پیش‌بینی عملکرد آهنگ حفاری و برش در معادن سنگ ساختمانی(کربناته) با توجه به خصوصیات بافتی سنگ‌ها

محمد عطایی*؛ دانشگاه شاهرود، دانشکدهٔ مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک،
سعید قنبری؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان

تاریخ: دریافت ۹٤/۰۵/۰۵ پذیرش ۹۵/۱۱/۰۳

چکیده

حفاری و برش سنگ، به‌عنوان یکی از عملیات مهندسی، در زمینه‌های مختلف فنی و مهندسی معدن، کاربردهای وسیع و تعیین‌کننده‌ای دارد. تخمین قابلیت حفاری و برش سنگ با دستگاه‌های حفاری و سیم برش الماسه، در تخمین هزینه‌ها و طراحی معادن نقش مهمی دارد. در این مقاله به‌منظور پیش‌بینی آهنگ حفاری و برش، نمونه‌های سنگ ساختمانی کربناته از معادن مختلف ایران، بررسی شد. به‌منظور ارزیابی تأثیر مشخصات بافتی بر آهنگ حفاری و برش، ابتدا از هر مقطع نازک میکروسکوپی نمونه سنگ بررسی شده، عکس تهیه و سپس مساحت، محیط، بزرگ‌ترین قطر و کوچک‌ترین قطر دانه‌های موجود در مقاطع تعیین شد و مشخصات دیگر بافتی، طبق روابط ریاضی به‌دست آمد. در مرحلهٔ بعد ارتباط بین پارامترهای ذکر شده با آهنگ حفاری و برش در برازش تک متغیره تعیین شد. در پایان برای دست‌یابی به ضریب هم‌بستگی بیش‌تر، از برازش چند متغیره استفاده شد. از میان خصوصیات بافتی مؤثر بر آهنگ حفاری، ضریب بافت، محیط دانه، قطر معادل، نسبت وضعیت دانه و شاخص یک‌نواختی ارتباط خوبی با آهنگ حفاری و هم‌چنین از میان خصوصیات بافتی مؤثر بر آهنگ برش، ضریب بافت، محیط دانه، مساحت دانه، قطر معادل، فشردگی، فاکتور شکل، شاخص قفل‌شدگی و شاخص یک‌نواختی ارتباط خوبی با آهنگ برش داشتند و رابطهٔ نهایی برای پیش‌بینی آهنگ حفاری و برش بر حسب این پارامترها به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آهنگ حفاری و برش، مشخصات بافتی، سیم برش الماسه و سنگ ساختمانی.

*نویسنده مسئول ataei@shahroodut.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

مقدمه

ا در معدن‌کاری روباز، حفاری به‌عنوان اولین مرحله عملیات استخراج، نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای بر سایر مراحل استخراج دارد. با توجه به هزینهٔ زیاد و دستگاه‌های گران‌قیمت، شناخت تمامی پارامترهای دخیل در حفاری و بهینه‌سازی آن، شرایط را برای استخراج بهینه فراهم می‌کند. شناخت محیط حفاری و خصوصیات تودهٔ سنگ برجا، کمک بسیار زیادی به انتخاب نوع سیستم حفاری، تعیین تعداد ماشین‌آلات حفاری، ارزیابی توان تولید معدن و پیش‌بینی سرعت حفاری خواهد کرد [۲]. امروزه سیم برش الماسه به‌طور گسترده‌ای در استخراج سنگ‌های کربناته استفاده می‌شود. پیش‌بینی قابلیت برش سنگ در برآورد هزینه و میزان تولید نقش چشم‌گیری دارد. شناخت کامل سنگ‌های ساختمانی و ارزیابی توانایی اجرایی دستگاه‌های حفاری و برش در معادن، طراحان و برنامه‌ریزان تولید را به‌سمت بهبود سرعت برش و افزایش تولید سوق می‌دهد [٤]. پیش‌بینی عملکرد حفاری و برش سیم الماسه در برآورد هزینه و برنامه‌ریزی معادن سنگ، مهم است. برنامه‌ریزی پروژه‌های حفاری و برش سنگ با برآورد دقیق از قابلیت حفاری و برش سیم الماسه به بازدهی بیش‌تر، کمک می‌کند [۵]، [٦]. سرعت حرکت سیم برش، به‌سختی سنگ بستگی دارد و معمولاً در سنگ‌های سخت نظیر گرانیت حدود ۲۰ تا ۳۰ متر در ثانیه و در سنگ‌های چینی و مرمریت ۳۰ تا ۳٦ متر در ثانیه است. سرعت برش به کیفیت سنگ بستگی دارد، که در معادن مرمریت از ٤ الی ۷ مترمربع در ساعت است [۳].

بار روی مته و دور مته در دقیقه، در سرعت حفاری مؤثرند، به‌طوری‌که علاوه بر افزایش سرعت حفاری، موجب کاهش هزینه حفاری و طول عمر ماشین می‌شوند [۱].

خواص بافتی که تحت تأثیر عملکرد دانه‌های سنگ است، به‌طور عمده شامل نوع، اندازه، شکل و دانه مواد معدنی، جهت‌گیری نسبی و آرایش مواد معدنی، وقوع و توزیع فسیل‌ها و اجزاء درون سنگ است [۱۰]، [۱۱].

بافت، نقش اساسی در رفتار مهندسی سنگ‌ها به‌ویژه از نظر ارتباط سنگ و ماشین (حفاری، برش سنگ ساختمانی) دارد. در بحث بافت سنگ، اندازه، شکل و میزان خمیره (نسبت دانه به خمیره) مورد توجه قرار می‌گیرد. این پارامتر در انتخاب درست تجهیزات و ماشین‌آلات حفاری

و برش، تعیین رفتار مکانیکی و پیش‌بینی عملکرد تجهیزات حفاری و برش باید مورد توجه قرار گیرد. از جمله مشخصات اصلی بافت، می‌توان به اندازه، شکل، جهت‌یافتگی، نسبت دانه‌ها و ماتریکس سنگ اشاره کرد. از میان مشخصات بافتی، شکل دانه‌های سنگ به‌عنوان بحرانی‌ترین پارامتر مؤثر در قابلیت ساینگی سنگ‌ها مطرح است. تحقیقات انجام شده در مورد سنگ‌های آهکی نشان می‌دهد که با افزایش ضریب بافت، آهنگ فرسایش افزایش و در نتیجه آهنگ حفاری و برش، کاهش می‌یابد [۵]. هرچه دانه‌های یک سنگ ریزتر و بافت سنگ متراکم‌تر باشد، سرعت حفاری و نیز قابلیت حفاری توده سنگ کاهش می‌یابد [۲].

بافت سنگ و هم‌چنین اندازه دانه، یکی از خواص سنگ است که سرعت حفاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هرچه اندازه‌ی دانه‌های سنگ ریزتر و بافت متراکم‌تر باشد، آهنگ حفاری و قابلیت حفاری توده سنگ کاهش می‌یابد [۱۱].

در این مقاله پیش‌بینی عملکرد دستگاه حفاری راسل و سیم برش الماسه در معادن سنگ ساختمانی (کربناته) با توجه به خواص بافتی سنگ بررسی شده است. بدین منظور در ابتدا پارامترهای ارزیابی بافت سنگ‌ها معرفی و سپس برای نمونه‌های تهیه شده از معادن مختلف در استان‌های کردستان و همدان، این پارامترها تعیین شده است. در انتها با تحلیل برازش تک متغیره و چند متغیره بهترین رابطه بین مشخصات بافتی با آهنگ حفاری و برش ارائه شده است.

پارامترهای ارزیابی بافت سنگ‌ها

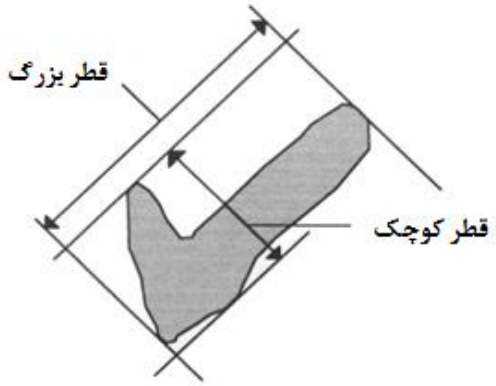
۱. طول قطر بزرگ و کوچک دانه (D_{max}, D_{min})

این دو پارامتر و ترکیب ریاضی آن‌ها از نظر هندسی مشخص‌کننده خصوصیات مختلفی از دانه‌ها و بافت سنگ هستند. نمای شماتیک قطر بزرگ و کوچک دانه‌های سنگ در شکل ۱ نمایش داده شده است [۱٤].

۲. مساحت دانه (A_i)

مساحت دانه برابر با مساحت سطح مقطع دیده شده آن دانه در مقطع نازک سنگ است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]



شکل ۱. تصویر قطر بزرگ و کوچک دانه‌های سنگ [۱٤]

۳. محیط دانه (L_p)

این پارامتر نشان‌دهندهٔ طول مرز دانه در سنگ و یا به عبارت ریاضی محیط دانه است.

٤. شیب قطرهای اصلی دانه (MajAS)

این پارامتر عبارت از زاویه بین قطر بزرگ‌تر یا قطر کوچک‌تر دانه و خط افق است [۷].

۵. قطر معادل (D_{equi})

قطر معادل در حقیقت نشان‌دهندهٔ اندازه دانه‌های سنگ است. این پارامتر با استفاده از رابطه (۱) قابل‌محاسبه است [۱۲].

$$Dequi = \sqrt{\frac{4Ai}{\pi}} \qquad (۱)$$

که در این رابطه Dequi قطر معادل و A مساحت دانه است.

٦. فشردگی (C)

این پارامتر به‌عنوان شکل مقطع دانه‌ها در مطالعه بافت مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای محاسبه فشردگی از رابطه (۲) استفاده می‌شود [۹].

$$C = \frac{Lp^2}{Ai} \qquad (۲)$$

که در این رابطه C فشردگی، A_i مساحت و L_p محیط دانه است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

۷. فاکتور شکل (SF)

این پارامتر در بررسی‌های بافت‌شناسی سنگ‌ها نشان‌دهنده میزان گردشدگی مقطع دانه‌های سنگ است. این پارامتر با میزان سطح دانه رابطهٔ مستقیم و با محیط دانه رابطه عکس دارد. فاکتور شکل در مقاطع نازک سنگ با استفاده از رابطه (۳) قابل‌محاسبه است [۱۰]:

$$SF=\frac{4\pi Ai}{Lp^2} \qquad (۳)$$

که در این رابطه: SF فاکتور شکل، Ai مساحت دانه و Lp محیط دانه است.

۸. نسبت وضعیت دانه (AR[1])

این پارامتر از تقسیم قطر بزرگ دانه بر قطر کوچک آن حاصل می‌شود. این شاخص به کمک مقطع نازک و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۳].

$$AR=\frac{Dmax}{Dmin} \qquad (٤)$$

که در این رابطه: AR نسبت وضعیت دانه‌ها، Dmax طول قطر بزرگ و Dmin طول قطر کوچک دانه است.

۹.ضریب بافت[2]

ضریب بافت، جامع‌ترین و معتبرترین روش کمّی کردن بافت یک سنگ است که هوارس و رولند[3] (۱۹۸۷) ارائه کرده‌اند. این شاخص با رابطهٔ عمومی (۵) قابل‌محاسبه است [۱۱]:

$$TC= AW\left[\left(\frac{N1}{NO+N1}\times AR1\times AF1\right)+\left(\frac{NO}{N0+N1}\times\frac{1}{FF0}\right)\right] \qquad (۵)$$

که در آن TC ضریب بافت، AW دانسیته تراکم دانه‌ها، N_0 تعداد دانه‌های با نسبت طول به قطر کم‌تر از ۲، N_1 تعداد دانه‌های با نسبت طول به قطر بیش‌تر از ۲، FF_0 میانگین حسابی فاکتور شکل برای دانه‌های N_0، AR_1 میانگین حسابی نسبت طول بر قطر در دانه‌های N_1 و AF_1 فاکتور زاویه که برای ذره‌های N_1 محاسبه می‌شود.

1. Aspect Ratio
2. Texture Coefficient
3. Howarth& Rowland

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

دانسیتهٔ تراکم دانه‌ها (AW) بدین‌صورت تعریف می‌شود:

AW= (مساحت دانه‌های درون مرز ناحیه مرجع) / (مساحت ناحیه مرجع)

فاکتور شکل برای دانه‌های کشیده و طویل که در آن‌ها نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک بیش از ۲ است، محاسبه می‌شود. فاکتور زاویهٔ AF1 به‌وسیلهٔ سیستم وزن‌دهی موجود در جدول ۱ طبقه‌بندی می‌شود. این سیستم تفاوت زاویه‌ای بین همهٔ دانه‌های کشیده را با دقت و به‌طور مطلق محاسبه می‌کند. تفاوت زاویه‌ای در نه کلاس مختلف دسته‌بندی می‌شود، برای هر کلاس یک وزن وجود دارد.

فاکتور زاویه از جمع کلاس‌ها و تقسیم آن‌ها بر کل اعداد زاویه‌ای به شرح رابطهٔ (٦) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$AF = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{Xi}{\frac{N(N-1)}{2}} \right] \qquad (٦)$$

که در آن N تعداد کل دانه‌های کشیده و طویل، X_i شماره تفاوت زاویه‌ای در هر کلاس و i فاکتور وزن‌دهی و شمارG کلاس است.

جدول ۱. روش وزن‌دهی به تفاوت‌های زاویه‌های دانه‌های کشیده

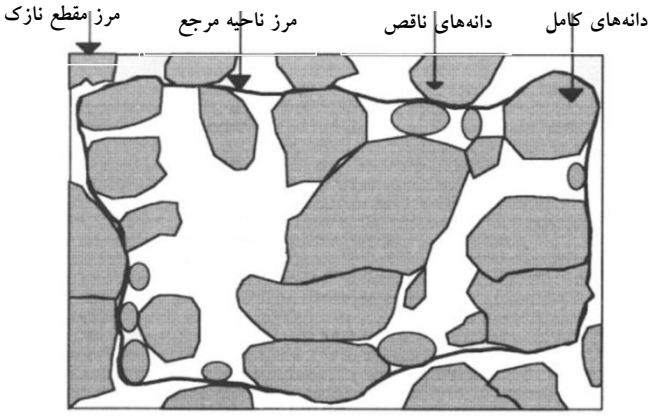
ردیف	دامنه	وزن(i)
۱	$۰<\theta_{DMAX}\leq۱۰$	۱
۲	$۱۰<\theta_{DMAX}\leq۲۰$	۲
۳	$۲۰<\theta_{DMAX}\leq۳۰$	۳
٤	$۳۰<\theta_{DMAX}\leq٤۰$	٤
٥	$٤۰<\theta_{DMAX}\leq٥۰$	٥
٦	$٥۰<\theta_{DMAX}\leq٦۰$	٦
۷	$٦۰<\theta_{DMAX}\leq۷۰$	۷
۸	$۷۰<\theta_{DMAX}\leq۸۰$	۸
۹	$۸۰<\theta_{DMAX}\leq۹۰$	۹

برای محاسبهٔ ضریب بافت از مقاطع تهیه شده در زیر میکروسکوپ عکس‌برداری می‌شود. پس از رقومی شدن عکس‌ها ابتدا یک محدوده مرجع[4] یا محدوده دید روی مقاطع مشخص

4. Reference Boundary

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

می‌شود. این محدوده شامل تمامی دانه‌های کامل قابل‌مشاهده در عکس است از این‌رو، دانه‌های ناقص موجود در حاشیه عکس در نظر گرفته نمی‌شوند (شکل ۲).



شکل ۲. شمای کلی مقطع نازک برای محاسبه ضریب بافت [۸]

۱۰. شاخص قفل‌شدگی (به هم چسبیدگی)[5]

این شاخص در سال ۱۹۷۳ برای اولین بار توسط دریر[6] ارائه شد. این شاخص به‌منظور بیان میزان پیچیدگی رابطه دانه–دانه در ساخت و بافت سنگ‌ها پیشنهاد شده است. این پارامتر میزان مساحت دانه و بخشی از مرز دانه را که با دانه مجاور در تماس است را با هم مقایسه می‌کند. در مجموع شاخص قفل‌شدگی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$g = \frac{1}{n}\sum\frac{Lpi}{\sqrt{Ai}} \qquad (۷)$$

که در آن N تعداد دانه‌ها، Lpi میزانی از محیط دانه که با دانه‌های مجاور در تماس است و Ai مساحت دانه مورد نظر است.

5. Index of interlocking
6. Dreyer

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

۱۱.شاخص یک‌نواختی اندازه ذرات[7]

این شاخص نیز برای اولین بار توسط دریبر در سال ۱۹۷۳ ارائه شده است. شاخص یکنواختی نشان‌دهنده توزیع دانه‌بندی ذرات در بافت سنگ است. میزان این شاخص با استفاده از رابطه زیر قابل‌محاسبه است [۸]:

$$t=\frac{Aavg}{\sqrt{\sum(Ai-Aavg)^2}} \quad (۸)$$

که در آن A_i سطح هر دانه و A_{avg} میانگین سطح دانه‌هاست.

بررسی‌های آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر، برای بررسی مشخصات بافتی، از معادن سنگ ساختمانی کربناته در استان‌های همدان و کردستان، بازدید شد. سپس از بخش تیپیک سنگ‌های بررسی شده مقاطع نازک تهیه شد. پس از انجام مراحل مذکور از مقاطع نازک در زیر میکروسکوپ، عکس‌برداری شد. سپس عکس‌های تهیه شده وارد نرم‌افزار AtuoCAD شده و رقومی شدند. درنهایت محیط، مساحت، قطر بزرگ و قطر کوچک هر دانه محاسبه شد. با توجه به محاسبات آماری انجام شده، میانگین پارامترهای بافتی هر نمونه سنگ در جداول ۲ و ۳ آمده است. قطر و محیط برحسب میلی‌متر و مساحت بر حسب میلی‌متر مربع است.

جدول ۲. میانگین اطلاعات به‌دست آمده از مقاطع

نام سنگ	مساحت دانه (mm^2)	محیط دانه (mm)	قطر بزرگ (mm)	قطر کوچک (mm)	آهنگ برش با سیم برش (m2/h)	آهنگ حفاری با راسول (m/h)
کریستال	۱۳٤/۰۲	٤٤/۸۲	۱٤/٦٦	۸/٤٥	٦/۲	۳
شانوره ۲	۱۷۳/٥۱	٥۷/۱۲	۱۸/۹۲	۹/۷۷	٥	۲/۲
قصلان	۲۳/۲۸	۲۰/٥۱	۷/۱٦	٤/۲۹	–	٤
ابراهیم عطار ۱	۲۳/٥۸	۹٤/٥۷	۸/۸۹	۳/۹۷	۳/۷	۲/٥
پشت باسکول	٦۲/۳۱	۳۰/۲	۱۰/۳	٦/۷	٤/٦	–

7. Index of grain size homogeneity

توت خشکه	۲۱/۱۱	۲۱/۱٤	۷	٤/۱	٤/۳	–
قاپاق تپه	۷٤/۷۸	٤۱/۹۸	۱۳/۵۲	٦/۷	۳/۹	۲/۸
ویهج ۱	۱۷۳/۵۱	۵۷/۱۲	۱۸/۹۲	۹/۷۷	٦	۲/٦
سه نثار ۲	۲۱/۱۱	۲۱/۱٤	۷	٤/۱	۳/٦	–
قلی آباد	۵۲/۹۷	۳۵/۲۹	۱۱/۰۳	۵/۳۹	–	۳/۵

جدول ۳. مشخصات بافتی نمونه سنگ‌های بررسی شده

نام سنگ	AR	D*equi*	C	SF	t	G	AW	N0	N1	FF0	AR1	AF1	TC
کریستال	۱/۹	۱۲/۲	۱٦/٦۹	۰/۷۷	۰/۷٤	٤/۰۷	۰/٦٦	۲	۲	۰/۸٤	۲/٦۱	۱۵	۷/۲۸
شانوره ۲	۲	۱٤/۵۷	۱۹/۳٦	۰/٦۸	۱/۲	٤/۳۸	۰/۵	۲	۲	۰/۷۱	۲/٦٤	۱۰	٦/۹۵
قصلان	۱/۸۵	۵/۲۷	۱۹/٤۹	۰/٦٤	۰/۳۲	٤/۳۹	۰/٦	۲٦	۱۳	۰/٦۹	۲/٦٤	۰/٦٤	۰/۹۱
ابراهیم عطار	۲/۳۲	۵/۸۵	۲۰/٦٤	۰/٦۲	۱/٤۲	٤/۵۳	۰/۱۹	۲	۲	۰/٦۸	۲/۹۲	۱۵	٤/۳
پشت باسکول	۱/٦٤	۸/۲	۱۸/۵۷	۰/۷۳	۰/٤	٤/۱٦	۰/۳۱	۵	۲	۰/۷٦	۲/٤۸	۷	۱/۸۳
توت خشکه	۱/۷۵	۵/۱۹	۲۲/۸٦	۰/٦۱	۰/۲۵	٤/٦۹	۰/٤	۱۰	۲۳	۰/٦۸	۲/۲۳	۱	۰/۸
قاپاق تپه	۲/۰٦	۹/۳۲	۲۵/۹۵	۰/۵۷	۰/۵	٤/۹٦	۰/٦۳	۵	٦	۰/۷	۲/۵	۲	۲/۱۲
ویهج ۱	۲	۱٤/۵۷	۱۹/۳٦	۰/٦۸	۱/۲	٤/۳۸	۰/۵	۲	۲	۰/۷۱	۲/٦٤	۱۰	٦/۹۵
سه نثار ۲	۱/۷۵	۵/۱۹	۲۲/۸٦	۰/٦۱	۰/۲۵	٤/٦۹	۰/٤	۱۰	۲۳	۰/٦۸	۲/۲۳	۱	۰/۸
قلی آباد	۲/۲۸	۷/۸٤	۲۵/۲۸	۰/۵٤	۰/٤۳	٤/۹٦	۰/٦۹	۱۱	۸	۰/٦۲	۳/۳۷	۱/۱٤	۱/۷٦

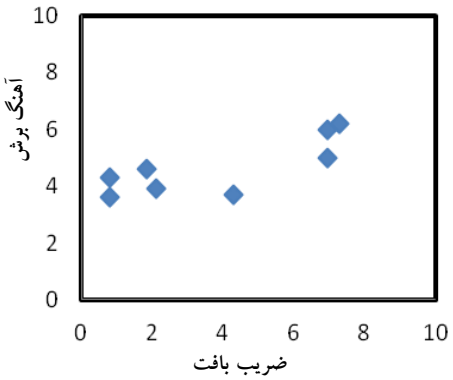
پژوهش‌های آماری

۱. برازش ساده برای آهنگ برش

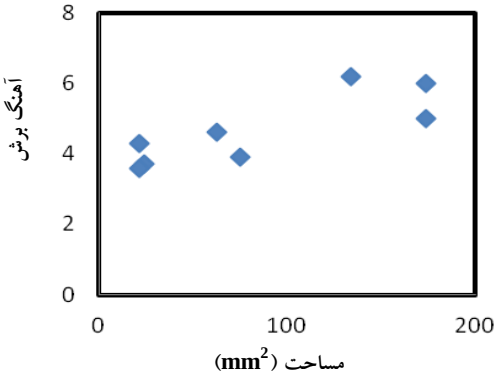
در این بخش رابطهٔ بین ویژگی‌های بافتی و آهنگ برش تجزیه و تحلیل می‌شود. در شکل‌های ۳ تا ۱۱ ارتباط این ویژگی‌های بافتی با آهنگ برش به‌طور جداگانه نشان داده شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

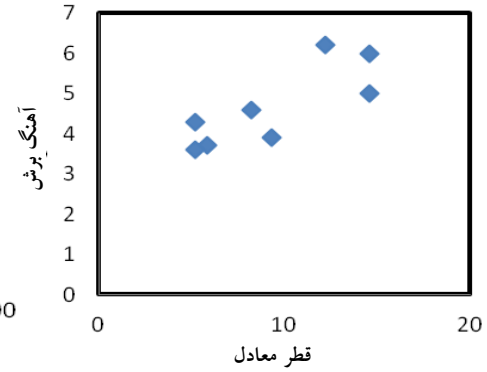
است. در جدول ٤ نیز نتایج حاصل از برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی سنگ و آهنگ برش درج شده است. چنان‌که در این جدول نشان داده شده است، تمام مشخصات بافتی ارتباط خوبی با آهنگ برش ندارند. برای بیش‌تر کردن ضریب هم‌بستگی، ارتباط بین این پارامترها و آهنگ برش، از برازش چند متغیره استفاده شد.



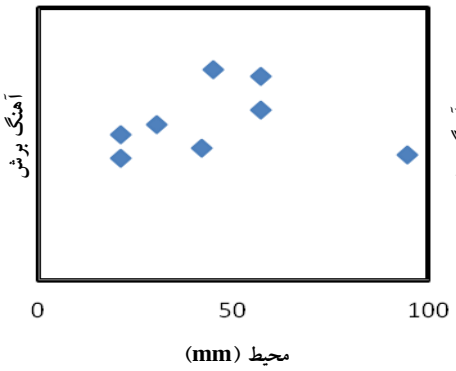
شکل ۳. ارتباط بین ضریب بافت و آهنگ برش



شکل ٤. ارتباط بین مساحت دانه‌ها و آهنگ برش



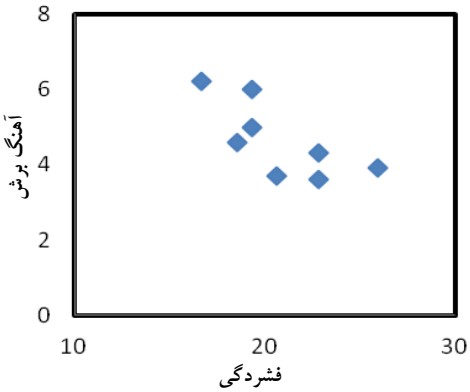
شکل ۵. ارتباط بین قطر معادل و آهنگ برش



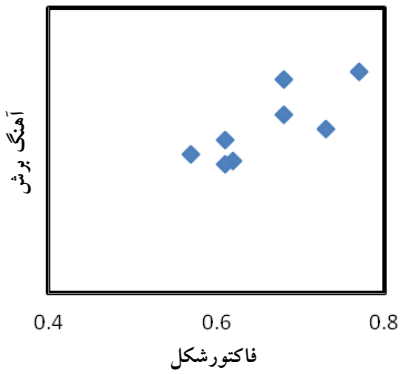
شکل ٦. ارتباط بین محیط دانه‌ها و آهنگ برش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

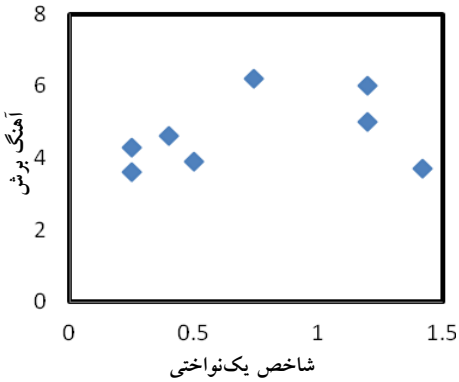
شکل ۷. ارتباط بین نسبت وضعیت دانه‌ها و آهنگ برش



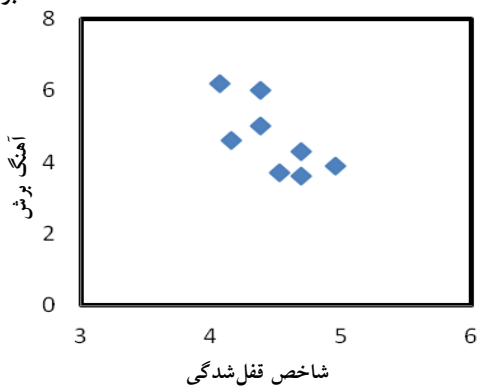
شکل ۸. ارتباط بین فشردگی و آهنگ برش



شکل ۹. ارتباط بین فاکتورشکل و آهنگ برش



شکل ۱۰. ارتباط بین شاخص یک‌نواختی و آهنگ برش



شکل ۱۱. ارتباط بین شاخص قفل‌شدگی و آهنگ برش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

جدول ٤. نتایج حاصل از برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی سنگ و آهنگ برش

	مدل	ضریب همبستگی	ضریب تعیین
رابطهٔ ۱	PR = 0.099 (TC^2) − 0. 539 TC + 4.54	۰/۸۸	۰/۷۷
رابطهٔ ۲	PR = 3.651$e^{0.0026\,A}$	۰/۸۳	۰/٦۹
رابطهٔ ۳	PR = 3.0598$e^{0.042\,Dequi}$	۰/۸۱	۰/٦٦
رابطهٔ ٤	PR =− 0.0012$(Lp^2) + 0.1359\,Lp + 1.545$	۰/۷۳	۰/٥٤
رابطهٔ ٥	PR = − 11.25$(AR^2) + 43.97\,AR - 37.81$	۰/٥٥	۰/۳۱
رابطهٔ ٦	PR = 0.0388$(C^2) - 1.9068\,C + 27.251$	۰/۸	۰/٦٥
رابطهٔ ۷	PR = 0.9224 $e^{2.43\,SF}$	۰/۷۹	۰/٦۲۷
رابطهٔ ۸	PR = 1.7927$(g^2) - 18.57\,g + 51.752$	۰/۷۳	۰/٥۳۸
رابطهٔ ۹	PR = − 5.691 $(t^2) + 9.8728\,t + 1.5608$	۰/۷۷	۰/٦

۲. برازش چند متغیره برای آهنگ برش

برای بهبود و بالا بردن ضریب هم‌بستگی رابطه‌های به‌دست آمده از برازش ساده، برازش چندمتغیره برای پارامترهایی که ضریب هم‌بستگی بالای ۰/۵را در برازش ساده داشتند انجام شد. نتایج تحلیل برازش چند متغیره در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج برازش چندمتغیره نشان می‌دهد که مدل ۱۲ با ضریب هم‌بستگی ۰/۹۳ شامل ضریب بافت و محیط دانه، بهترین مدل برای پیش‌بینی آهنگ برش بر حسب پارامترهای بافتی است (جدول ٦).این مدل، دارای بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی با تعداد متغیر کم‌تر است.

جدول ۵. نتایج برازش چندمتغیره بین مشخصات بافتی و آهنگ برش

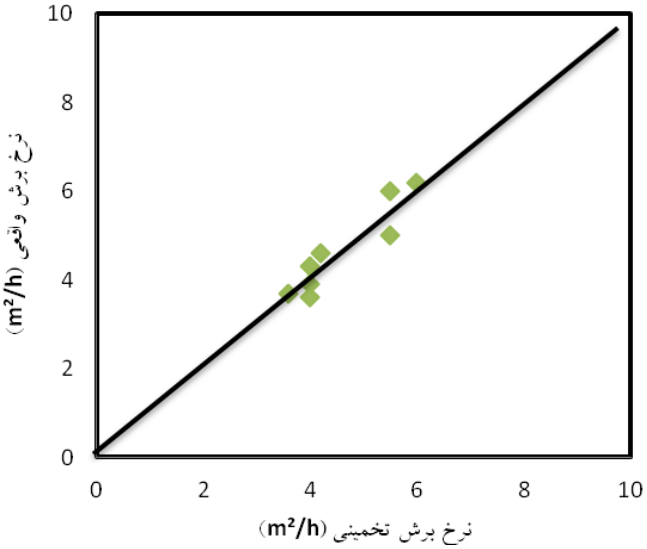
	مدل	ضریب هم‌بستگی	ضریب تعیین
رابطهٔ ۱۰	PR= 0.008 A + 0.108 TC + 3.519	۰/۸٤	۰/۷
رابطهٔ ۱۱	PR= 0.122 Dequi + 0.132 TC + 3.006	۰/۸۳	۰/٦۸
رابطهٔ ۱۲	PR= - 0.025 Lp + 0.398 TC + 4.248	۰/۹۳	۰/۸٦
رابطهٔ ۱۳	PR= - 0.126 C + 0.189 TC + 6.55	۰/۸٤	۰/۷
رابطهٔ ۱٤	PR= 7.242 SF + 0.176 TC – 0.791	۰/۸۸	۰/۷۸
رابطهٔ ۱٥	PR= – 1.315 g + 0.198 TC + 9.787	۰/۸٥	۰/۷۲
رابطهٔ ۱٦	PR= – 1.624 t + 0.485 TC + 3.99	۰/۹۲	۰/۸٦
رابطهٔ ۱۷	PR= – 0.656 Dequi + 0.048 A+ 0.099 TC + 6.32	۰/۸٦	۰/۷٤
رابطهٔ ۱۸	PR= – 0.027 Lp – 0.002 A+ 0.459 TC + 4.337	۰/۹۳	۰/۸٦
رابطهٔ ۱۹	PR= – 0.156 C + 0.01 A – 0.04 TC + 7.172	۰/۹	۰/۸۱

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

جدول ٦. نتایج و ضرایب برازش دومتغیره برای ضریب بافت و محیط

مدل		ضرایب برازش	خطای معیار	T	F	F انتخاب شده از جدول
رابطهٔ (۱۲)	عدد ثابت	٤/٢٤٨	۰/۳۵۸	۱۱/۸۷	۱۵/۵۳	۵/۷۹
	TC	۰/۳۹۸	۰/۰۷۲	۵/۵٦		
	Lp	-۰/۰۲۵	۰/۰۰۸	-۲/۹۱		

در این برازش، با توجه به بزرگ‌تر بودن مقدار F به‌دست آمده از مدل (۱۵/۵۳)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (۵/۷۹)، حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نیست. شکل ۱۲ نمودار صحت سنجی بین ضریب بافت و محیط با آهنگ برش را نشان می‌دهد. فاصلهٔ نقاط از خط نیمساز (۱:۱) بیانگر خطای آهنگ برش تخمینی است.



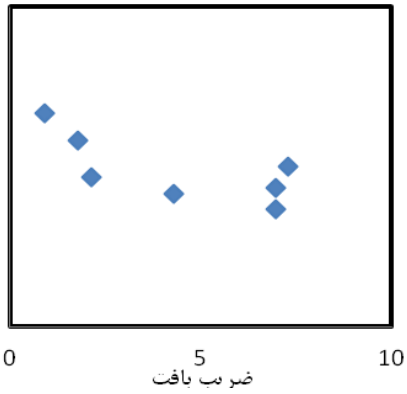
شکل ۱۲. مقایسه بین آهنگ برش واقعی و تخمینی

۳. برازش ساده برای آهنگ حفاری

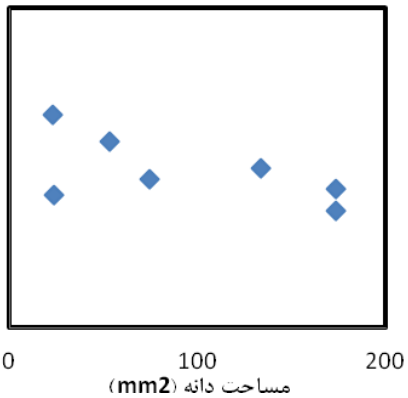
در این بخش رابطهٔ بین ویژگی‌های بافتی و آهنگ حفاری تجزیه و تحلیل می‌شود. در شکل‌های ۱۳ تا ۲۱ ارتباط این ویژگی‌های بافتی با آهنگ حفاری به‌طور جداگانه نشان داده شده است. در جدول ۷ نیز نتایج حاصل از برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی سنگ و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

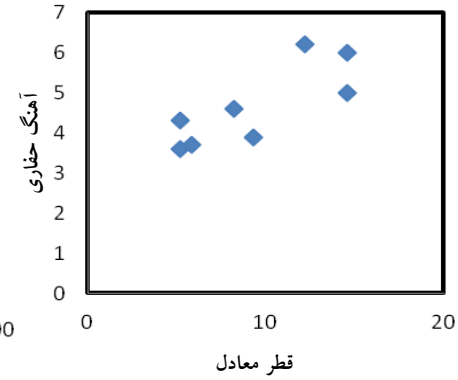
آهنگ حفاری درج شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود تمام مشخصات بافتی ارتباط خوبی با آهنگ حفاری ندارند. از میان مشخصات بافتی بررسی شده، ضریب بافت، محیط، قطر معادل، وضعیت دانه و شاخص یک‌نواختی ضریب هم‌بستگی نسبتاً مناسبی با آهنگ حفاری دارند. به‌منظور بالا بردن ضریب هم‌بستگی، ارتباط بین این پارامترها و آهنگ حفاری، از برازش چند متغیره استفاده شد.



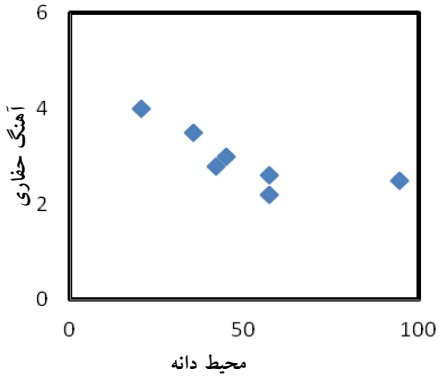
شکل ۱۳. ارتباط بین ضریب بافت و آهنگ حفاری



شکل ۱٤. ارتباط بین مساحت و آهنگ حفاری

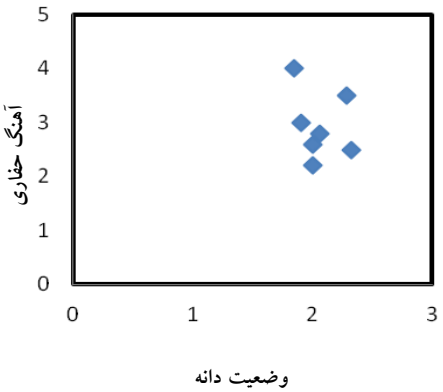


شکل ۱۵. ارتباط بین قطر معادل و آهنگ حفاری

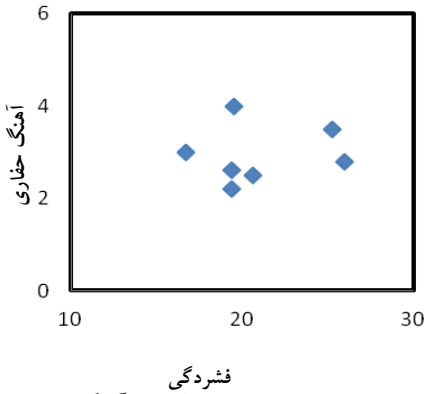


شکل ۱٦.ارتباط بین محیط دانه‌ها و آهنگ حفاری

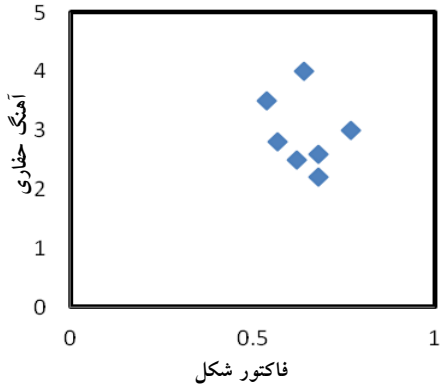
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]



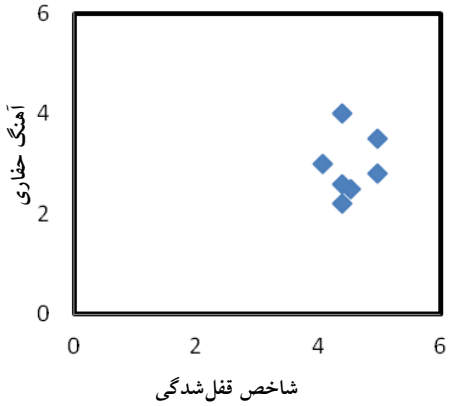
شکل ۱۷. ارتباط بین وضعیت‌دانه‌ها و آهنگ حفاری



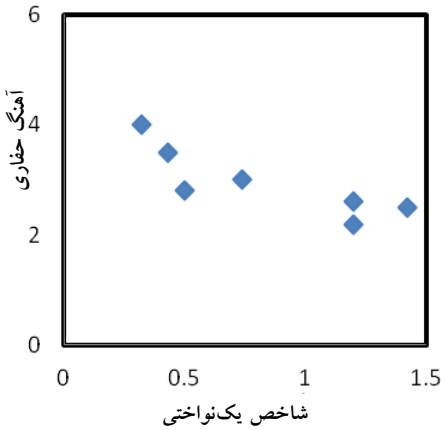
شکل ۱۸. ارتباط بین فشردگی و آهنگ حفاری



شکل ۱۹. ارتباط بین فاکتور شکل و آهنگ حفاری



شکل ۲۰. ارتباط بین شاخص قفل‌شدگی و آهنگ حفاری



شکل ۲۱. ارتباط بین شاخص یک‌نواختی و آهنگ حفاری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

٤. برازش چند متغیره برای آهنگ حفاری

برای بهبود و بالا بردن ضریب هم‌بستگی رابطه‌های به‌دست آمده از رگرسیون ساده، رگرسیون چند متغیره برای پارامترهایی که ضریب هم‌بستگی بیش از ۰/۵ را در برازش ساده داشتند انجام شد. نتایج آنالیز رگرسیون چند متغیره در جدول ۸ ارائه شده است. برای کنترل اعتبار کلی مدل یا به‌عبارت دیگر برای کنترل معنی‌داری آن از آزمون F و برای کنترل معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل از آزمون t و سطح معنی‌داری آن استفاده شده است. نتایج آزمون‌های F و t در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۷. نتایج حاصل از برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی سنگ و آهنگ حفاری

	مدل	ضریب هم‌بستگی (R)	ضریب تعیین (R^2)
رابطهٔ (۲۰)	Pd = 0.097 $(TC)^2 - 0.994\,TC + 4.783$	۰/۹۱	۰/۸۳۱
رابطهٔ (۲۱)	Pd = —0.0056 A+3.469	۰/۵۹۸	۰/۳۵۸
رابطهٔ (۲۲)	Pd = 0.0006 $(Lp)^2 - 0.0907\,Lp + 5.7135$	۰/۹۵	۰/۹۰۸
رابطهٔ (۲۳)	Pd = 17.188 $(AR)^2 - 72.949\,AR + 79.801$	۰/٦۷	۰/٤٥۲
رابطهٔ (۲٤)	Pd = —0.0038 $Dequi^2 - 0.023\,Dequi + 3.597$	۰/٦۳	۰/۳۹٥
رابطهٔ (۲٥)	Pd = 0.0099 $C^2 - 0.405C + 7.0017$	۰/۱۹٦	۰/۰۳۸
رابطهٔ (۲٦)	Pd = 26.699 $SF^2 - 36.896\,SF + 15.493$	۰/۳٦	۰/۱۳
رابطهٔ (۲۷)	Pd = 1.987 $T^2 - 4.618\,T + 5.078$	۰/۹	۰/۸۲۷
رابطهٔ (۲۸)	Pd = 1.408 $G^2 - 12.625\,G + 31.1$	۰/۲٥	۰/۰٦۱٥

جدول ۸. نتایج برازش چند متغیره بین مشخصات بافتی و آهنگ حفاری

	مدل	ضریب هم‌بستگی	ضریب تعیین
رابطهٔ (۲۹)	Pd = – 0.014 Dequi – 0.146 TC +3.711	۰/۷۲	۰/٥۲
رابطهٔ (۳۰)	Pd = – 0.014 Lp – 0.106 TC +4.127	۰/۸۷	۰/۷٥
رابطهٔ (۳۱)	Pd = – 1.428 AR – 0.182 TC +6.67	۰/۸۲	۰/٦۸

رابطهٔ (۳۲)	Pd = – 0.95 t – 0.055 TC + 3.968	۰/۸٦	۰/۷٤
رابطهٔ (۳۳)	Pd = – 0.024 Lp – 0.157 Dequi + 0.117TC + 5.218	۰/۹۷	۰/۹۳
رابطهٔ (۳٤)	Pd = – 1.26 t – 0.097 Dequi + 0.09 TC + 4.55	۰/۹۱	۰/۸۳
رابطهٔ (۳۵)	Pd = – 0.38 t – 0.009 Lp – 0.08 TC + 4.08	۰/۸۷	۰/۷۵
رابطهٔ (۳٦)	Pd = – 0.23 AR – 0.013 Lp – 0.115 TC + 4.56	۰/۸۷	۰/۷۵
رابطهٔ (۳۷)	Pd = – 0.16 AR – 0.018 Lp – 0.09 Dequi + 5.1	۰/۹۵	۰/۸۹
رابطهٔ (۳۸)	Pd = 0.66 t – 0.03 Lp – 0.116Dequi + 5.04	۰/۹۵٤	۰/۹۱
رابطهٔ (۳۹)	Pd = – 1.178 t + 0.09 AR – 0.001 Lp + 3.76	۰/۸٤٤	۰/۷۱۳
رابطهٔ (٤۰)	Pd = – 0.03 Lp + 0.658 AR – 0.171 Dequi + 0.163 TC +4.066	۰/۹۷٤	۰/۹٤۸

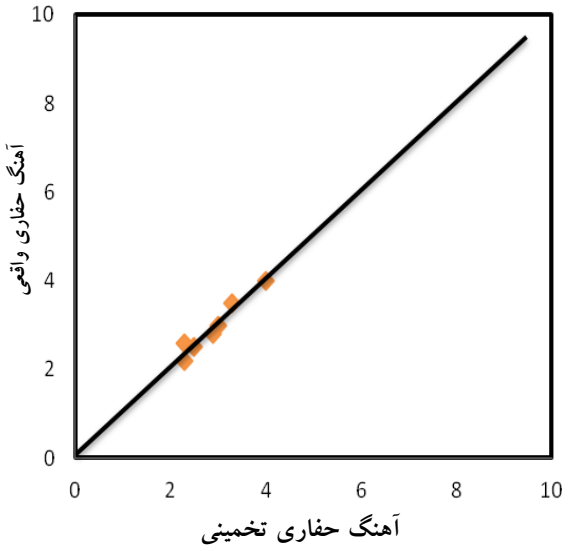
نتایج برازش چند متغیره نشان داد که مدل ۳۳ با ضریب هم‌بستگی ۰/۹۷ شامل ضریب بافت، محیط دانه و قطر معادل بهترین مدل برای پیش‌بینی آهنگ حفاری بر حسب پارامترهای بافتی است (جدول ۹). این مدل، دارای بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی با تعداد متغیر کم‌تر است.

در این برازش، با توجه به بزرگ‌تر بودن مقدار F به‌دست آمده از مدل (۱٤/۵۹)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (۹/۲۸)، حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نیست. شکل ۲۲ نمودار صحت سنجی بین ضریب بافت، محیط و قطر معادل با آهنگ حفاری را نشان می‌دهد. فاصلهٔ نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیان‌گر خطای آهنگ حفاری تخمینی است.

جدول ۹. نتایج و ضرایب برازش چندمتغیره برای ضریب بافت، محیط و قطر معادل

مدل		ضرایب برازش	خطای معیار	T	F	F انتخاب شده از جدول
رابطهٔ (۳۳)	عدد ثابت	۵/۲۱۸	۰/٤۳۱	۱۲/۱	۱٤/۵۹	۹/۲۸
	TC	۰/۱۱۷	۰/۰۸٤	۱/۳۹		
	Dequi	–۰/۱۵۷	۰/۰۵۳	–۲/۹۵		
	Lp	–۰/۰۲٤	۰/۰۰٦	–٤/٤۱		

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]



شکل ۲۲. مقایسه بین آهنگ حفاری واقعی و تخمینی

نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌منظور پیش‌بینی آهنگ حفاری و برش سیم الماسه، ۸ نمونه سنگ ساختمانی کربناته از معادن ایران شامل سنگ‌های مرمر، مرمریت و کریستال تهیه و برای تعیین روابط بین مشخصات بافتی با قابلیت حفاری و برش، در ابتدا ارتباط بین پارامترهای ذکر شده با آهنگ حفاری و برش در برازش تک متغیره تعیین شد. سپس برای دست‌یابی به ضریب هم‌بستگی بیش‌تر از برازش چند متغیره استفاده شده است. مهم‌ترین نتایج تحقیق عبارتند از:

۱. در برازش تک متغیره، ضریب بافت و مساحت دانه‌ها با آهنگ برش، بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی را دارند.

۲. در برازش چند متغیره، آهنگ برش با ضریب بافت و محیط دانه دارای بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی (۰/۹۳) است و رابطهٔ $PR= - 0.025\ Lp + 0.398\ TC + 4.248$ به‌عنوان رابطهٔ نهایی بین مشخصات بافتی و قابلیت برش سیم برش الماسه پیشنهاد می‌شود.

۳. در برازش تک متغیره، ضریب بافت و محیط دانه‌ها با آهنگ حفاری، بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی را دارند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

٤. در برازش چند متغیره، آهنگ حفاری با ضریب بافت، قطر معادل و محیط دارای بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی (۰/۹۷) است و رابطهٔ $Pd = -0.024\ Lp - 0.157\ Dequi + 0.117TC + 5.218$ به‌عنوان رابطهٔ نهایی بین مشخصات بافتی و قابلیت حفاری راسل پیشنهاد می‌شود.

منابع

۱. اصانلو م.، "روش‌های حفاری"، مرکز نشر صدرا (۱۳۸۲).

۲. حسینی س. ه.، پوررحیمیان ی.، آقابابایی ح.، "پیشنهاد سیستم طبقه‌بندی جدید جهت پیش‌بینی سرعت حفاری در معادن روباز، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۸٦).

۳. عطائی م.، "استخراج سنگ‌های ساختمانی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود (۱۳۸۷).

٤. فاطمی س. ا. ا.، پروین ا.، "بررسی فنی و اقتصادی استفاده از سیم برش الماسه به‌منظور استخراج گرانیت برای اولین بار در ایران در معدن گرانیت گزیک، بیرجند"، کنفرانس مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۳).

۵. قیصری ن.، "پیش‌بینی عملکرد سیم برش الماسه با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود (۱۳۸۹).

6. Ataei M., Mikaeil R., Sereshki F., Ghaysari N., "Predicting the Production Rate of Diamond Wire Saw Using Statistical Analysis", Arabian Journal of Geosciences, Vol. 5, No. 6 (2012) 1289-1295.

7. Atila, Ozturk C. A., Nasuf E., Bilgin N., "The assessment of rock cutability, and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient", The journal of the south African institute of mining and Metallurgy, August (2004) 397-402.

8. Dreyer W., "The Science of Rock Mechanics. Part I. The Strength Properties of Rocks, 2nd ed. Series on Rock and Soil Mechanics", vol. 1 (1971/73), No. 2. Trans. Tech. Publications, Clausthal (1973) 500.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]

9. Ersoy A., Waller M. D, "Textural characterization of rocks", of Engineering Geology, vol 39, Issues 3-4 (1995) 123-136.

10. Ghaysari N., Ataei M., Sereshki F., Mikaeil R., "Prediction of performance of diamond wire saw with respect to texture characteristics of rock", Archives of Mining Science, Vol. 57, No. 4 (2012) 839-852.

11. Hoseinie S. H, Aghababaei H, Pourrahimian Y, "Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDi)", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 45, Issue 1 (January 2008) 1-10.

12. Howarth D. F., Rowlands J. C., "Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties", J. of Rock Mech. Rock Eng., 20 (1987) 57-85.

13. Lindqvist J. E., Akesson U., Malaga K., "Microstructure and functional properties of rock materials, Materials Characterization", Volume 58, Issues 11-12, (2007) 1183-1188.

14. Ozcelic Y., Polat E., Bayram F., Ay A. M., "Investigation of the effects of textural properties on marble cutting with diamond wire", Int. J. Rock Mech. Min. Sci, Vol. 41, No. 3 (2004) 228-234.

15. Pikryl P., "Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients", Limitations and possible source of misinterpretations, Engineering Geology 87 (2006) 149-162.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.4.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.103]