

## ارائه رابطه‌های آماری برای پیش بینی قابلیت برش دیسکی

### سنگ‌های ساختمانی

رضا میکائیل<sup>۱</sup>، محمد عطایی<sup>۲\*</sup>، رضا یوسفی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود [Reza.Mikaeil@gmail.com](mailto:Reza.Mikaeil@gmail.com)

۲- استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود [ataei@shahroodut.ac.ir](mailto:ataei@shahroodut.ac.ir)

۳- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف [yousefi@sharif.edu](mailto:yousefi@sharif.edu)

(دریافت 21 آذر 1389، پذیرش 29 خرداد 1390)

#### چکیده

تخمین قابلیت برش سنگ و تعیین پارامترهای مؤثر در آن در تخمین هزینه‌ها و طراحی کارخانجات سنگ‌بری نقش مهمی دارد. شناخت کامل سنگ‌ها و ارزیابی توانایی اجرایی دستگاه‌های برش، طراحان و برنامه‌ریزان تولید را به سمت بهبود سرعت فرآوری و افزایش تولید سوق می‌دهد. بنابراین برای دستیابی به یک طراحی و برنامه‌ریزی دقیق در کارخانجات فرآوری، پیش‌بینی قابلیت برش سنگ و تعیین پارامترهای مؤثر در آن امری مهم و ضروری است. در این مقاله ارتباط میان مشخصات سنگ و آهنگ برش با کمک تحلیل‌های آماری بررسی شده است. بدین منظور هفده نوع سنگ ساختمانی در کارخانه‌های فرآوری مطالعه شد. در مرحله اول پس از برداشت و ثبت آهنگ برش هر نمونه سنگ، بلوک-های سنگی متعلق به هر نمونه سنگ، بعد از آماده‌سازی، برای انجام مطالعات آزمایشگاهی به آزمایشگاه مکانیک سنگ ارسال شد. سپس چهار مشخصه مهم از سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوری، سختی موس، فاکتور ساینده‌گی شیمازک و مدول الاستیسیته در آزمایشگاه تعیین شد. در مرحله بعد مطالعات آماری بر روی داده‌های موجود انجام شد. با استفاده از مطالعات آماری، روند تغییرات آهنگ برش با مشخصات سنگ بررسی شد و پنج رابطه برای پیش‌بینی آهنگ برش با کمک نرم افزار آماری SPSS ارائه شد. ضرایب هر یک از متغیرها در رابطه با توجه به آزمون‌های آماری و منطق علمی حاکم بر فرایند برش ارزیابی و در نهایت از میان رابطه‌ها بهترین رابطه برای پیش‌بینی آهنگ برش انتخاب شد. با استفاده از رابطه پیشنهادی می‌توان قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی را با دقت بالایی پیش‌بینی کرد.

#### کلمات کلیدی

آهنگ برش، سنگ‌های ساختمانی، رابطه‌های آماری، نرم افزار SPSS.

\* نویسنده مسئول مکاتبات

## ۱- مقدمه

امروزه دیسک‌های برش‌دهنده سنگ در کارخانه‌های تولید سنگ‌های ساختمانی به‌طور قابل‌توجهی استفاده می‌شوند. شناخت کامل سنگ‌های ساختمانی و ارزیابی توانایی اجرایی دستگاه‌های برش در کارخانه‌های فرآوری، طراحان و برنامه‌ریزان تولید را به سمت 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 بالا بردن بازدهی و کیفیت سنگ‌های فرآوری شده کمک کند. تاکنون مطالعات خوبی در مقیاس‌های مختلف صنعتی و آزمایشگاهی در زمینه قابلیت برش سنگ‌ها انجام شده است [1-45]. مطالعات انجام شده در این بخش شامل ارائه سیستم‌های طبقه‌بندی و روابط آماری است. در این میان برخی از محققین به بررسی پارامترهای سنگ و برخی هم به بررسی مشخصات طرح برش و برخی دیگر نیز به بررسی پارامترهای عملیاتی در زمینه فرایند برش پرداختند. از میان تمامی عوامل مؤثر در فرایند برش سنگ، مشخصات ژئومکانیک سنگ از مهمترین پارامترهایی بوده‌اند که در حدود بیش از نیمی از مطالعات بررسی شدند. یکی از مهمترین مواردی که در بحث تحلیل و ارزیابی معادلات آماری باید به آن توجه کرد، وجود ضرایب منطقی یا به عبارت دیگر پیروی معادله از طبیعت ذاتی و علمی موضوع می‌باشد. متأسفانه به این مسئله در برخی از روابط ارائه‌شده در زمینه قابلیت برش سنگ، توجه نشده است. برای مثال در رابطه زیر آهنگ برش با افزایش مقدار مقاومت ضربه‌ای و سختی چکش اشمیت افزایش یافته و با کاهش مقاومت ساینده‌گی لوس آنجلس کاهش می‌یابد [41].

$$P_h = -38.8 - 0.02UCS - 0.02BTS + 0.7SHV - 4.9I_s + 1.2ISI - 0.08LA - 8.1V_p \quad (1)$$

یا در رابطه 2 مقدار سایش ویژه با افزایش مقدار سختی چکش اشمیت کاهش می‌یابد [30].

$$w = 0.000003SE_{cut} + 0.000039SC + 0.00012BS - 0.0001SHV \quad (2)$$

یا در رابطه 3 مقدار انرژی ویژه برش با افزایش مقدار مقاومت

فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد [32].

$$SE_{cut} = -1.000195 + 0.588CAI + 0.439MH - 0.0127UCS \quad (3)$$

در روابط بالا  $CAI$ : شاخص ساینده‌گی سورشار،  $MH$ : سختی موس،  $SE_{cut}$ : انرژی ویژه برش ( $J/mm^3$ )،  $w$ : نرخ سایش ( $gr/m^3$ )،  $SC$ : مقدار سیلیس (%)،  $BS$ : مقاومت خمشی ( $MPa$ )،  $SHV$ : عدد چکش اشمیت،  $V_p$ : سرعت موج  $p$  ( $Km/s$ )،  $LA$ : مقاومت ساینده‌گی لوس آنجلس (%)،  $ISI$ : مقاومت ضربه‌ای (%)،  $BTS$ : مقاومت کششی ( $MPa$ ) و  $P_h$  آهنگ برش سنگ می‌باشند.

به هر حال آنچه روشن است با افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ و افزایش سختی و ساینده‌گی قابلیت برش سنگ کاهش می‌یابد که متأسفانه در معادلات بالا عکس این مطلب نشان داده شده است. یکی دیگر از موارد مهم در ارائه یک رابطه جامع، انتخاب پارامترهای رابطه با توجه به عدم هم پوشانی میان پارامترهای رابطه است. لازم است که رابطه ارائه شده برای پیش‌بینی قابلیت برش بتواند علاوه بر پوشش پارامترهای مهم، - ضرایب منطقی (ضرایبی که به درستی روند طبیعی یک فرایند را مدل سازی کند) را نیز داشته باشد.

در این مقاله سعی شد تا با استفاده از مطالعات آماری به بررسی تاثیر مشخصات سنگ بر میزان آهنگ برش پرداخته شود. برای این منظور، نخست مکانیزم برش سنگ و پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ بررسی شد و در ادامه مطالعات آزمایشگاهی (هم از تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام دادن تست‌های آزمایشگاهی) و برداشت‌های صنعتی بر روی 17 نمونه سنگ ساختمانی انجام شد. سپس روابط آماری برای پیش‌بینی آهنگ برش با توجه به مشخصات ژئومکانیکی سنگ ارائه شد. در نهایت، نتایج حاصل از این تحقیق با استفاده از آزمون‌های آماری (آزمون‌های  $t$  و  $F$ ) بررسی شد.

## 2- فرایند برش سنگ

فرایند برش سنگ یک فرایند سایشی است. به‌طوری که می‌توان برش سنگ به کمک سگمنت‌های الماسه را سایش ذرات تشکیل‌دهنده سنگ توسط عبور دانه‌های الماس روی سطح سنگ دانست. برای درک بهتر این فرایند و شرایط حاکم بر دانه الماس در حال برش، شناخت مکانیزم برش و پارامترهای مؤثر بر آن ضروری است.

## 2-1- مکانیزم برش سنگ

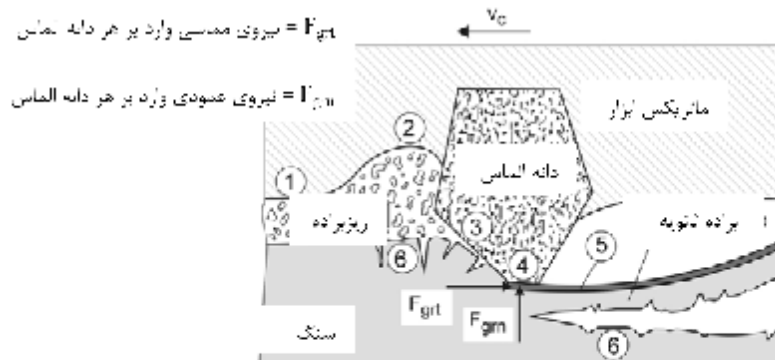
به‌طور کلی فرایند برش سنگ با استفاده از تجهیزات الماسی را

اپراتور و شرایط محیطی کار تجزیه و تحلیل کرد. از میان این پارامترها، پارامترهای عملیاتی و مشخصات طرح برش به عنوان پارامترهای قابل کنترل و یا پارامترهای وابسته و پارامترهای مربوط به مشخصات سنگ، به عنوان پارامترهای غیر قابل کنترل یا پارامترهای مستقل در فرآیند برش سنگ مطرح می‌باشند. هر کدام از این دسته پارامترها به نحو خاصی در کارایی و توان تولید فرآیند برش تأثیرگذار می‌باشند که در این میان با فرض ثابت بودن شرایط برش (شرایط دستگاه و تجهیزات برش و مهارت اپراتور)، مشخصات سنگ اهمیت زیادی در میزان آهنگ برش دارند. مشخصات سنگ یکی از پارامترهای مؤثر در فرآیند برش به خصوص در فرآیند تشکیل تراشه است. سنگ به عنوان میزبان عملیات برش، نقش حیاتی در فرآیند برش و تولید دارد. مشخصات سنگ تعیین‌کننده شرایط، کیفیت و کمیت اندرکنش میان سنگ و ماشین بوده لذا مکانیزم تشکیل براده و پیشروی ابزار را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به گستردگی مشخصات ژئومکانیکی سنگ به منظور سهولت در تجزیه و تحلیل و مطالعه این پارامترها، آن‌ها را می‌توان در سه گروه مشخصات فیزیکی، مکانیکی و مشخصات ساختاری تقسیم‌بندی کرد.

می‌توان در طی دو مرحله بیان کرد. مرحله نخست از فرآیند برش سنگ را می‌توان در نتیجه حرکت سگمنت‌های الماسی بر روی سطح برش و به دنبال آن تشکیل تراشه سنگ در نتیجه نفوذ دانه‌های الماس در داخل سنگ دانست. در طی این فرآیند، دانه الماس با خراشیدن و شکافتن سطح برش موجب تشکیل تراشه و ایجاد سطح جدید برای دانه الماس بعدی می‌شود. هنگامی که سنگ توسط ابزار الماسی تحت برش قرار می‌گیرد تعامل مکانیکی میان ابزار و سنگ، نیروهای فرآیند را ایجاد می‌کنند که به‌طور عمده ناشی از پارامترهایی مانند تغییر شکل الاستیکی و پلاستیکی در سنگ، اصطکاک میان دانه الماس و ماتریس با سنگ و تراشه‌های حاصل از برش است. این تغییرات نیرو به همراه پستی و بلندی‌های موجود در سطح قطعه کار، بی‌نظمی‌های ضخامت براده، شکسته شدن و لایه لایه شدن براده‌ها، اصطکاک بین سطوح و غیره باعث تغییر در شرایط برش می‌شود. شکل 1 نمایی از یک دانه الماس در حال برش و تعامل نیروهای موجود میان دانه الماس و سطح خراشیده شده از سنگ را نشان می‌دهد.

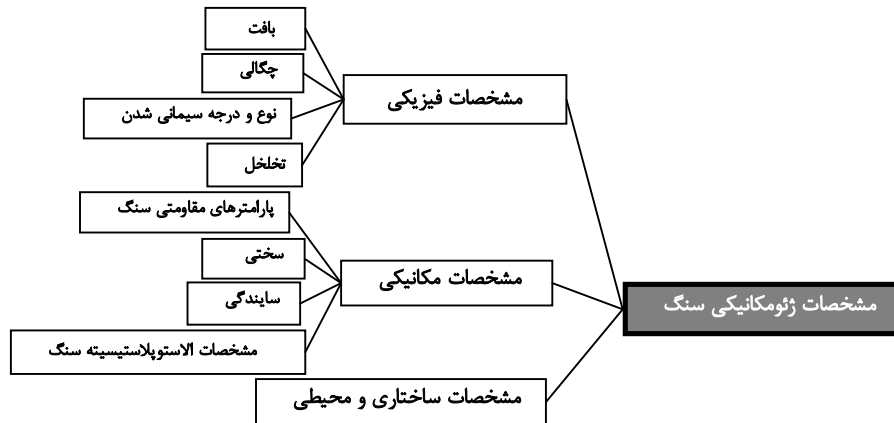
## 2-2- پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ

به‌طور کلی 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



- ۱- ناحیه اصطکاک بین براده‌ها و ماتریکس ابزار
- ۲- ناحیه اصطکاک بین ریز براده و دانه الماس
- ۳- ناحیه سایین یافته توسط ریز براده‌ها و براده‌ها
- ۴- ناحیه تغییر شکل پلاستیک
- ۵- ناحیه تشکیل براده اولیه
- ۶- ناحیه تغییر شکل پلاستیک

شکل 1- تعامل نیروهای موجود میان دانه الماسه و سطح خراشیده شده از سنگ [21]



شکل 2- پارامترهای موثر از مشخصات سنگ در فرایند برش سنگ

### الف) مقاومت فشاری تک‌محوری

این پارامتر به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مهندسی سنگ در اکثر مطالعات مهندسی استفاده شده است. این پارامتر می‌تواند نماینده بسیاری از مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ از قبیل مقاومت، چگالی، میزان هوازدگی و نیز کیفیت و نوع ماتریکس سنگ باشد. از طرفی آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری، یک آزمایش بسیار شناخته شده و قابل دسترس است که از این نظر می‌توان پارامترهای بدون کمیت مثل هوازدگی را با آن مطالعه کرد.

### ب) فاکتور سایش شیمازک

سایندگی یکی از مهم‌ترین پارامترهای سنگ از نظر قابلیت برش است. این پارامتر سرعت برش و نیز استهلاک تجهیزات برش را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی قابلیت سایندگی سنگ‌ها پیشنهاد شده است. در این میان شاخص سایش شیمازک به دلیل در نظر گرفتن مقاومت کششی، اندازه دانه‌ها و نیز میزان کوارتز محتوی نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد و به علت در نظر گرفتن ترکیب میکروسکوپی سنگ از قابلیت بالایی در ارزیابی سایندگی سنگ‌ها برخوردار است. با توجه به مطالب ذکر شده، فاکتور سایش شیمازک به عنوان شاخص کمی ارزیابی سایندگی سنگ استفاده شده است.

### ج) سختی موس

سختی یکی از مهم‌ترین پارامترهای هر کانی به شمار می‌رود که تأثیر بسیار زیادی بر سختی کل سنگ و در نهایت قابلیت برش آن دارد. از آنجایی که سختی واقعی و علمی یک سنگ از مطالعه مقطع نازک و بررسی ترکیب کانی‌شناسی سنگ به دست می‌آید

شکل 2 پارامترهای موثر در فرایند برش سنگ را نشان می‌دهد. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده، در طی این تحقیق، کلیه پارامترهای مهم مربوط به سنگ که در قابلیت برش سنگ مؤثرند به تعداد دوازده پارامتر به شرح ذیل تشخیص داده شد: (1) بافت سنگ، (2) اندازه و شکل دانه‌های سنگ، (3) میزان کوارتز محتوی، (4) نوع و کیفیت ترکیب دانه‌ها در سیمان سنگ (5) سختی، (6) سایندگی، (7) هوازدگی، (8) چگالی، (9) سختی چکش اشمیت، (10) مقاومت فشاری تک‌محوری، (11) مقاومت کششی، (12) مدول الاستیسیته.

چنانچه مشاهده می‌شود پارامترهای فوق، تمامی مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ را به خوبی پوشش می‌دهند و لذا می‌توان با استفاده از این پارامترها، به دید روشنی از قابلیت برش سنگ رسید. در مهندسی سنگ، همواره انتخاب پارامترهای مهم و ترکیب این پارامترها در کنار هم، یکی از مهم‌ترین مراحل یک تحقیق است. از طرفی همگی پارامترهای بالا مثل نوع ماتریکس سنگ دارای شاخص کمی و آزمایشگاهی نیستند. همچنین تعدادی از پارامترها با یکدیگر همپوشانی داشته و معرف برخی دیگر از پارامترها می‌باشند. با توجه به توضیحات ارائه شده، پس از بررسی‌های مختلف، 4 پارامتر، مقاومت فشاری تک‌محوری، فاکتور سایش شیمازک، سختی موس و مدول الاستیسیته به دلیل اهمیت زیاد در فرایند برش سنگ، عدم هم پوشانی و کاربرد فراوان آن‌ها در پروژه‌های مختلف معدنی (پارامترهای مذکور از جمله پارامترهای شناخته شده و مطرح می‌باشند که اکثر کاربران با نحوه آزمایش آن‌ها آشنا هستند) به عنوان مهم‌ترین مشخصات سنگ در فرایند برش، پیشنهاد و استفاده شدند.

سپس برای انجام مطالعات آزمایشگاهی و تعیین پارامترهای مورد نظر، در مجموع از هر نمونه سنگ بلوک‌های سنگی تهیه و سپس به آزمایشگاه منتقل شدند. کلیه آزمایش‌ها تحت استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ و با دقت بالا انجام داده شدند. برای بررسی و اطلاع دقیق از مشخصات کانی‌شناسی یک مقطع نازک از بخش تیپیک سنگ‌های مورد مطالعه تهیه شد. نمونه مقطع نازک تهیه شده برای مطالعه در شکل 3 نشان داده شده است. با استفاده از این مقطع، نوع و درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده، میزان کوارتز محتوی معادل برای نمونه سنگ مورد مطالعه (برای تعیین مشخصات ساینده‌گی و سختی) محاسبه می‌شود.



شکل 3- فرمت دیجیتالی مقطع نازک گرانیت سبز هرمه

بنابراین در این تحقیق مقیاس سختی موس برای ارزیابی سختی بررسی شد. از دلایل مهم استفاده از سختی موس می‌توان به شهرت و آشنایی خوب کاربران و دقت بالا به دلیل استفاده از مقطع نازک اشاره کرد.

#### د) مدول الاستیسیته

با توجه به رفتار سنگ‌ها در فرآیند شکست و تشکیل تراشه در فرایند برش، نحوه رسیدن یک سنگ به مقاومت فشاری حداکثر آن بر قابلیت برش سنگ تأثیرگذار است. الاستیسیته را می‌توان یک پارامتر مستقل دانست که رفتار خاصی در سنگ ایجاد می‌کند و گرچه از سایر مشخصات سنگ اثر می‌پذیرد با این حال اثرگذاری آن بیشتر از تأثیرپذیری آن مورد توجه قرار می‌گیرد. لذا در این تحقیق مدول به عنوان معرف رفتار الاستیسیته سنگ استفاده شده است.

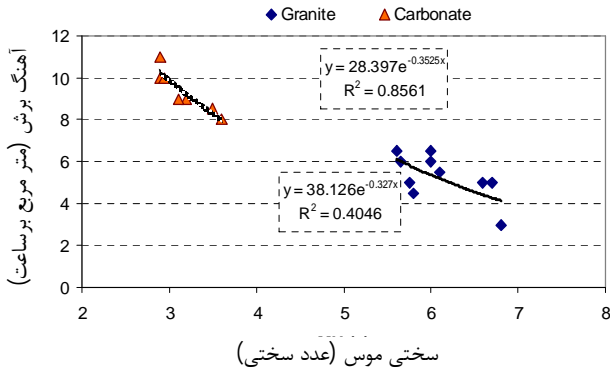
#### 3- مطالعات آزمایشگاهی و برداشت‌های صنعتی

به منظور بررسی ارتباط میان مشخصات سنگ و آهنگ برش، مطالعات آزمایشگاهی و صحرائی انجام شد. برای این منظور در مجموع از 17 نمونه سنگ ساختمانی شامل 10 نمونه سنگ گرانیتی و 7 نمونه سنگ کربناته در کشور نمونه‌برداری شد و در کارخانه‌های فرآوری سرعت برش سنگ‌ها اندازه‌گیری و ثبت شد.

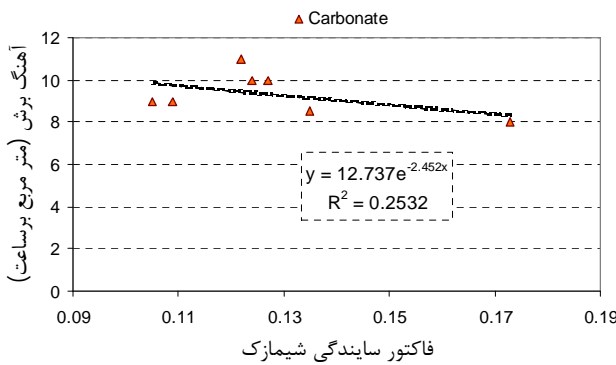
جدول 1: مطالعات آزمایشگاهی و میدانی سنگ‌های مورد مطالعه

| نام معدن         | نوع و نام سنگ        | $P_h$<br>(m <sup>2</sup> /h) | EQC<br>(%) | $\sigma_1$<br>MPa | GS<br>(n) | MH<br>(n) | E<br>(GPa) | UCS<br>(MPa) | SF-a<br>(N/mm) |
|------------------|----------------------|------------------------------|------------|-------------------|-----------|-----------|------------|--------------|----------------|
| سولابست          | گرانیت سبز جنگلی     | 6/5                          | 34/02      | 8/52              | 1/86      | 6         | 36/4       | 126/5        | 5/4            |
| سرابی            | گرانیت مشکی          | 3                            | 85/05      | 24/6              | 6/23      | 6/8       | 68/5       | 218          | 130/35         |
| قلعه خرگوشی      | گرانیت قرمز          | 5/5                          | 57/65      | 8/52              | 2/9       | 6/1       | 43/6       | 142          | 14/24          |
| سینیت هرمه       | گرانیت سبز پیرانشهر  | 4/5                          | 32/23      | 18                | 3/8       | 5/8       | 43/2       | 176          | 22/05          |
| چایان            | گرانیت مشکی          | 5                            | 60/06      | 15                | 0/87      | 6/6       | 48/6       | 173          | 7/6            |
| نهبندان          | گرانیت کرم           | 5                            | 68/35      | 10/6              | 7/74      | 6/7       | 38/5       | 146          | 56/08          |
| ناری             | گرانیت ناری ارومیه   | 6                            | 33         | 10/3              | 1/6       | 6         | 33/2       | 129          | 5/44           |
| نهبندان          | گرانیت سفید          | 5                            | 64/3       | 9/2               | 4/1       | 5/75      | 35/5       | 145          | 24/25          |
| خوش طینت         | گرانیت شکلاتی خرمنده | 6                            | 32/2       | 8/3               | 3/9       | 5/65      | 28/9       | 133          | 10/42          |
| گرانیت خاتم      | گرانیت مروارید       | 6/5                          | 30/3       | 7/4               | 3/8       | 5/6       | 31/2       | 125          | 8/5            |
| ذوالفقار علی (ع) | مرمریت کرم هرسین     | 8/5                          | 3/6        | 6/8               | 0/55      | 3/5       | 32/5       | 71/5         | 0/135          |
| گل سنگ           | مرمریت صورتی انارک   | 9                            | 3/4        | 7/1               | 0/45      | 3/2       | 33/6       | 74/5         | 0/109          |
| آذرشهر           | تراورتن قرمز         | 11                           | 2/8        | 4/3               | 1/01      | 2/9       | 20/7       | 53           | 0/122          |
| حاجی آباد        | تراورتن حاجی آباد    | 10                           | 2/6        | 5/6               | 0/85      | 2/9       | 21         | 61/5         | 0/124          |
| دره بخاری        | تراورتن دره بخاری    | 10                           | 2/7        | 5/4               | 0/87      | 2/95      | 23/5       | 63           | 0/127          |
| صلصالی           | مرمریت صلصالی        | 9                            | 3/2        | 6/3               | 0/52      | 3/1       | 31/6       | 73           | 0/105          |
| هفتومان          | مرمریت صورتی هفتومان | 8                            | 4          | 7/2               | 0/6       | 3/6       | 35/5       | 74/5         | 0/173          |

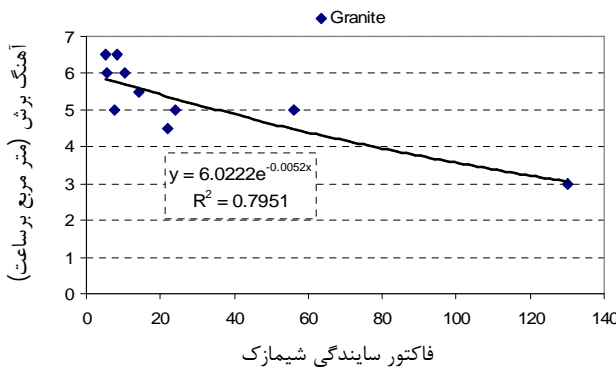
$P_h$ : آهنگ برش، EQC: کوارتز محتوی،  $\sigma_1$ : مقاومت کششی، GS: اندازه دانه ها، MH: سختی موس، E: مدول الاستیسیته، UCS: مقاومت فشاری تک محوری، SF-a: فاکتور ساینده‌گی شیمازک



شکل 6: ارتباط میان آهنگ برش و سختی موس در نمونه سنگ‌های گرانیتی و کربناته



شکل 7: ارتباط میان آهنگ برش و فاکتور ساینندگی شیمازک سنگ‌های کربناته



شکل 8: ارتباط میان آهنگ برش و فاکتور ساینندگی شیمازک در نمونه سنگ‌های گرانیتی

2-4- برازش چند متغیره

در این بخش از تحقیق، به منظور بررسی ارتباط دقیق‌تر میان آهنگ برش و مشخصات سنگ، برازش سه و چهار متغیره با کمک نرم افزار SPSS انجام شد و در ادامه رابطه‌های آماری حاصل ارزیابی شدند. رابطه‌های حاصل از مطالعات آماری در جدول 2 ارائه شده است.

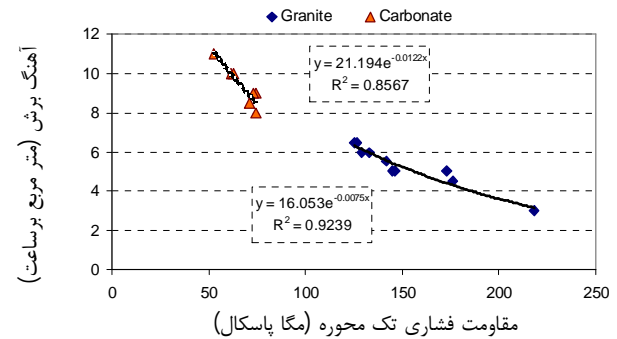
به منظور بررسی و پیش بینی آهنگ برش سنگ‌های تزئینی مورد مطالعه، آهنگ برش سنگ‌ها بر اساس تولید در واحد زمان (متر مربع در ساعت) برای هر نمونه سنگ در کارخانه‌های فرآوری تعیین شد. نتایج مربوط به مطالعات میدانی و آزمایشگاهی در جدول 1 نشان داده شده است.

4- مطالعات آماری

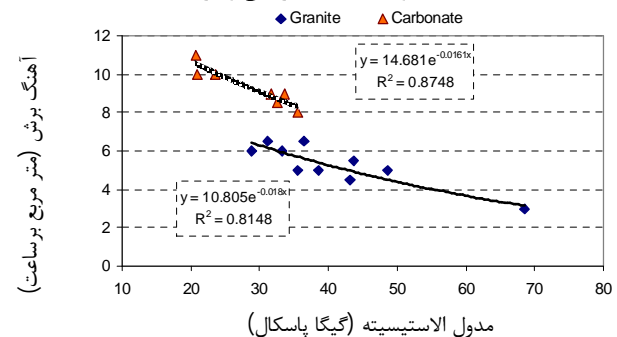
به منظور بررسی تاثیر مشخصات سنگ بر قابلیت برش مطالعات آماری بر روی نتایج آزمایشگاهی انجام شد. مطالعات آماری در دو بخش برازش تک متغیره و برازش چند متغیره انجام شد.

4-1- برازش تک متغیره

در این بخش از تحقیق ارتباط میان مشخصات سنگ و آهنگ برش توسط آنالیز برازش تک متغیره انجام شد. در مجموع داده‌ها در دو گروه سنگ‌های سخت (گرانیت) و نرم (کربناته) با توابع خطی، توانی، لگاریتمی و نمایی بررسی و برازش (شکل‌های 4 تا 8) در نهایت بهترین تابع با توجه به بیشترین ضریب همبستگی انتخاب شد.

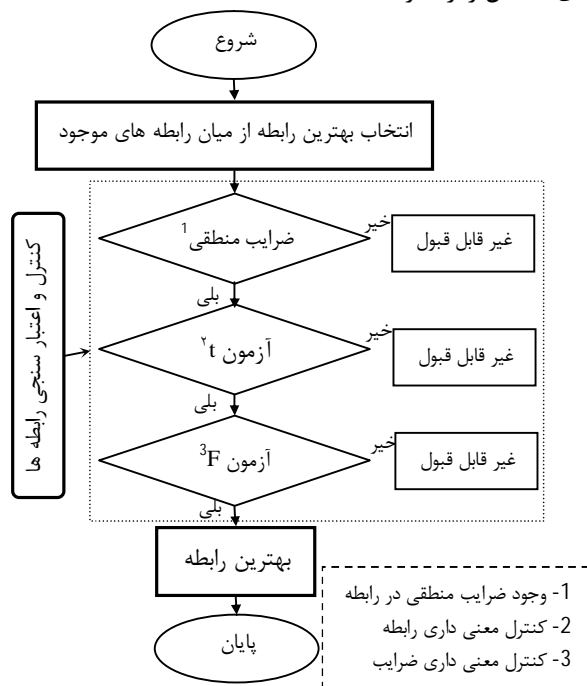


شکل 4: ارتباط میان آهنگ برش و مقاومت فشاری تک محوری در نمونه سنگ‌های گرانیتی و کربناته



شکل 5: ارتباط میان آهنگ برش و مدول الاستیسیته در نمونه سنگ‌های گرانیتی و کربناته

متغیرهای مستقل را رد کرد.



شکل 9: مراحل کنترل و اعتبار سنجی آماری رابطه‌ها

از جمله نکات مهمی که باید در تحلیل‌های آماری به ویژه در ارائه رابطه‌های آماری به آن توجه داشت وجود ضرایب منطقی یا به عبارت دیگر پیروی رابطه از طبیعت ذاتی فرایند است. همان‌طور که در شکل‌های 4 تا 8 مشاهده می‌شود آهنگ برش با افزایش مشخصات مقاومتی، سختی و ساینده‌گی سنگ کاهش می‌یابد. بنابراین رابطه‌ای که خلاف این موضوع را ثابت کند از نظر علمی غیر قابل قبول است. با توجه به توضیحات بالا از میان رابطه‌های ارائه شده تنها رابطه 2 می‌تواند یک رابطه قابل قبول برای پیش‌بینی مقدار آهنگ برش باشد. چرا که در سایر رابطه‌ها با افزایش سختی سنگ (در شرایطی که سایر پارامترها یکسان در نظر گرفته شوند) مقدار آهنگ برش افزایش می‌یابد. یکی دیگر از روش‌های ارزیابی رابطه‌های آماری پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز 1:1 است. شکل 10 پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده را نسبت به مقادیر واقعی آهنگ برش برای رابطه پیش‌بینی نشان می‌دهد. هرچه تراکم این نقاط نسبت به خط نیم‌ساز بیشتر باشند رابطه دقت بهتری دارد. با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان چنین استنباط کرد که رابطه دقت بهتری در تخمین و پیش‌بینی مقدار جریان مصرفی دارد.

جدول 2: رابطه‌های آماری برای پیش‌بینی آهنگ برش

|         |                                                                                             |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| رابطه 1 | $P_h = \frac{10^{1.924} \times MH^{0.468}}{UCS^{0.393} \times E^{0.383} \times SF^{0.092}}$ |
| رابطه 2 | $P_h = \frac{10^{1.772}}{UCS^{0.127} \times E^{0.438} \times SF^{0.071}}$                   |
| رابطه 3 | $P_h = \frac{10^{2.688} \times MH^{0.24}}{UCS^{0.838} \times E^{0.214}}$                    |
| رابطه 4 | $P_h = \frac{10^{2.312} \times MH^{0.602}}{UCS^{0.924} \times SF^{0.054}}$                  |
| رابطه 5 | $P_h = \frac{10^{1.487} \times MH^{0.283}}{E^{0.532} \times SF^{0.12}}$                     |

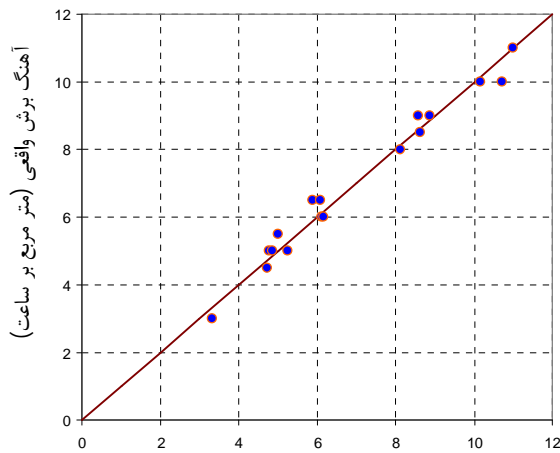
در رابطه‌های ارائه شده  $P_h$  معرف آهنگ برش بر حسب متر مربع بر ساعت، UCS مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب مگاپاسکال، E مدول الاستیسیته بر حسب گیگاپاسکال، SF فاکتور ساینده‌گی شیمازک بر حسب نیوتن بر میلی‌متر و MH عدد سختی موس می‌باشند. در تمامی رابطه‌ها آهنگ برش به عنوان پارامتر وابسته و مشخصات سنگ به عنوان پارامترهای مستقل در نظر گرفته شدند. به منظور بررسی و کنترل رابطه‌های به دست آمده از آزمون‌های آماری استفاده شد. فلوجارت ارائه شده در شکل 9 مراحل انجام کنترل و اعتبارسنجی رابطه‌ها را به ترتیب نشان می‌دهد. همان‌طوری که در شکل 9 نشان داده شده است برای کنترل معنی‌داری رابطه از آزمون  $F$  و برای کنترل معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل، از آزمون  $t$  استفاده شده است. مقادیر هر یک از پارامترهای بالا به طور جداگانه برای هر رابطه با استفاده از نرم افزار آماری SPSS تعیین شد. نتایج حاصل از بررسی‌های آماری (ضریب همبستگی و آزمون‌های  $F$  و  $t$ ) در جدول 3 نشان داده شده است. با توجه به این که مقدار  $F$  به دست آمده از جدول توزیع با سطح اعتماد 99 درصد بزرگتر از مقدار  $F$  به دست آمده از رابطه است. بنابراین می‌توان فرضیه صفر را که بیان می‌کند رابطه خطی بین متغیر وابسته (آهنگ برش) و متغیرهای مستقل (مشخصات سنگ) وجود ندارد را رد کرده و نتیجه‌گیری کرد که حداقل یکی از ضرایب رگرسیون صفر نیست. پس از کنترل معنی‌داری کلی رابطه 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 متغیرهای مستقل را بررسی کرد. از آن‌جا که مقدار  $t$  حاصل از جدول توزیع مربوطه با سطح اعتماد 90 درصد بزرگتر از مقدار  $t$  های به دست آمده از متغیرهای مستقل است. بنابراین می‌توان فرضیه صفر بودن ضرایب

جدول 3: نتایج حاصل از بررسی‌های آماری برای پیش بینی نرخ برش

| رابطه     | پارامترها | ضرایب توانی | خطای معیار | F     | F جدول | t      | t جدول | R <sup>2</sup> |
|-----------|-----------|-------------|------------|-------|--------|--------|--------|----------------|
| رابطه (1) | عدد ثابت  | -2/103      | 0/209      | 208/6 | 5/21   | 9/202  | 1/77   | 0/99           |
|           | UCS       | -0/393      | 0/165      |       |        |        |        |                |
|           | SF-a      | -0/092      | 0/02       |       |        |        |        |                |
|           | E         | -0/383      | 0/086      |       |        |        |        |                |
|           | MH        | 0/468       | 0/149      |       |        |        |        |                |
| رابطه (2) | عدد ثابت  | 1/772       | 0/263      | 163/9 | 5/56   | 6/729  | 1/76   | 0/97           |
|           | UCS       | -0/127      | 0/183      |       |        |        |        |                |
|           | E         | -0/438      | 0/109      |       |        |        |        |                |
|           | SF-a      | -0/071      | 0/024      |       |        |        |        |                |
| رابطه (3) | عدد ثابت  | 2/688       | 0/202      | 106/5 | 5/56   | 13/304 | 1/76   | 0/96           |
|           | UCS       | -0/838      | 0/213      |       |        |        |        |                |
|           | E         | -0/214      | 0/125      |       |        |        |        |                |
|           | MH        | 0/24        | 0/225      |       |        |        |        |                |
| رابطه (4) | عدد ثابت  | 2/312       | 0/296      | 111/6 | 5/56   | 7/807  | 1/76   | 0/96           |
|           | UCS       | -0/924      | 0/177      |       |        |        |        |                |
|           | SF-a      | -0/054      | 0/028      |       |        |        |        |                |
|           | MH        | 0/602       | 0/228      |       |        |        |        |                |
| رابطه (5) | عدد ثابت  | 1/487       | 0/118      | 202/9 | 5/56   | 12/617 | 1/76   | 0/98           |
|           | SF-a      | -0/120      | 0/019      |       |        |        |        |                |
|           | MH        | 0/283       | 0/149      |       |        |        |        |                |
|           | E         | -0/832      | 0/069      |       |        |        |        |                |

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شد تا با انجام دادن آزمایش‌های دقیق و مطالعات آماری ارتباط میان آهنگ برش و مشخصات سنگ بررسی شود. برای این منظور 17 نوع سنگ ساختمانی از خانواده سنگ‌های سخت و نرم انتخاب شدند و میزان آهنگ برش هر یک در کارخانه فرآوری ثبت شد. سپس نمونه‌ها برای انجام آزمایش به آزمایشگاه مکانیک سنگ انتقال داده شدند و 4 مشخصه مهم از سنگ شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، سختی موس، فاکتور ساینده‌گی شیمازک و مدول الاستیسیته (که هر کدام به ترتیب به نمایندگی از خانواده پارامترهای مقاومتی، سختی، ساینده‌گی و الاستیسیته و پلاستیسیته سنگ انتخاب شدند) در آزمایشگاه تعیین شدند. بعد از تمامی این مراحل مطالعات آماری بر روی نتایج انجام شد. نتایج حاصل از برآزش‌های ساده نشان داد که با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری، سختی موس، فاکتور ساینده‌گی شیمازک و مدول



شکل 10: پراکندگی نقاط پیش بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم ساز 1:1



ranking of the sawability of hard building stones based on laboratory tests". Dimensional Stone Magazine, pp 3-29.

[10] Jennings M, Wright D.N. 1989, "Guidelines for sawing stone". Industrial Diamond Review, 2, pp: 70-75.

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

[12] Hausberger P. 1990, "Stone Machinability". Industrial Diamond Review, Vol. 3, pp: 1-25.

[13] Konstanty J, 1991, "The Materials Science of Stone Sawing", Industrial Diamond Review. 1, pp: 27-31

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

[15] Clausen R, Wang CY, Meding M. 1996, "Characteristics of acoustic emission during single diamond scratching of granite". Industrial Diamond Review, 3, pp: 96-9.

[16] Ceylanoglu A, Gorgulu K. 1997, "The performance measurement results of stone cutting machines and their relations with some material properties". Proceedings of the Sixth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. Rotterdam, Balkema, pp: 393-8.

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

[18] Xu X, 1999, "Friction studies on the process in circular sawing of granites", Tribology Letters 7, pp: 221-227.

[19] Xu X, Li Y, Malkin S. 2001, "Forces and energy in circular sawing and grinding of granite". Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123, pp:13-22.

[20] Brook B. 2002, "Principles of diamond tool technology for sawing rock". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Vol. 39, pp: 41-58.

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

[22] Konstanty J, 2002, "Theoretical analysis of stone sawing with diamonds", Journal of materials processing technology, 123, pp: 146-154.

[23] Sun L.a, Pan J.b, Lin C. 2002, "A new approach to improve the performance of diamond sawblades", Materials Letters, 57, pp: 1010-1014.

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

[25] Wei X, Wang C.Y, Zhou Z.H.; 2003, "Study on the fuzzy ranking of granite sawability". Journal of

الاستیسیته مقدار آهنگ برش برای هر دو گروه از سنگ‌های ساختمانی به صورت نمایی کاهش می‌یابد. در طی انجام این تحقیق 5 رابطه برای پیش‌بینی آهنگ برش با استفاده از آنالیز چند متغیره ارائه شد. تست‌های آماری  $t$  و  $F$  برای کنترل و معنی‌داری رابطه و ضرایب استفاده شدند. نتایج تست‌های آماری برای تمامی رابطه‌ها با یک سطح اطمینان بالا و ضریب همبستگی خوب و قابل قبولی بودند. این نکته حائز اهمیت است که در بحث تحلیل رابطه‌های آماری یکی از مهمترین معیارهای ارزیابی صحت معادله، علاوه بر آزمون‌های  $t$  و  $F$ ، بررسی منطقی بودن یا نبودن ضرایب برآزش است که باید در بحث مطالعات آماری به آن توجه داشت. بدین منظور ضرایب هر یک از متغیرها با توجه به طبیعت موضوع (فرایند برش) بررسی شدند. بررسی‌های انجام شده بر روی ضرایب هر یک از متغیرها نشان داد که تنها رابطه 2 از یک روند طبیعی و منطقی در فرایند برش برخوردار می‌باشد. بدین ترتیب رابطه 2 به عنوان مناسب‌ترین رابطه برای تعیین و پیش‌بینی آهنگ برش از میان سایر رابطه‌ها پیشنهاد شد. با استفاده از این رابطه می‌توان مقدار سرعت برش بلوک‌های سنگی را در کارخانه‌های فراوری با دقت خوبی پیش‌بینی کرد.

#### منابع

[1] Norling R.G; 1971, "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.

[2] Buttner A. 1974, "Diamond tools and stone". Industrial Diamond Review. Vol. 34, pp 89-93.

[3] Burgess RB. 1978, "Circular sawing granite with diamond saw blades". In: Proceedings of the Fifth Industrial Diamond Seminar, pp. 3-10.

[4] Tonshoff H.K, Warnecke G, 1982, "Research on stone sawing". P. Daniel (Ed), Advance in Ultrahard Materials Application Technology, Vol 1, Harnbeam, England, pp: 36-49.

[5] Vaya and Vikram; 1983, "Mineralogical parameters in granite sawing", technical paper, University of Jodhpur, pp: 7-79.

[6] Wright D.N, Cassapi V.B, 1985, "Factors influencing stone sawability", Industrial Diamond Review, 2, pp: 84-87.

[7] Ertingshausen W, 1985, "Wear processes in sawing hard stone", Industrial Diamond Review. 5, pp: 254-258.

[8] Wright D.N, Walper H, 1986, "Investigation and prediction of diamond wear when sawing", annals CIRP, 35 (1), pp: 239-244.

[9] Birle J.D, Ratterman E. 1986, "An approximate

- 1123-1131.
- [40] Polini, W., Turchetta, S., 2007, "Monitoring of diamond disk wear in stone cutting by means of force or acceleration sensors", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 35, pp: 454-467.
- [41] Fener M, Kahraman S, & Ozder M.O; 2007, "Performance Prediction of Circular Diamond Saws from Mechanical Rock Properties in Cutting Carbonate Rocks". *Rock Mech. Rock Engng.* Vol. 40, No. 5, pp: 505-517
- [42] R. Mikaeil, M. Ataei, S.H. Hoseinie, 2008, "Predicting the production rate of diamond wire saws in carbonate rocks cutting", *Industrial Diamond Review (IDR)*. Vol. 3, pp: 28-34.
- [43] R. Mikaeil, S. H. Hoseinie, M. Ataei, 2008, "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.
- [44] Atici U, Ersoy A. 2009, "Correlation of specific energy of cutting saws and drilling bits with rock brittleness and destruction energy". *Journal of Materials Processing Technology*, 209, pp: 2602-2612.
- [45] R. Yousefi, R. Mikaeil, M. Ataei, 2010, "Study of Factors Affecting on the Sawability of the Ornamental Stone". *Proceedings of the 8th International Scientific Conference SGEM*. Bulgaria.
- Materials Processing Technology, 139, pp: 277-280.
- [26] Xu X, Li Y, Yu Y, 2003, "Force ratio in the circular sawing of granites with a diamond segmented blade", *Journal of Materials Processing Technology*, 139 () 281-285.
- [27] Engels A, 2003, "The role of Particles Per Carat in diamond tool behavior", *Industrial Diamond Review* 2, pp: 39-45.
- [28] Ersoy A, Atici U, 2004, "Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks". *Diamond and Related Materials* 13, pp: 22-37.
- [29] Gunaydin O, Kahraman S, Fener M. 2004, "Sawability prediction of carbonate rocks from brittleness indexes". *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 104, pp: 239-244.
- [30] Buyuksagis I.S, Goktan R.M. 2005, "Investigation of marble machining performance using an instrumented block-cutter". *Journal of Materials Processing Technology*, 169, pp: 258-262.
- [31] Delgado N.S, Rodriguez R, Rio A, Sarria I.D, Calleja L, Argandona V.G.R. 2005, "The influence of microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain)". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 42, pp: 161-6.
- [32] Ersoy A, Buyuksagis S, Atici U, 2005, "Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard and abrasive rocks", *Wear* 258, pp: 1422-1436.
- [33] Ayhan M. 2005, "Cost model and sensitivity analysis of cutting and processing stage at a marble plant". *Industrial Diamond Review*, Vol. 3, pp: 49-54.
- [34] Kahraman S, Altun H, Tezekici B.S., Fener M. 2005, "Sawability prediction of carbonate rocks from shear strength parameters using artificial neural networks". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 43, No. 1, pp: 157-164.
- [35] Kahraman S, Ulker U, Delibalta S. 2007, "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, pp: 427-430.
- [36] Tutmez B, Kahraman S, Gunaydin O.; 2007, "Multifactorial fuzzy approach to the sawability classification of building stones". *Construction and Building Materials*, 21, pp: 1672-1679.
- [37] Özçelik Y. 2007, "The effect of marble textural characteristics on the sawing efficiency of diamond segmented frame saws". *Industrial Diamond Review*, 2, pp: 65-70.
- [38] Buyuksagis I.S. 2007, "Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade". *Journal of Materials Processing Technology*, 183, pp: 399-406.
- [39] Kahraman S, Fener M, Gunaydin O. 2004, "Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, pp: