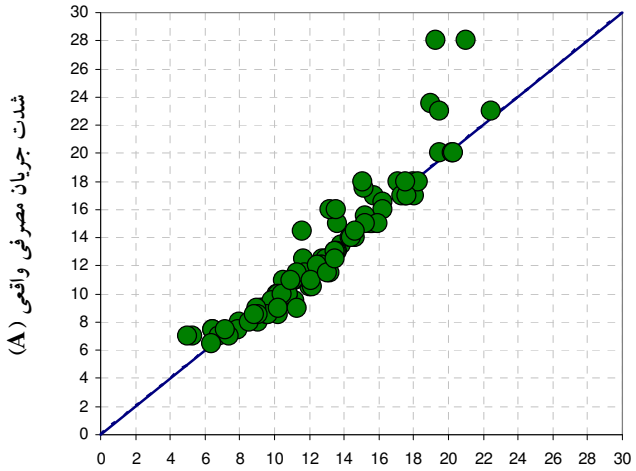
اعتبارسنجی مدل‌ها

در این بخش از تحقیق به‌منظور بررسی صحت و سقم هر یک از مدل‌ها (میزان اعتبار هر یک از مدل‌ها) از آزمون‌های آماری استفاده گردید. برای کنترل معنی‌داری مدل‌ها از آزمون F و برای کنترل معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل، از آزمون t استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از این بررسی‌ها در جدول ٦ نشان داده شده است. با توجه به این که مقدار F به‌دست آمده از جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۹ درصد بزرگ‌تر از مقدار مقدار F به‌دست آمده از مدل است لذا می‌توان فرضیه صفر را که بیان می‌کند رابطهٔ خطی بین متغیر وابسته (شدت جریان مصرفی) و متغیرهای مستقل (عمق برش، نرخ پیش‌روی و شاخص قابلیت برش سنگ)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

وجود ندارد، را رد کرد، و نتیجه‌گرفت که حداقل یکی از ضرایب رگرسیون صفر نیست. پس از کنترل معنی‌داری کلی مدل با آزمون F، معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل با آزمون t کنترل می‌شود. با استفاده از این آزمون می‌توان فرضیه صفر بودن هر یک از ضرایب متغییرهای مستقل را آزمایش کرد. از آن‌جا که مقدار t حاصل از جدول توزیع مربوطه با سطح اعتماد ۹۰ درصد بزرگ‌تر از مقدار tهای به‌دست آمده از متغیرهای مستقل است، لذا می‌توان فرضیه صفر بودن ضرایب متغیرهای مستقل را رد کرد.

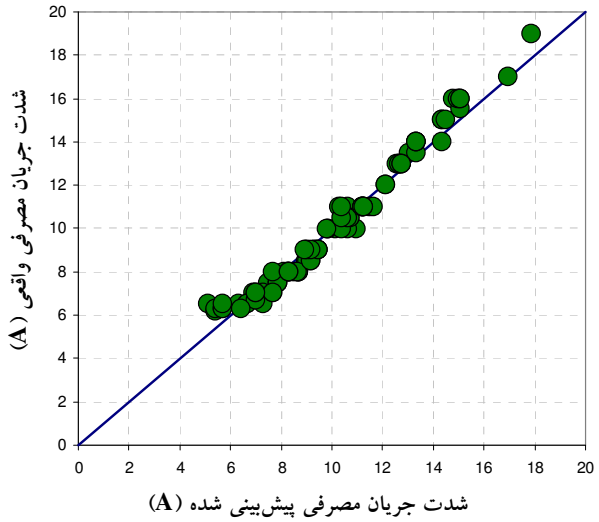
یکی دیگر از روش‌های ارزیابی مدل‌های آماری پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم ساز ۱:۱ است. شکل‌های ٦ و ۷ پراکندگی نقاط شدت جریان پیش‌بینی شده را نسبت به مقادیر واقعی آن، به ترتیب برای مدل‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهند. هرچه تراکم این نقاط نسبت به خط نیم‌ساز بیش‌تر باشند مدل از دقت بهتری برخوردار است. با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان چنین استنباط کرد که مدل‌ها از دقت خوبی در تخمین و پیش‌بینی مقدار جریان مصرفی برخوردارند.



شکل ٦. پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]



شکل ۷. پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۲

جدول ٦. نتایج حاصل از بررسی‌های آماری برای مدل‌های پیش‌بینی شدت جریان مصرفی

	مدل	ضرایب توانی	خطای معیار	F	F جدول	t	t جدول	R
مدل (۱)	عدد ثابت	-۰/۲۹۷	۰/۱۱	۲٦۱/۸	٤/٦۱	-۲/٦۷	۱/٦٥	۰/۹٥
	D_c	۰/٦٦	۰/۰٤			۱٦/۲۱		
	F_r	۰/٤۹٤	۰/۰۲۲			۲۲/٥		
	RSi	-۰/٤۸۸	۰/۰٤۸			-۱۰/۱		
مدل (۲)	عدد ثابت	-۰/۰۷۷	۰/۰۷٦	٦۹٦/٤۲	٤/٦۱	-۲/۰۱٦	۱/٦٥	۰/۹۸
	D_c	۰/٥٤۱	۰/۰۲			۲۷/۱٥٤		
	F_r	۰/٤۳۲	۰/۰۱۱			۳۷/۷۸٦		
	RSi	-۰/٤۰۲	۰/۰۳۸			-۱۰/٥۲۷		

بحث و نتیجه‌گیری

پیش‌بینی و تخمین قابلیت برش سنگ‌ها و تعیین پارامترهای مؤثر بر آن، امری مهم و ضروری برای دست‌یابی به طراحی و برنامه‌ریزی دقیق در کارخانه‌های فرآوری است. در این تحقیق همهٔ پارامترهای مهم و مؤثر در قابلیت برش‌پذیری سنگ‌ها بررسی و ارزیابی شدند. در این میان چگالی، بافت، نوع ماتریکس و درجهٔ سیمانته شدن، تخلخل، مقاومت فشاری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

تک‌محوری، مقاومت کششی، سختی، ساینده‌گی و الاستیسیته و پلاستیسیته سنگ‌ها به‌عنوان مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها در قابلیت برش سنگ در نظر گرفته شدند. ضریب اهمیت هر یک از پارامترها با توجه به نظرسنجی از خبرگان و استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی تعیین شد. در طی تحقیق از میان پارامترهای مؤثر چهار پارامتر سختی موهس، فاکتور ساینده‌گی شیمیازک، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته به‌ترتیب به نمایندگی از ٤ مشخصهٔ مهم سنگ شامل سختی، ساینده‌گی، خواص مقاومتی و الاستوپلاستیسیته سنگ انتخاب شدند. در ادامه سیستم طبقه‌بندی جدیدی، بر اساس پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ‌ها، ارائه شد. با توجه به وزن هر پارامتر سیستم طبقه‌بندی به‌صورت کمّی و بر مبنای چهار پارامتر مذکور پیشنهاد شد. پس از انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی بر روی ۱۲ نوع سنگ ساختمانی، بررسی‌های آماری بر روی داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفت. دو مدل آماری برای پیش‌بینی میزان شدت جریان مصرفی ارائه شدند که نتایج آزمون‌های آماری نشان از صحت و سقم آن‌ها داشتند. به‌طور خلاصه نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان بدین صورت بیان کرد:

- بررسی تأثیر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ بر روی قابلیت برش سنگ‌ها.
- انتخاب مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها از میان پارامترهای موجود با توجه به رعایت اصولی از قبیل عدم هم‌پوشانی پارامترها با یک‌دیگر، پوشش تمامی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها و همچنین سعی در به‌حداقل رساندن پارامترها و سهولت دسترسی و انجام آزمایش‌های مربوطه.
- تعیین ضریب اهمیت هر یک از پارامترها با توجه به‌نظر متخصین با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی.
- ارائه سیستم طبقه‌بندی جدیدی برای تعیین قابلیت برش سنگ‌ها.
- بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری در نتایج عمل‌کرد برش سنگ‌ها.
- ارائه مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی میزان مصرف انرژی با توجه به شاخص قابلیت برش و پارامترهای ماشین‌کاری.

با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید و مدل‌های ارائه شده می‌توان سنگ‌های ساختمانی را از نظر قابلیت برش طبقه‌بندی و میزان مصرف انرژی را با دقت خوبی با توجه به شرایط عملیاتی پیش‌بینی کرد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

منابع

1. Norling R. G. "Mechanical properties and the composition of some Swedish natural stone types and their effect on cutting results", In: Presentation at the Conference on Diamond in the Construction and Stone Industry (1971).
2. Buttner A. "Diamond tools and stone" Industrial Diamond Review. Vol. 34, (1974) 89-93.
3. Burgess, R.B. "Circular sawing granite with diamond saw blades", In: Proceedings of the Fifth Industrial Diamond Seminar (1978) 3-10.
4. Tonshoff, H.K, Warnecke, G. "Research on stone sawing", P. Daniel (Ed), Advance in Ultrahard Mareials Application Technology, Vol. 1, Harnbeam, England (1982) 36-49.
5. Vaya, Vikram, "Mineralogical parameters in granite sawing", technical paper, University of Jodhpur (1983) 7-79.
6. Wright, D.N, Cassapi V.B. "Factors influencing stone sawability", Industrial Diamond Review, 2 (1985) 84-87.
7. Ertingshausen, W., "Wear processes in sawing hard stone", Industrial Diamond Review, 5 (1985) 254-258.
8. Wright D. N., Walper, H. "Investigation and prediction of diamond wear when sawing", annals CIRP, 35 (1) (1986) 239-244.
9. Birle, J. D., Ratterman, E. "An approximate ranking of the sawability of hard building stones based on laboratory tests", Dimensional Stone Magazine (1986) 3-29.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

10. Jennings, M., Wright, D. N. "Guidelines for sawing stone", Industrial Diamond Review, 2 (1989) 70-75.

11. Hausberger, P., "Causes of the different behaviour of rocks when machined with diamond tools", Industrial Diamond Review, Vol. 3 (1989) 1-25.

12. Hausberger, P., "Stone Machinability", Industrial Diamond Review, Vol. 3 (1990) 125.

13. Konstanty, J., "The Materials Science of Stone Sawing", Industrial Diamond Review, 1 (1991) 27-31

14. Unver, B., "A statistical method for practical assessment of sawability of rocks", In: Barla M, editor. Eurock'96, Rotterdam: Balkema (1996) 59-65.

15. Clausen, R., Wang, C. Y., Meding M., "Characteristics of acoustic emission during single diamond scratching of granite", Industrial Diamond Review, 3 (1996) 96-9.

16. Bianchi, E. C., Silva, E. J., Silva C. E, Souza G. F., C. A. Fortulan, O. C. Fernandes, Valarelli I. D., Aguiar P. R., "The behaviour of resinbond diamond wheels in the grinding of advanced ceramics", Industrial Diamond Review, Vol. 4 (1998) 68-73.

17. Xu, X. "Friction studies on the process in circular sawing of granites", Tribology Letters 7 (1999) 221-227.

18. Xu, X., Li, Y., Malkin, S., "Forces and energy in circular sawing and grinding of granite", Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123 (2001) 13-22.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

19. Brook, B., "Principles of diamond tool technology for sawing rock", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 39 (2002) 41-58.

20. Tonshoff, H. K., Hillmann-Apmann, H., Asche, J., "Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications", Diamond and Related Materials 11 (2002) 736-741.

21. Konstanty, J., "Theoretical analysis of stone sawing with diamonds", Journal of materials processing technology, 123 (2002) 146-154.

22. Sun, L.a, Pan, J.b, Lin, C. "A new approach to improve the performance of diamond sawblades", Materials Letters, 57 (2002) 1010-1014.

23. Eyuboglu, A. S., Ozcelik, Y., Kulaksiz, S., Engin, I. C., "Statistical and microscopic investigation of disc segment wear related to sawing Ankara andesites", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 40 (2003) 405-414.

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

25. Xu, X., Li, Y., Yu, Y. "Force ratio in the circular sawing of granites with a diamond segmented blade", Journal of Materials Processing Technology, 139 (2003) 281-285.

26. Engels, A., "The role of Particles PerCarat in diamond tool behavior", Industrial Diamond Review 2 (2003) 39-45.

27. Ersoy, A., Atici, U., "Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks", Diamond and Related Materials

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

13 (2004) 22-37.

28. Gunaydin O., Kahraman S., Fener M., "Sawability prediction of carbonate rocks from brittleness indexes", The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 104 (2004) 239-244.
29. Buyuksagis, I. S., Goktan, R. M., "Investigation of marble machining performance using an instrumented block-cutter", Journal of Materials Processing Technology, 169 (2005) 258-262.
30. Delgado, N. S., Rodriguez, R., Rio, A., Sarria, I. D., Calleja L, Argandona V. G. R., "The influence of microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain)", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 42 (2005) 161-6.
31. Ersoy, A., Buyuksagis, S., Atici, U., "Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard and abrasive rocks", Wear 258 (2005) 1422-1436.
32. Ayhan M., "Cost model and sensitivity analysis of cutting and processing stage at a marble plant", Industrial Diamond Review, Vol.3 (2005) 49-54.
33. Kahraman, S., Altun, H., Tezekici, B. S., Fener M., "Sawability prediction of carbonate rocks from shear strength parameters using artificial neural networks", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 43, No. 1 (2005) 157-164.
34. Kahraman, S., Ulker, U., Delibalta, S., "A quality classification of building stones from P-wave velocity and its application to stone cutting with gang saws", The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 107 (2007) 427-430.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

35. Tutmez, B., Kahraman, S., Gunaydin O., "Multifactorial fuzzy approach to the sawability classification of building stones", Construction and Building Materials, 21 (2007) 1672-1679.

36. Özçelik, Y., "The effect of marble textural characteristics on the sawing efficiency of diamond segmented frame saws", Industrial Diamond Review, 2 (2007) 65-70.

37. Buyuksagis, I. S., "Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade", Journal of Materials Proces-sing Technology, 183 (2007) 399-406.

38. Kahraman, S., Fener, M., Gunaydin, O., "Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41 (2004) 1123-1131.

39. Polini, W., Turchetta, S., "Monitoring of diamond disk wear in stone cutting by means of force or acceleration sensors", Int. j. Adv Manuf Technol, 35 (2007) 454-467.

40. Fener, M., Kahraman, S., & Ozder M. O., "Performance Prediction of Circular Diamond Saws from Mechanical Rock Properties in Cutting Carbonate Rocks", Rock Mech, Rock Engng, Vol. 40, No. 5 (2007) 505-517

41. Mikaeil, R., Ataei, M., Hoseinie, S. H., "Predicting the production rate of diamond wire saws in carbonate rocks cutting", Industrial Diamond Review (IDR), Vol. 3 (2008) 28-34.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

42. Mikaeil, R., Hoseinie, S. H., Ataei, M., "Abrasivity and sawability prediction of Khalkhal and Azarshahr Travertine", 8th International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing and Environmental Protection (SGEM), Albena Complex, Bulgaria (2008).

43. Atici, U., Ersoy, A., "Correlation of specific energy of cutting saws and drilling bits with rock brittleness and destruction energy", journal of materials processing technology, 209 (2009) 2602-2612.

44. Yousefi, R., Mikaeil, R., Ataei, M., "Study of Factors Affecting on the Sawability of the Ornamental Stone", Proceedings of the 8th International Scientific Conference SGEM, Bulgaria (2010).

45. Mikaeil, R., Yousefi, R., Ataei, M., Abasian Farani, R., "Development of a New Classification System for Assessing of Carbonate Rock Sawability", Archives of Mining Sciences, Vol. 56, No. 1 (2011) 57-68.

46. Kahraman, C., Cebeci, U., Ruan, D., "Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey", International Journal of Production Economics, 87 (2004) 171-184.

47. Wang, T. C., Chen, Y. H., "Applying consistent fuzzy preference relations to partnership selection", Omega, the International Journal of Management Science, 35 (2007) 384-388.

48. Deng, H., "Multicriteria analysis with fuzzy pair-wise comparison", Interna-tional Journal of Approximate Reasoning, 21 (1999) 215-231.

49. Kahraman, C., Cebeci, U., Ulukan, Z., "Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP", Logistics Information Management, 16 (6) (2003) 382-394.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]

50. Mikaeil, R., Zare Naghadehi, M., Sereshki, F., "Multifactorial Fuzzy Approach to the Penetrability Classification of TBM in Hard Rock Conditions", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24, (2009) 500-505.

51. Mikaeil, R., Zare Naghadehi, M., Ataei, M., KhaloKakaie, R., "A Decision Support System Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) and TOPSIS Approaches for Selection of the Optimum Underground Mining Method", Archives of Mining Sciences, Vol. 54, No. 2 (2009) 341-368.

52. Zare Naghadehi, M., Mikaeil, R., Ataei, M., "The Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) Approach to Selection of Optimum Underground Mining Method for Jajarm Bauxite Mine, Iran", Expert Systems with Applications, 36 (2009) 8218-8226.

53. Ataei, M., "Multi-criteria selection for alumina-cement plant location in East-Azerbaijan province of Iran", The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 105(7) (2005) 507-514.

54. Chang, D. Y., "Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP", European Journal of Operational Research, 95 (1996) 649-655.

55. Saaty, T. L., "The analytic hierarchy process", New York: McGraw-Hill (1980).

56. Hoek, E., Brown, E. T., Practical estimation of rock mass strength, Int. J. Rock Mech Min Sci; 34 (8) (1994) 1165-86.

57. "International Society for Rock Mechanics, Rock characterisation, testing and monitoring, ISRM suggested methods", Oxford, Pergamon (1981).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.7.7]