# اصلاح شاخص سایش شیمازک به‌منظور بهبود کاربردهای آن در مهندسی سنگ

محمد عطایی*؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک،
سید هادی حسینی؛ دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن
رضا میکائیل؛ دانشگاه صنعتی ارومیه، دانشکده مهندسی معدن،

تاریخ: دریافت ۹۳/۶/٤ پذیرش ۹۵/۱/۵۲

## چکیده

تاکنون شاخص‌ها و روش‌های مختلفی برای ارزیابی قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها ارائه شده است. به‌طورکلی این شاخص‌ها را می‌توان به دو دستهٔ روش‌های مبتنی بر ذات سنگ و روش‌های مبتنی بر ابزارهای ابتکاری تقسیم‌بندی کرد. روش شاخص شیمازک از قوی‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ارزیابی ساینده‌گی سنگ است. این شاخص بر مبنای اندازه دانه‌ها، مقاومت کششی برزیلی و میزان کوارتز محتوی معادل ارائه شده است. با توجه به این‌که ارزش هر سه پارامتر فوق در شاخص شیمازک یک‌سان در نظر گرفته شده است، از این رو، در بعضی مواقع این شاخص قدرت تشخیص مناسبی را ندارد. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) وزن هر یک از سه معیار فوق در ساینده‌گی سنگ اعمال شده و طبق این وزن‌ها شاخص شیمازک اصلاح شود. در مرحلهٔ بعد برای اعتبارسنجی شاخص جدید ۱۰ نمونه سنگ ساختمانی بررسی شده و شاخص ساینده‌گی قدیمی و اصلاح شده آن‌ها محاسبه شده است. سپس سرعت برش هر سنگ ثبت شده و رابطهٔ ریاضی بین سرعت برش و شاخص قدیمی و شاخص جدید به‌دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که شاخص ساینده‌گی شیمازک جدید توانایی به مراتب بیش‌تری نسبت به شاخص قدیمی دارد.

**واژه‌های کلیدی**: سنگ، ساینده‌گی، شاخص شیمازک، سرعت برش

* **نویسنده مسئول** ataei@shahroodut.ac.ir

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

## مقدمه

ساینده‌گی به خاصیتی از سنگ اطلاق می‌شود که قادر است ابزار مکانیکی از جنس فولاد، کربور تنگستن یا الماس را از بین ببرد. ساینده‌گی به سختی کانی‌ها بستگی دارد اما شکل دانه‌ها و کلیواژ نیز در کیفیت این خاصیت تأثیر دارند. به‌همین دلیل در سال‌های نه چندان دور در ایامی که تنها ابزارهای فولادی استفاده شدند، عمر این ابزار در سنگ‌های حاوی کوارتز مثل ماسه‌سنگ در حد چند سانتی‌متر بود. هر چند کوارتز سختی بیش‌تری نسبت به فولاد دارد اما شکل ذرات نیز بی‌تأثیر در کاهش عمر نبوده است. این مشکل با جانشین‌کردن ابزارهایی از جنس کربور تنگستن به‌جای فولاد برطرف شد. خرده‌سنگ‌های گوشه‌دار و تیز در مقایسه با خرده سنگ‌های گرد روی ابزار مکانیکی خراش‌های عمیق ایجاد می‌کنند و مانع از آن می‌شوند تا انرژی متقل شده به سطح ابزار موجب خردشدن سنگ شود (اصانلو، ۱۳۸٦) [۱]. ساینده‌گی در سنگ‌ها عموماً به سه عامل میزان کوارتز محتوی، اندازه دانه‌ها و مقاومت برشی سنگ‌ها بستگی دارد (Ersoy & Waller,1995a) [۹]. در این میان میزان سیلیس یا در حالت کلی کوارتز بسیار مورد تأکید بوده است. تشخیص خاصیت ساینده‌گی سنگ‌ها بر اساس وجود سیلیس امکان‌پذیر است. سنگ‌هایی که سیلیس کم‌تری دارند مثل دولومیت یا آهک خاصیت ساینده‌گی کم‌تری دارند و بالعکس سنگ‌هایی که سیلیس بیش‌تری دارند مثل ماسه‌سنگ سیلیسی خاصیت ساینده‌گی بیش‌تری دارند. قابلیت برش سنگ (به‌عنوان یکی از مشخصه‌های مهم سنگ است) اهمیت زیادی در صنعت سنگ‌های ساختمانی دارد. با بررسی مطالعات صورت گرفته در این زمینه، می‌توان به اهمیت ساینده‌گی سنگ روی عملکرد و عمر ابزار و نهایتاً سرعت برش پی برد. محققان برخی از شاخص‌های ساینده‌گی در زمینه قابلیت برش سنگ را بررسی کرده‌اند که در جدول ۱ نشان داده شده است.

## عامل ساینده‌گی شیمازک[1]

تاکنون برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ شاخص‌های کیفی و کمی مختلفی ارائه شده است که عامل ساینده‌گی شیمازک از مهم‌ترین عامل‌ها است. دلیل اصلی این موضوع این است که روش شیمازک به‌طور بسیار مناسب مبتنی بر مشخصات سنگ بوده است از این رو، به‌طور مستقیم ساینده‌گی سنگ‌ها

1. F-abrasivity

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

را تحلیل می‌کند. این شاخص را در سال ۱۹۷۰ شیمازک و ناتز[1] ارائه کرده‌اند. رابطهٔ کلی این شاخص به‌صورت رابطه (۱) است (Ersoy & Waller,1995a) [۹].

$$F = \frac{(EqQtz \times \phi \times BTS)}{100} \qquad (۱)$$

که در آن، EqQtz نشان‌گر درصد میزان کوارتز محتوی معادل سنگ، $\phi$، اندازه دانه‌ها برحسب میلی‌متر و BTS نمایان‌گر مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمون برزیلی) بر حسب مگاپاسکال است. اندازهٔ دانه‌ها با استفاده از مقاطع نازک و میانگین‌گیری وزنی اندازه دانه‌ها و مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم از طریق آزمایش تعیین می‌شود. در میان پارامترهای مذکور میزان درصد کوارتز محتوی از حساس‌ترین و پرکاربردترین پارامترهای مربوط به ساینده‌گی سنگ‌ها است. این شاخص بر این مبنا استوار است که هر کانی با توجه به سختی مقیاس موهس چه درصدی از ساینده‌گی ناشی از کوارتز را ایجاد می‌کند. رابطهٔ کلی برای تعیین EqQtz بدین‌شرح است:

$$EqQtz = \sum_{i=1}^{n} A_i.R_i \qquad (۲)$$

که در آن، A نشان‌گر درصد کانی‌ها، R ساینده‌گی رزیوال[2] و n تعداد کانی‌ها است. میزان ساینده‌گی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موس و طبق رابطه نشان داده شده در شکل ۱ قابل محاسبه است. چنان‌چه از این شکل بر می‌آید، میزان EqQtz برای کانی کوارتز ۱۰۰ ٪ بوده است و با کاهش میزان کوارتز و یا سختی دیگر کانی‌های سنگ میزان ساینده‌گی سنگ به‌صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد.

یکی از معایب عمدهٔ روش سایش شیمازک یک‌سان در نظر گرفتن اهمیت و تأثیر سه پارامتر دانه‌بندی، مقامت کششی برزیلی و میزان کوارتز محتوی است. این در حالی است که این عوامل تأثیر یک‌سانی بر ساینده‌گی سنگ‌ها ندارند. از این رو، در این تحقیق سعی خواهد شد تا با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی، شاخص سایش شیمازک بر مبنای وزن و درجه اهمیت عوامل مؤثر بر آن اصلاح شود تا بتوان با اعتماد بیش‌تری از این شاخص استفاده کرد.

1. Schimazek & Natz
2. Rosiwal

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

## تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)[1]

در روش دلفی، پیش‌بینی‌های ارائه شدهٔ افراد خبره در قالب اعداد قطعی بیان می‌گردند، در حالی که استفاده از اعداد قطعی برای پیش‌بینی‌های بلند مدت، آن را از دنیای واقعی دور می‌سازد. از طرفی افراد خبره از شایستگی‌ها و توانایی‌های ذهنی خود برای پیش‌بینی استفاده می‌کنند و این نشان می‌دهد که نبود قاطعیت حاکم بر این شرایط از نوع امکانی است نه احتمالی. امکانی بودن قاطعیت نداشتن، با مجموعه‌های فازی سازگاری دارد و بنابراین بهتر آن است که با استفاده از مجموعه‌های فازی (با به‌کارگیری اعداد فازی) به پیش‌بینی بلندمدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخته شود. بدین‌ترتیب اطلاعات لازم در قالب زبان طبیعی از خبرگان اخذ شده و مورد تحلیل قرار گیرد. این روش تحلیل، روش دلفی فازی نامیده می‌شود. گونه‌های مختلف از اعداد فازی را می‌توان برای اخذ نظرات خبرگان استفاده کرد، اما در این تحقیق برای سهولت انجام محاسبات از اعداد فازی مثلثی استفاده می‌شود. مراحل اجرای روش دلفی بدین شرح است:

**الف) نظر سنجی از متخصصان**

در این مرحله ابتدا از متخصصان مختلف در مورد پارامترهای مؤثر بر یک پدیده یا تصمیم به‌صورت کیفی یا در صورت امکان کمّی نظرسنجی به‌عمل می‌آید.

**ب) محاسبه اعداد فازی**

برای محاسبهٔ اعداد فازی ($\tilde{a}_{ij}$) نظرات حاصل از نظرسنجی از متخصصان به‌طور مستقیم مد نظر قرار می‌گیرد. اعداد فازی در این مرحله را می‌توان بر اساس توابع عضویت مختلف مانند روش مثلثی و یا حالت ذوزنقه‌ای محاسبه کرد. با توجه به کاربرد زیاد و سهولت محاسبهٔ روش مثلثی محاسبه اعداد فازی در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲، در حالت کلی در روش فازی دلفی یک عدد فازی به‌صورت رابطهٔ (۳) تا (۵) تعریف می‌شود (Liu & Chen, 2007) [۱٦].

$$a_{ij} = \left(\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}\right)$$

$$\alpha_{ij} = Min\left(\beta_{ijk}\right), k = 1,\ldots,n \qquad (۳)$$

1. Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

$$\delta_{ij} = \left( \prod_{k=1}^{n} \beta_{ijk} \right)^{1/n}, k = 1,..., n \quad (٤)$$

$$\gamma_{ij} = Max(\beta_{ijk}), k = 1,..., n \quad (٥)$$

در روابط مذکور $\alpha_{ij} \le \delta_{ij} \le \gamma_{ij}$, $\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij} \in [1/9, 1] \cup [1, 9]$ است. با توجه به شکل ۳، $\gamma_{ij}$ حد بالای نظرات داوران، $\alpha_{ij}$ حد پائین نظرات داوران و $\beta_{ijk}$ نشان دهنده اهمیت نسبی پارامتر $i$ بر پارامتر $j$ از دیدگاه متخصص k ام است.

### ج) تشکیل ماتریس معکوس فازی

در این مرحله با توجه به اعداد فازی به‌دست آمده در مرحله قبل ماتریس مقایسه زوجی فازی بین پارامترها مختلف به شرح رابطهٔ (٦) تشکیل می‌شود (Liu & Chen, 2007) [١٦].

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}], \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ij} \approx 1, \forall i, j = 1,2,..., n \quad (٦)$$

یا به‌صورت:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (\alpha_{12}, \delta_{12}, \gamma_{12}) & (\alpha_{13}, \delta_{13}, \gamma_{13}) \\ (1/\gamma_{12}, 1/\delta_{12}, 1/\alpha_{12}) & (1,1,1) & (\alpha_{23}, \delta_{23}, \gamma_{23}) \\ (1/\gamma_{13}, 1/\delta_{13}, 1/\alpha_{13}) & (1/\gamma_{23}, 1/\delta_{23}, 1/\alpha_{23}) & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

### د) محاسبهٔ وزن فازی نسبی پارامترها (Liu & Chen, 2007)

$$\tilde{Z}i = [\tilde{a}_{ij} \otimes ... \otimes \tilde{a}_{in}]^{1/n}, \tilde{W}i = \tilde{Z}i \otimes (\tilde{Z}i \oplus ... \oplus \tilde{Z}n) \quad (٧)$$

که در آن $\tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2 = (\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$ است و $\otimes$ نماد ضرب اعداد فازی و $\oplus$ نماد جمع اعداد فازی است. $\tilde{W}i$ یک بردار سطری است که نشان‌دهندهٔ وزن فازی پارامتر i ام است.

### ه) غیر فازی کردن وزن پارامترها

پس از یافتن وزن فازی نهایی هر یک از پارامترها، همهٔ اعداد به‌دست آمده با استفاده از رابطهٔ ۸ به حالت غیرفازی تبدیل شده و تنها به‌صورت یک عدد بیان می‌شوند (Liu & Chen, 2007) [١٦].

$$W_i = (\prod_{i=1}^{3} \omega_j)^{1/3} \quad (٨)$$

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

چنان‌که ملاحظه می‌شود، از آن‌جاکه تکنیک فازی دلفی بر مبنای تجربیات و نظرات تعدادی از متخصصان یک علم استوار است، از این رو،به نظر می‌رسد نتایج به‌دست آمده از این روش می‌تواند رهیافت مناسبی برای ارزیابی اهمیت پارامترهای مؤثر بر یک پدیده و یک مفهوم باشد. به استناد تمامی منطق‌های ریاضی و به‌ویژه خاصیت فوق، در ادامه این تحقیق از این تکنیک برای اصلاح شاخص سایش شیمازک استفاده می‌شود.

## اصلاح شاخص سایش شیمازک

تاکنون روش‌های مختلفی برای وزن‌دهی پارامترهای مختلف مؤثر در پدیده‌های مکانیک سنگ ارائه شده است. از جمله جدیدترین روش‌های موجود برای وزن‌دهی به پارامترهای مؤثر در پدیدهٔ مهندسی سنگ می‌توان به‌روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره از جمله روش وزن‌دهی ساده، روش شباهت به گزینهٔ ایده‌آل، روش تحلیل سلسله مراتبی و روش تسلط تقریبی اشاره کرد. در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، از نظرات و تجربیات تعداد کثیری از متخصصان یک رشته استفاده می‌شود، از این رو، دایره تجربیات پشتوانه روش، بسیار بیش‌تر از سایر روش‌ها بوده است و این سیستم‌ها کارارایی زیادی دارند. در این تحقیق با توجه به قابلیت و شهرت بیش‌تر، روش تحلیل سلسله مراتبی برای وزن‌دهی پارامترهای موجود در شاخص سایش سنگ و اصلاح آن استفاده شده است. از این رو، در ارزیابی و اصلاح این شاخص از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی، که کاربرد ویژه ای در سال های اخیر در کارهای مهندسی پیدا کرده است (Liu and Chen, 2007a, Liu and Chen, 2007b, Hoseinie et al. 2009, Cheng and Tang, 2009, Cheng et al. 2009) ، برای وزن‌دهی پارامترها استفاده شد. در ادامه، مراحل مختلف تعیین وزن‌ها پارامترهای فوق آورده شده است [۷]، [۸]، [۱٤]، [۱٦].

### ۱. نظرسنجی از متخصصان

به‌منظور استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی برای تعیین وزن پارامترها، فرم‌های نظرسنجی شامل پارامترهای سه‌گانه مذکور تهیه شده وبرای تکمیل‌شدن برای ۲۰ تن از اساتید برجسته داخل و خارج از کشور ارسال شد. از میان فرم‌های ارسال شده ۱۵ فرم نظرسنجی تکمیل شده دریافت شد که

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

برای ورودی روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شدند. جدول ۲ نمونه‌ای از فرم‌های نظرسنجی ارسال شده را نشان می‌دهد. در این فرم از متخصصان خواسته شده بود بسته به نظر شخصی خویش و به میزان اهمیت هر یک از پارامترها امتیاز بسیار با اهمیت (۹)، با اهمیت (۷)، اهمیت متوسط (۵)، کم اهمیت (۳) و یا بدون اهمیت (۱) اختصاص دهند.

با توجه به فرم‌های موجود، ماتریس مقایسه زوجی متناظر با هر یک از پارامترها از نظر متخصصان مختلف به‌صورت جداگانه برای هر متخصص تشکیل شده است. نتایج کلی نظر سنجی‌ها در جدول ۳ آورده شده است. پس از ارزیابی نظرات داوران، میانگین امتیاز اختصاص یافته به هر پارامتر محاسبه شد. در میان پارامترهای مورد بررسی، کوارتز محتوی بیش‌ترین امتیاز و اندازه دانه‌ها کم‌ترین امتیاز را کسب کردند.

## ۲. یافتن وزن پارامترها با استفاده از روش FDAHP

پس از انجام نظرسنجی، همهٔ نتایج حاصل برای تشکیل ماتریس مقایسه زوجی پارامترها استفاده شدند. در تشکیل ماتریس مذکور از تابع عضویت مثلثی استفاده شد. توابع عضویت مثلثی با وجود سادگی، مفهوم فازی بودن کمیت‌ها را به‌صورت مطلوبی مدل می‌کنند. جدول ٤ ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین سه پارامتر نظرسنجی را نشان می‌دهد. همهٔ محاسبات ریاضی مربوط، در جدول ۵ آورده شده است. وزن‌های غیرفازی پارامترها و نمودار ستونی متناظر، برای مقایسه وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای مذکور در شکل ٤ ارائه شده است. چنان‌چه در شکل ٤ دیده می‌شود سه پارامتر کوارتز محتوی، اندازهٔ دانه‌ها و مقاومت کششی برزیلی درجه اهمیت‌های متفاوتی دارند. در این میان کوارتز محتوی دارای بیش‌ترین و مقاومت کششی دارای کم‌ترین وزن در قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها هستند.

## ۳. پیشنهاد روشی جدید برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌ها

با توجه به نتایج حاصل از بخش قبلی، وزن نهایی هر یک از پارامترهای سه گانه بررسی شده به‌دست آمده یک‌سان نیست، از این رو، استفاده آن‌ها به‌صورت هم ارزش و با ضریب یک‌سان در فرمول شیمازک منطقاً صحیح به‌نظر نمی‌رسداز این رو، باید رهیافتی برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌ها بر مبنای ارزش پارامترها یافت. یکی از بهترین روش‌ها برای تعیین و ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌ها، استفاده

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

از سیستم‌های طبقه‌بندی مشتمل بر پارامترهای موثر با درجهٔ اهمیت غیر یک‌سان است. در این تحقیق نیز برای اصلاح شاخص سایش شیمازک، پارامترهای استفاده شده در این شاخص به‌عنوان پارامترهای ورودی یک سیستم طبقه‌بندی جدید استفاده شده‌اند. با در نظر گرفتن این طبقه‌بندی و اعمال ارزش‌های جداگانه پارامترها می‌توان کلاس ساینده‌گی سنگ را تعیین کرده و شاخص کمّی ساینده‌گی را بر این اساس تعیین کرد. برای ارائه طبقه‌بندی جدید ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌ها، نیاز است تا هر سه پارامتر میزان کوارتز محتوی، قطر میانگین دانه‌ها و مقاومت کششی برزیلی خود به تنهایی طبقه‌بندی گردیده و امتیازدهی شوند. با توجه به اهمیت نسبی پارامترهای مختلف استفاده شده برای تعیین شاخص سایش شیمازک اصلاح شده، مجموع امتیازات سنگ ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. امتیازات بالاتر دلیل بر ساینده‌گی بیش‌تر سنگ است. هوک و براون دریافتند که یک سیستم طبقه‌بندی باید غیرخطی باشد تا به‌طور واقعی‌تر بتوان به طبقه‌بندی توده سنگ‌های ضعیف پرداخت. بنابراین در سیستم طبقه‌بندی جدید، به‌منظور امتیازدهی به مقادیر مختلف هر پارامتر، بیش‌ترین امتیاز به بیش‌ترین ساینده‌گی داده شده است. برای امتیاز حالت‌های خیلی ساینده، ساینده، ساینده‌گی متوسط، ساینده‌گی کم و ساینده‌گی خیلی کم به‌ترتیب ۱۰۰٪، ۷۰٪، ۵۰٪، ۲۵٪ و ۱۰٪ امتیاز ماکزیمم، اختصاص یافته است. با ترتیب امتیاز دهی فوق، سعی شده سیستم طبقه‌بندی غیرخطی باشد. برای طبقه‌بندی میزان کوارتز محتوی، بازه صفر تا ۱۰۰ درصد کوارتز محتوی به پنج بازهٔ مساوی ٪۲۰ در پنج کلاس کیفی تقسیم شده است. برای مثال نمونه سنگی با درصد کوارتز محتوی بالای ۸۰ درصد در کلاس خیلی ساینده در این طبقه ارزیابی خواهد شد. برای طبقه‌بندی اندازه دانه‌های سنگ از طبقه‌بندی پیشنهادی انجمن مکانیک سنگ نروژ (NBG1985) استفاده شده است. در طبقه‌بندی مقاومت کششی (آزمون برزیلی) از منابع مختلف به‌ویژه طبقه‌بندی پیشنهادی تاتماز [۲۰] با اعمال تغییراتی استفاده شده است. با توجه به تمامی مطالب ارائه شده در مجموع ساختار کلی طبقه‌بندی پیشنهادی شاخص سایش شیمازک اصلاح شده به‌صورت جدول ٦ قابل ارائه است. در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی نمونه سنگ‌ها در پنج کلاس به دو صورت کیفی و کمی از دیدگاه قابلیت ساینده‌گی ارزیابی می‌شوند.

به‌منظور سهولت کاربرد و نیز رفع اشکال امتیازدهی گسسته در طبقه‌بندی مذکور یک سری محاسبات رگرسیونی انجام گرفت تا روابط ریاضی بین مقدار پارامترها و امتیاز کسب شده ارائه شود.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

شکل ٤ منحنی‌های امتیازدهی پیوسته به پارامترهای مختلف استفاده شده را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد.

چنان‌چه در این منحنی‌ها ملاحظه می‌شود با در دست بودن مقادیر مربوط به هر یک از پارامترها به‌راحتی می‌توان امتیاز هر سنگ را از نظر پارامتر مذکور تعیین کرد. با جمع امتیازهای به‌دست آمده از این منحنی‌ها میزان شاخص ساینده‌گی سنگ و نیز کلاس آن مشخص می‌شود. در بخش بعد، به‌منظور ارزیابی کارآیی و اعتبارسنجی رابطهٔ شیمازک اصلاح‌شده، ساینده‌گی ۱۰ نوع سنگ ساختمانی با استفاده از رابطهٔ قدیمی و رابطهٔ اصلاح شده تعیین شده و رابطهٔ این شاخص‌ها با سرعت برش سنگ‌های ساختمانی بررسی شده است.

## اعتبارسنجی رابطه و پژوهش‌های آزمایشگاهی

به‌منظور ارزیابی و اعتبارسنجی رابطهٔ شیمازک اصلاح شده و توسعهٔ کاربردهای این شاخص، یک سری پژوهش‌های آزمایشگاهی و صحرایی برای بررسی رابطهٔ بین شاخص سایش شیمازک جدید و سرعت برش (فرآوری) سنگ‌های ساختمانی انجام شد. برای این منظور در مجموع از ۱۰ معدن سنگ ساختمانی کشور نمونه‌برداری به‌عمل آمده و در کارخانه‌های فراوری سرعت برش سنگ‌ها اندازه‌گیری و ثبت شد. سپس برای بررسی‌های آزمایشگاهی و تعیین پارامترهای موجود در شاخص شیمازک در مجموع از هر معدن پنج نمونه برای انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شدند. با توجه پارامترهای موجود در شاخص شیمازک تنها آزمایش کشش غیرمستقیم (تست برزیلی) (BTS) به‌عنوان آزمون مکانیک سنگی روی نمونه‌ها انجام شده است. برای این منظور از آزمایشگاه خواسته شد تا همهٔ‌آزمایش‌ها تحت استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ و با دقت بالا انجام گیرند. برای بررسی و اطلاع دقیق از مشخصات کانی‌شناسی یک مقطع نازک از بخش تیپیک سنگ‌های بررسی شده تهیه شد و بررسی شد. نمونه مقطع نازک تهیه شده برای بررسی در شکل ٦ نشان داده شده است. با استفاده از این مقطع نوع و درصد کانی‌های تشکیل دهنده تعیین شدند. سپس میزان کوارتز محتوی معادل هر سنگ تعیین شد. در ادامه مشخصات اصلی سنگ‌های بررسی شده آورده شده است. به‌منظور بررسی سرعت برش سنگ‌های تزئینی بررسی شده، سرعت برش سنگ‌ها بر اساس مترمربع در ساعت (تولید در واحد زمان) به‌طور میانگین برای هر

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

سنگ در کارخانه‌های فرآوری تعیین شد. جدول ۷ نتایج مربوط به پژوهش‌های صحرایی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

رابطهٔ ریاضی بین شاخص قدیمی و شاخص جدید با میزان برش (شکل ۷) نشان داد که میزان برش به‌صورت لگاریتمی با افزایش شاخص شیمازک اصلاح شده با ضریب هم‌بستگی $R^2$=۰/۹٤ کاهش ابد. در نقطه مقابل میزان برش به‌صورت توانی با افزایش شاخص شیمازک قدیم با ضریب هم‌بستگی کم‌تری ($R^2$=۰/۷۳) نسبت به شاخص اصلاح شده کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در این است که مقادیر شاخص جدید برای سنگ‌هایی که دارای میزان برش یک‌سانی بودند نزدیک‌تر از مقادیر شاخص قدیمی است.

## نتیجه‌گیری

شاخص شیمازک از قوی‌ترین و مرسوم‌ترین شاخص‌ها از میان روش‌های ارائه شده برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ است. این شاخص بر مبنای اندازهٔ دانه‌ها، مقاومت کششی برزیلی و میزان کوارتز محتوی معادل ارائه شده است که هر کدام یک از پارامترها با توجه به ماهیت شان می‌توانند در کارهای مهندسی به‌ویژه در صنعت سنگ بری نقش متفاوتی ایفا کنند. با توجه به این‌که در شاخص شیمازک ارزش هر سه پارامتر فوق شیمازک یک‌سان در نظر گرفته شده‌اند، در بعضی مواقع این شاخص قدرت تشخیص مناسبی از خود نشان نمی‌دهد. از این رو، تعیین یک وزن مناسب برای هر یک از پارامترها و ارائه یک اندیس جدید برای افزایش دقت در محاسبات لازم تشخیص داده شد. در این تحقیق با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) وزن هر یک از سه معیار فوق با توجه به نظر نخبگان در ساینده‌گی سنگ اعمال شده و بر طبق این وزن‌ها شاخص شیمازک اصلاح شد. در مرحلهٔ بعد برای اعتبارسنجی شاخص جدید مطالعاتی روی ۱۰ نمونه سنگ گرانیتی انجام شد و شاخص ساینده‌گی قدیمی و اصلاح شده آن‌ها تعیین شد. سپس سرعت برش هر سنگ تعیین شد. رابطهٔ ریاضی بین شاخص قدیمی و شاخص جدید نشان داد که شاخص شیمازک اصلاح شده با ضریب هم‌بستگی بهتری ($R^2$=۰/۹٤) می‌تواند با دقت بیش‌تری نسبت به شاخص قدیمی میزان برش را پیش‌بینی کند. لازم به‌ذکر است که نتایج حاصل از این تحقیق تنها برای نمونه سنگ‌های

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

سخت بررسی شده است. بدیهی است به‌منظور ارزیابی دقیق شاخص اصلاحی بهتر است تا در پژوهش‌های آتی نمونه هایی از سنگ‌های نرم نیز به مجموعه داده‌ها اضافه شود.

## منابع


۱. اصانلو م.، *روش‌های حفاری*، چاپ سوم، مرکز نشر صدرا (۱۳۸٦) ٤٩٤.

2. Ataei M., Mikaiel R., Sereshki F., Ghaysari N., "Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis", Arabian Journal of Geosciences. 5 ((2011)) 1289-1295.
3. Ataei M., Mikaeil R., Hoseinie S. H., Hosseini S. M., "Fuzzy analytical hierarchy process approach for ranking the sawability of carbonate rock", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 50 (2012) 83-93.
4. 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.
5. Buyuksagis I.S., "Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade", Journal of Materials Processing Technology, 183 (2007) 399-406.
6. Chen Chao-Shi, Liu Ya-Ching, "A methodology for evaluation and classification of rock mass quality on tunnel engineering. Tunnelling and Underground Space Technology 22 (2007) 377-387.
7. Cheng Jao-Hong, Tang Chih-Huei, "An Application of Fuzzy Delphi and Fuzzy AHP for Multi-criteria Evaluation on Bicycle Industry Supply Chains", Wseas Transactions on System and Control. Issue 1, Volume 4, January (2009).

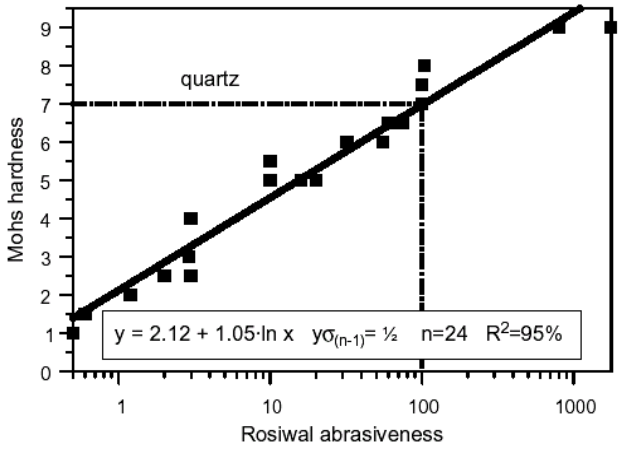

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

8. Cheng Jao-Hong, Tang Chih-Huei, Chih-Ming Lee, "An Application of Fuzzy Delphi and Fuzzy AHP on Evaluating Wafer Supplier in Semiconductor Industry",Wseas Transactions on System and Control. Issue 5, Volume 6, May (2009).
9. Ersoy A., Waller M. D., "Textural characterization of rocks", J. of Engineering Geology, June, VoL. 39, Issues 3-4 (1995a) 123-136.
10. Ersoy A., Atici U. "Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks", Diamond and Related Materials, 13 (2004) 22-37.
11. 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.
12. Eyuboglu AS., Ozcelik Y., Kulaksiz S., Engin IC., "Statistical and microscopic investigation of disc segment wear related to sawing Ankara andesites, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 40 (2003) 405-414.
13. 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. 40 (5) (2007) 505-517.
14. Hoseinie S. H., Ataei M., Osanloo M., "A new classification system for evaluating rock penetrability", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46 (2009) 1329-1340.
15. 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.

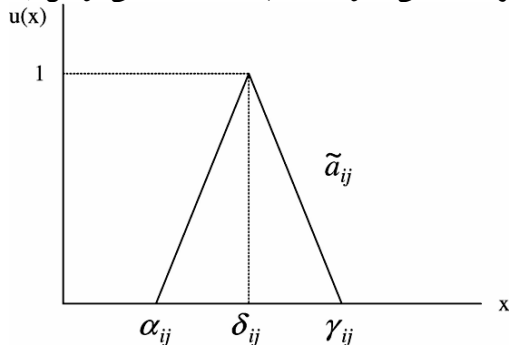
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

16. Liu YC., Chen CS., "A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment", Eng Geol 89 (2007) 129-43.
17. 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 (2011a) 57-68.
18. Mikaeil R., Ataei M., Yousefi R., "The application of a fuzzy analytical hierarchy process to the prediction of vibration during rock sawing", Mining Science and Technology, 21 (2011b) 611-619.
19. Mikaeil R., Ozcelik Y., Ataei M., Yousefi R., "Ranking the sawability of dimension stone using Fuzzy Delphi and multi-criteria decision-making techniques", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences; 58 (2013) 118-126.
20. Tutmez B., Kahraman S., Gunaydin O., "Multifactorial fuzzy approach to the sawability classification of building stones", Construction and Building Materials 21 (2007) 1672-1679.
21. Thuro K, "Drillability prediction- geological influences in hard rack drill and blast tunneling", Geol Runsch, 86 (1997) 426-438.
22. Wright D. N., Cassapi V.B., "Factors influencing stone sawability", Industrial Diamond Review, 2 (1985) 84-87.
23. Wei X., Wang CY, Zhou ZH., "Study on the fuzzy ranking of granite sawability", J. Mater. Process, Technol,139 (2003) 277-80.

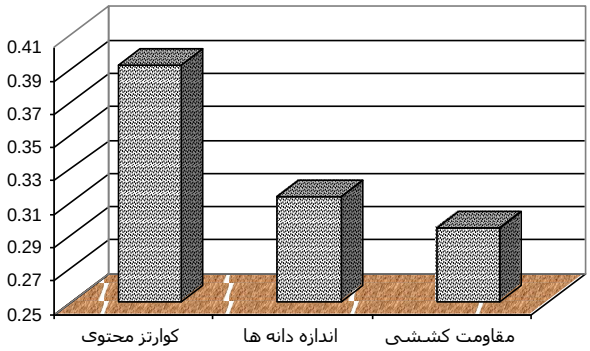
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]




**شکل ۱. رابطهٔ میزان ساییدگی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موهس (Thuro, 1997)**

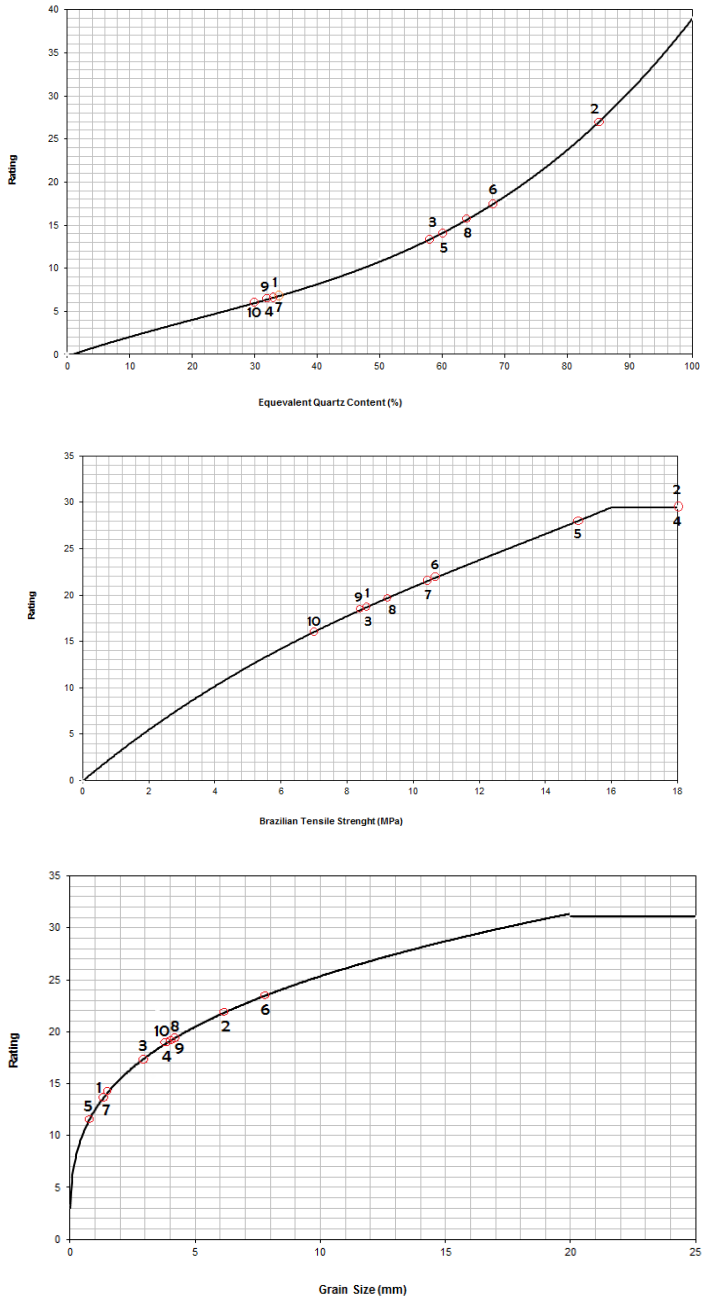



**شکل ۲. تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی (Liu & Chen, 2007)**



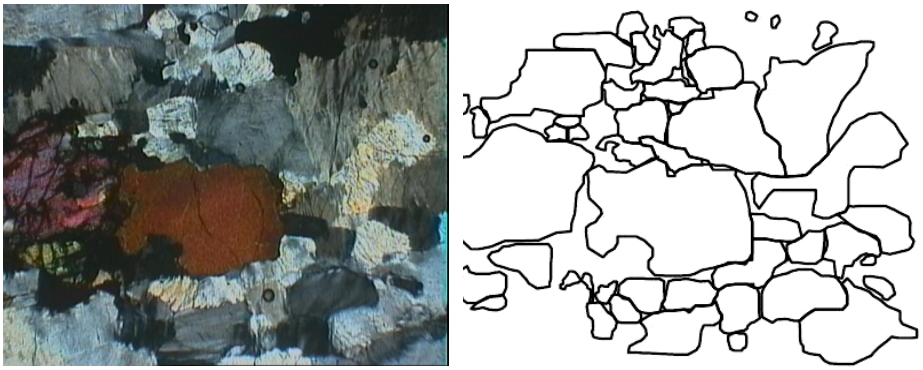

**شکل ۳. وزن نهایی پارامترها**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

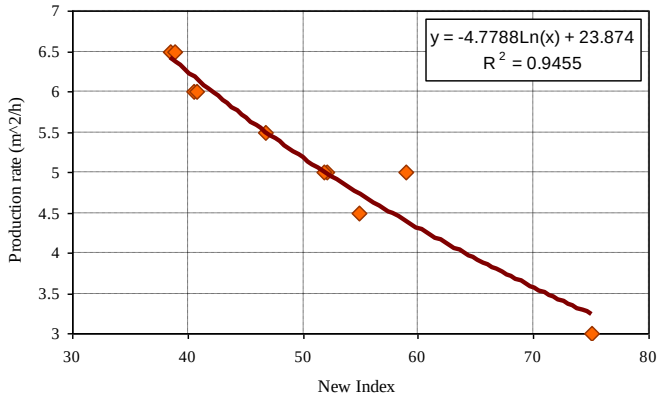


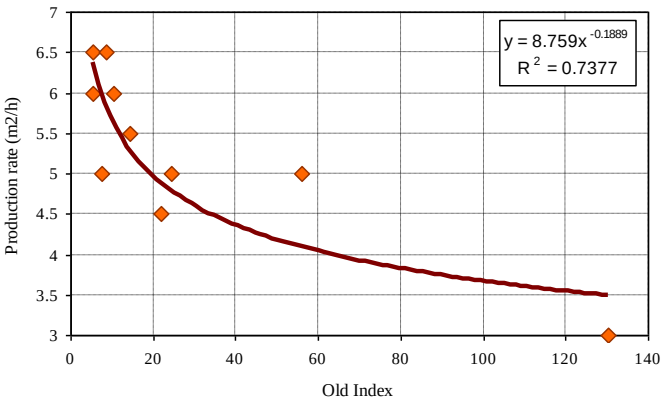

**شکل ٤. منحنی‌های امتیازدهی پیوسته به‌میزان کوارتز محتوی معادل، مقاومت کششی و اندازه دانه‌ها**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]



شکل ۵. فرمت دیجیتالی مقطع نازک گرانیت سبز هرمه




شکل ٦. ارتباط میان شاخص شیمازک اصلاح شده و شاخص قدیمی در تعیین میزان برش سنگ های گرانیتی

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

**جدول ۱. شاخص‌های سایندگی بررسی شده محققان**

| منابع | شاخص‌های سایندگی | | |
|---|---|---|---|
| | لوس آنجلس | سورشار | شیمازک |
| Wright and Cassapi 1985 | | • | |
| Wei et al. 2003 | | • | |
| Eyuboglu et al. 2003 | • | | |
| Ersoy and Atici 2004 | | • | |
| Kahraman et al. 2004 | • | | |
| Ersoy et al. 2005 | | • | • |
| Buyuksagis and Goktan 2005 | | • | |
| Fener et al. 2007 | • | | |
| Tutmez et al. 2007 | • | | |
| Buyuksagis 2007 | | • | |
| Ataei et al. 2011 | • | | |
| Mikaeil et al. 2011a | • | | |
| Mikaeil et al. 2011b | | | • |
| Ataei et al. 2012 | | | • |
| Mikaeil et al. (2013) | | | • |

**جدول ۲. نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای متخصصان**

| اهمیت هر یک از پارامترها ← | بدون اهمیت | کم اهمیت | اهمیت متوسط | با اهمیت | بسیار با اهمیت |
|---|---|---|---|---|---|
| **مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ** | | | | | |
| میزان کوارتز محتوی | | | | | |
| قطر میانگین دانه‌ها | | | | | |
| مقاومت کششی برزیلی | | | | | |

**جدول ۳. نتایج کلی نظر سنجی‌ها**

| متخصصان ← | ۱ | ۲ | ۳ | ٤ | ٥ | ٦ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱٤ | ۱٥ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **امتیازات اختصاص یافته به پارامترها به‌وسیلهٔ متخصصان** | | | | | | | | | | | | | | |
| **کوارتز محتوی** | ۹ | ۹ | ۹ | ۷ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۷ | ٥ | ۷ | ۹ | ٥ | ۹ |
| **اندازه دانه ها** | ٥ | ۷ | ٥ | ۳ | ٥ | ۷ | ۷ | ۷ | ۹ | ۳ | ٥ | ٥ | ۷ | ۷ | ۷ |
| **مقاومت کششی** | ۷ | ۳ | ۳ | ۳ | ۷ | ۷ | ۷ | ۷ | ۹ | ٥ | ۹ | ۷ | ۷ | ٥ | ۹ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]

**جدول ٤. ماتریس مقایسهٔ زوجی فازی دلفی بین سه پارامتر نظرسنجی شده**

| | مقاومت کششی برزیلی | اندازه دانه‌ها | کوارتز محتوی |
|---|---|---|---|
| کوارتز محتوی | (۰/۵۵۵ ،۰/۳۰۱۷ ،۳) | (۰/۷۱٤۳ ،۰/۲۸٦۹ ،۲/۳۳۳) | (۱ ،۱ ،۱) |
| اندازه دانه‌ها | (۰/۵۵۵ ،۰/۰۱۱۵ ،۲/۳۳۳) | (۱ ،۱ ،۱) | (۰/٤۲۸۵ ،۰/۷۷۷ ،۱/٤) |
| مقاومت کششی برزیلی | (۱ ،۱ ،۱) | (۰/٤۲۸۵ ،۰/۹۸۸٦ ،۱/۸) | (۰/۳۳۳ ،۰/۷٦۸۲ ،۱/۸) |

**جدول ۵. پارامترهای مربوط به تعیین وزن با استفاده از FDAHP**

| | $\widetilde{W}_i$ | | | $Z_i$ | | | Z | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| کوارتز محتوی | ۱/۰۱۸۹۲ | ۰/۳۹۲۸ | ۰/۱۵۰٦ | ۱/۹۱۲۹ | ۱/۱۸۷٦ | ۰/۷۳٤۸ | ۷ | ۱/٦۷۵۱ | ۰/٦۸۳۹ |
| اندازه دانه‌ها | ۰/۷۹۰۳ | ۰/۳۰۵۲ | ۰/۱۲۷۱ | ۱/٤۸۳۷ | ۰/۹۲۲۸ | ۰/٦۱۹۷ | ۰/۲٦٦٦ | ۰/۷۸٦ | ۰/۲۳۸ |
| مقاومت کششی برزیلی | ۰/۷۸۸۱ | ۰/۳۰۱۸ | ۰/۱۰۷۲ | ۱/٤۷۹۷ | ۰/۹۱۲۳ | ۰/۵۲۲۷ | ۳/۲٤ | ۰/۷۵۹٤ | ۰/۱٤۲۸ |

**جدول ٦. ساختار کلی طبقه‌بندی پیشنهادی شاخص سایش شیمازک اصلاح شده**

| | پارامترها | ردیف‌های ارزش کمی و کیفی | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | خیلی ساینده | ساینده | ساینده‌گی متوسط | ساینده‌گی کم | ساینده‌گی خیلی کم |
| ۱ | میزان کوارتز محتوی (٪) | ۱۰۰–۸۰ | ۸۰–٦۰ | ٦۰–٤۰ | ٤۰–۲۰ | ۲۰–۰ |
| | امتیاز | ۳۹ | ۲۷/۳ | ۱۹/۵ | ۹/۷۵ | ۳/۹ |
| ۲ | اندازه دانه‌ها *(mm)* | ۲۰< | ۲۰–٦ | ٦–۰/٦ | ۰/٦–۰/۰۲ | ۰/۰۲–۰ |
| | امتیاز | ۳۱/۵ | ۲۲/۰۵ | ۱۵/۷۵ | ۷/۸۷۵ | ۳/۱۵ |
| ۳ | مقاومت کششی برزیلی *(MPa)* | ۱۲< | ۱۲–۸ | ۸–٤ | ٤–۲ | ۲–۰ |
| | امتیاز | ۲۹/۵ | ۲۰/٦۵ | ۱٤/۷۵ | ۷/۳۷۵ | ۲/۹۵ |

**جدول ۷. سرعت برش سنگ‌های بررسی شده**

| نام معدن | نوع و نام سنگ | سرعت برش *($m^2/h$)* | EQC | BTS | GS | شاخص شیمازک | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | قدیمی | جدید |
| سولابست | گرانیت سبز جنگلی | ٦/۵ | ۳٤/۰۲ | ۸/۵۲ | ۱/۸٦ | ۵/۳۹ | ۳۸/۵٦ |
| سرابی | گرانیت مشکی | ۳ | ۸۵/۰۵ | ۲٤/٦ | ٦/۲۳ | ۱۳۰/۳۵ | ۷۵/۰۵ |
| قلعه خرگوشی | گرانیت قرمز | ۵/۵ | ۵۷/٦۵ | ۸/۵۲ | ۲/۹ | ۱٤/۲٤ | ٤٦/۷۳ |
| سینیت هرمه | گرانیت سبز پیرانشهر | ٤/۵ | ۳۲/۲۳ | ۱۸ | ۳٫۸ | ۲۲/۰۵ | ۵٤/۸۸ |
| چایان | گرانیت مشکی | ۵ | ٦۰/۰٦ | ۱۵ | ۰/۸۷ | ۷/۸٤ | ۵۲/۷۳ |
| نهبندان | گرانیت کرم | ۵ | ٦۸/۳۵ | ۱۰/٦ | ۷/۷٤ | ۵٦/۰۸ | ۵۸/۹۱ |
| ناری | گرانیت ناری ارومیه | ٦ | ۳۳ | ۱۰/۳ | ۱/٦ | ۵/٤٤ | ٤۰/۵۳ |
| نهبندان | گرانیت سفید | ۵ | ٦٤/۳ | ۹/۲ | ٤/۱ | ۲٤/۲۵ | ۵۱/۸۷ |
| خوش طینت | گرانیت شکلاتی خرمده | ٦ | ۳۲/۲ | ۸/۳ | ۳/۹ | ۱۰/٤۲ | ٤۰/۸۳ |
| گرانیت خاتم | گرانیت مروارید | ٦/۵ | ۳۰/۳ | ۷/٤ | ۳/۸ | ۸/۵۲ | ۳۸/۸۳ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-04 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.6.3 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.73 ]