

## بررسی و پیش بینی سیگنال‌های ارتعاشی در فرآیند سنگ زنی

رضا میکائیل<sup>۱</sup>، اکبر اسمعیل زاده<sup>۲\*</sup>، محمد عطایی<sup>۳</sup>

پذیرش مقاله: ۹۹/۰۷/۲۳

دریافت مقاله: ۹۹/۰۴/۱۵

### چکیده

افزایش بیش از حد مجاز ارتعاش در فرآیند برش سنگ، علاوه بر افزایش پرت سنگ، باعث ایجاد کمانش، انحراف و در نهایت شکست ابزار می‌شود. بنابراین بررسی و پیش‌بینی میزان ارتعاش طی فرآیند برش، امری لازم و ضروری می‌باشد. در این تحقیق سعی شد با انجام مطالعات آزمایشگاهی و آماری، به بررسی و پیش‌بینی ارتعاش طی فرآیند برش پرداخته شود. بدین منظور یک دستگاه برش در مقیاس آزمایشگاهی به همراه تجهیزات اندازه‌گیری ارتعاش تهیه گردید. مطالعات تحت شرایط مختلف عملیاتی در عمق‌های مختلف برش (۱۵، ۲۲، ۳۰ و ۳۵ میلی‌متر)، نرخ‌های مختلف پیشروی (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ سانتی‌متر در دقیقه) و سرعت‌های مختلف چرخش دیسک (۱۷۷۰، ۲۵۵۰ و ۱۵۴۰ دور در دقیقه) بر روی یک نمونه سنگ کربناته انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار عمق برش و نرخ پیشروی، میزان شدت ارتعاشات افزایش می‌یابد. به طوری که نسبت این تغییرات در نرخ‌های پیشروی ۴۰۰ به ۱۰۰، بیش از ۶ برابر بود. پس از بررسی نتایج آزمایشات و انجام مطالعات آماری، مدل‌های آماری برای پیش‌بینی سیگنال‌های ارتعاشی با کمک نرم افزار SPSS ارائه شدند. نتایج حاصل از آزمون‌های آماری نشان داد که بهترین مدل‌های برازشی قادر به پیش‌بینی میزان ارتعاشات طی فرآیند برش با ضریب تبیین ۰/۹۲ و ۸۷/ با سطح معنی داری بالای ۹۰ درصد و خطای کمتر از ۱۰ درصد می‌باشند.

**کلید واژه‌ها:** برش سنگ، سیگنال‌های ارتعاشی، پارامترهای عملیاتی، مدل آماری.

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشکده محیط زیست دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه Reza.mikaeil@uut.ac.ir

۲. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشکده محیط زیست دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

۳. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

فرایند برش سنگ یک فرایند سایشی می‌باشد. به طوری که می‌توان برش سنگ به کمک سگمنت‌های الماسی را سایش ذرات تشکیل دهنده سنگ توسط عبور دانه‌های الماس روی سطح سنگ دانست. به طور کلی فرایند برش سنگ با استفاده از تجهیزات الماسی را می‌توان طی دو مرحله به طور خلاصه بیان کرد. مرحله نخست از فرایند 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. طی این فرایند، 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 فرایند را ایجاد می‌کنند که عمدتاً ناشی از فاکتورهایی نظیر تغییر شکل الاستیکی و پلاستیکی در سنگ، اصطکاک میان دانه الماس و ماتریس با سنگ و تراشه‌های حاصل از برش می‌باشد. این تغییرات نیرو به همراه پستی و بلندی‌های موجود در سطح قطعه کار، بی‌نظمی‌های ضخامت براده، شکسته شدن و لایه لایه شدن براده‌ها و اصطکاک بین سطوح، باعث ایجاد سیگنال‌های ارتعاشی می‌شود. بنابراین مهمترین منبع ایجاد ارتعاش در ماشین‌کاری را تغییر در ضخامت براده برداری و در نتیجه تغییرات نیروهای فرایند عنوان کرد. افزایش بیش از حد مجاز ارتعاش، علاوه بر افزایش پرت سنگ، باعث ایجاد کمانش، انحراف و در نهایت شکست ابزار می‌شود. لذا بررسی و پیش‌بینی میزان ارتعاش طی فرایند برش امری لازم و ضروری می‌باشد. بررسی ارتعاشات و کاهش آن طی فرایند برش، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید موجب افزایش عمر و عملکرد ابزارهای برش و همچنین افزایش کیفیت محصولات تولید شده می‌شود. استفاده از ارتعاشات در ماشین‌کاری از سال ۱۹۴۶ شروع شد که در آن آرنولد پدیده چتر و علت ایجاد آن را به صورت اثر دمپینگ منفی توصیف کرد (Arnold, 1946). این نظریه بلافاصله توسط تلستی و تیباس رد شد (Tobias &

Fishwick, 1958, Tlusty & Polacek, 1963). در سال ۱۹۵۸ تیباس و فیشویک مدلی برای تعیین چتر و بررسی ناپایداری ماشین ابزار ارائه کرد (Tobias & Fishwick, 1958). تلستی و پولک در سال ۱۹۶۳ دریافتند که اثر ارتعاش مجدد علت اصلی ناپایداری می‌باشد که باعث ایجاد چتر می‌شود (Tlusty & Polacek, 1963). در زمینه ماشین‌کاری سنگ‌ها می‌توان به مطالعات پولینی و تورچیتا در سال ۲۰۰۷ اشاره کرد. آن‌ها مطالعات خود را برای مونیتورینگ سایش ابزار با استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی و بررسی نیروها در فرایند برش یک نوع سنگ گرانیتی انجام دادند. نتایج حاصل از مطالعاتشان نشان داد که با استفاده از مونیتورینگ سیگنال‌هایی نظیر شتاب در راستای محور  $x$  نیرو می‌توان عملیات ماشین‌کاری به ویژه میزان سایش ابزار را مورد ارزیابی قرار داد (Polini & Turchetta, 2007). اوزچلیک و همکاران در سال ۲۰۰۱ به بررسی رابطه بین عمق برش و ارتعاش پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در سنگ‌های سخت افزایش عمق برش منجر به کاهش مقدار نوسان و ارتعاش ماشین برش سنگ می‌شود (Ozcelik et al. 2001). اوزچلیک و ایلمازکایا در سال ۲۰۱۱ به بررسی تأثیر انیزوتروپی سنگ‌ها به دلیل وجود صفحات لایه‌بندی بر روی ارتعاش دستگاه سیم برش الماسیه پرداختند. بدین منظور نحوه قرارگیری دستگاه برش نسبت به صفحات لایه‌بندی در شرایط مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که بیشترین میزان ارتعاش در زاویه برش ۵۵ درجه و کمترین ارتعاش در زاویه برش ۲۵ درجه حاصل می‌شود (Ozcelik & Yilmazkaya, 2011). میکائیل و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی و طبقه‌بندی سنگ‌های ساختمانی از دیدگاه ارتعاش به وجود آمده در دستگاه برش دهنده دیسکی با استفاده از تئوری فازی پرداختند (Mikaeil et al. 2011). در ادامه میکائیل و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی ارتباط میان ارتعاش دستگاه برش دهنده دیسکی در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی با شاخص‌های تردی سنگ پرداختند (Mikaeil et al. 2014). در سال ۲۰۱۸ آریافر و همکاران به بررسی ارتعاش دستگاه‌های

$$SRMS_{az} = \frac{RMS_{az} \times 10}{D_c \times F_r} \quad (1)$$

در رابطه بالا  $Fr$ ،  $DC$  و  $SRMS_{az}$  به ترتیب عمق برش بر حسب میلی‌متر، نرخ پیشروی بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه و ارتعاش ویژه بر حسب شتاب ثقل به ازای واحد سطح برش خورده بر حسب سانتی‌متر مربع بر دقیقه می‌باشد. واژه  $RMS$  مخفف عبارت « ریشه دوم متوسط مربعات » است. از نظر ریاضی این عبارت از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^T x(t)^2 dt}{T}} \quad (2)$$

در رابطه ۱ متغیر  $X_{rms}$  معرف میانگین دامنه‌ی ارتعاشات در طی مدت زمان معین یا به عبارتی مقدار  $RMS$  تابع  $x$  در بازه زمانی  $T$  (بر حسب ثانیه) می‌باشد که برابر با ریشه دوم میانگین مربعات مقادیر لحظه‌ای شدت ارتعاش بر حسب شتاب گرانش زمین می‌باشد. این مقادیر بیشتر در تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی، ولتاژ و در شرایطی که مقادیر مثبت و منفی داده‌ها در یک سیگنال، احتمال صفر شدن میانگین مقادیر را بالا می‌برند مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به ماهیت سیگنال‌های ارتعاشی و جلوگیری از صفر شدن مقادیر میانگین، در این تحقیق از مقادیر  $RMS$  ارتعاشات در تحلیل‌ها استفاده می‌شود.

در این بخش ارتباط میان سیگنال‌های ارتعاشی و پارامترهای عملیاتی با استفاده از آنالیز رگرسیون چند متغیره غیر خطی مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب مدل‌های آماری به صورت زیر قابل ارائه می‌باشد.

$$RMS_{az} = A \times F_r^B \times D_c^E \times P_s^G \quad (3)$$

$$SRMS_{az} = H \times F_r^I \times D_c^J \times P_s^K \quad (4)$$

در روابط بالا  $A$  و  $H$  ضرایب ثابت مدل،  $B$ ،  $E$ ،  $G$ ،  $I$ ،  $J$  و  $K$  ضرایب توانی مدل،  $P_s$ : سرعت محیطی دیسک (دور در دقیقه)،  $RMS_{az}$ : ریشه دوم متوسط مربعات ارتعاش در راستای  $Z$  بر حسب شتاب گرانش زمین و  $SRMS_{az}$ : مقدار

برش دهنده دیسکی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری پرداختند (Aryafar et al. 2018).

با توجه به بررسی‌های به عمل آمده می‌توان دریافت، تعداد مقالات مرتبط با موضوع ارتعاش در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی در مقایسه با موضوعاتی از قبیل انرژی مصرفی دستگاه‌های برش، سایش ابزارهای الماسی و همچنین نرخ تولید بسیار اندک می‌باشد که این خود مستلزم انجام مطالعات و تحقیقات بیشتر در این زمینه است. بدین منظور تحقیق حاضر سعی خواهد داشت تا در گامی هرچند کوچک به بررسی ارتباط میان پارامترهای عملیاتی برش در فرآیند برش دیسکی با میزان ارتعاشات حاصل شده در دستگاه برش در طی فرآیند برش یک نوع سنگ ساختمانی نرم با استفاده از مطالعات آماری بپردازد.

## ۲. مواد و روش‌ها

به طور کلی مراحل مطالعه این تحقیق شامل طرح مطالعه، نمونه‌ها، اندازه‌گیری‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها می‌باشند. طرح مطالعه نخستین گام و از جمله مهمترین بخش‌های یک تحقیق می‌باشد که عموماً پس از انجام مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی مطالعات پیشین حاصل می‌شود. طرح مطالعه تحقیق حاضر را می‌توان بررسی ارتباط میان پارامترهای عملیاتی برش شامل نرخ برش و سرعت پیشروی با ارتعاشات به وجود آمده در دستگاه برش عنوان کرد. نمونه‌ها یا به عبارت دیگر مواد تحقیق، پلاک‌های سنگی تهیه شده از نمونه سنگ ساختمانی تراورتن آذرشهر (یکی از پرکاربردترین نمونه سنگ‌های ساختمانی در کشور) می‌باشد. اندازه‌گیری‌ها، در مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از دستگاه برش و ارتعاش سنج با مشخصات مندرج در جدول ۱ می‌باشد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از روش‌های آماری در محیط نرم افزار SPSS می‌باشد. به طوری که سعی شد ارتباط میان ارتعاش ویژه ( $SRMS_{az}$ ) که از رابطه ۱ قابل محاسبه می‌باشد با تغییرات نرخ برش و نرخ پیشروی مورد ارزیابی قرار گرفت.

## جدول ۱. مشخصات تجهیزات، ابزار و قطعه کار.

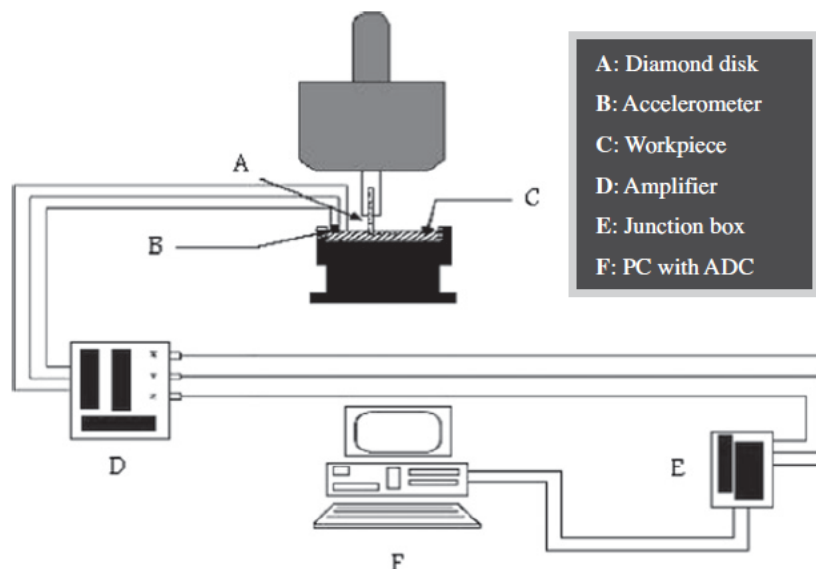
Testing tools	Specifications
Cutting machine	The main spindle motor with a power of 7.5 KW
Cutting tools	Disk diameter: 41 cm Disc thickness: 7/2 mm Number of segments around the disk: 28 diamond segments with dimensions of $3 \times 10 \times 40$ mm Diamond grain shape: octagonal cubic crystals with 30.40 mesh and equal weight percentage (25% - 30%)
Workpiece	Stone type: carbonate - Azarshahr red travertine UCS: 53 MPa, BTS: 4.3 MPa, Hardness: 2.9 Mohs, Modulus of elasticity: 20.7 GB, Quartz content: 2.8%
accelerometer	Manufacturer: Cross Bow Model: ADXL105-3 Sensitivity: 3-axis Output frequency range: 0.1 to 3200 Hz

در تمامی آزمایش‌ها از آب به عنوان مایع خنک کننده استفاده شد. در بخش دوم طرح کلی آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور دیاگرامی برای انجام آزمایش طراحی شد (شکل ۱).

ریشه دوم متوسط مربعات ارتعاش در راستای Z بر حسب شتاب گرانش زمین بر واحد تولید (سطح بریده شده از سنگ در واحد زمان). در انتها برای کنترل و اعتبار سنجی مدل‌ها یا به عبارت دیگر برای کنترل معنی‌داری آن‌ها از آزمون F و برای کنترل معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل از آزمون t و سطح معنی‌داری آن استفاده شد.

## ۳. مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی در این تحقیق طی دو بخش شامل ساخت دستگاه برش و برداشت سیگنال‌های ارتعاشی طی فرایند برش تحت شرایط مختلف عملیاتی انجام شد. در بخش نخست، مقدمات اولیه نصب و راه اندازی ماشین و تهیه ابزار برش و تجهیزات اندازه‌گیری ارتعاش و قطعات سنگ مناسب جهت آزمایش فراهم گردید. مشخصات ماشین، ابزار برش و شتاب‌سنج در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱. دیاگرام طراحی شده برای انجام آزمایشات.

شد. در این تحقیق سرعت‌های پیشروی به عنوان یکی از پارامترهای عملیاتی مورد بررسی قرار گرفت. سرعت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ سانتی متر بر دقیقه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت.

عمق برش ( $DC$ ): عمق برش توسط مکانیزم پیشروی عمودی در سیستم ایجاد شد. در این تحقیق عمق‌های برش ۱۵، ۲۲، ۳۰ و ۳۵ میلی متر مورد بررسی قرار گرفت.

سرعت برش ( $PS$ ): سرعت چرخش دیسک توسط یک موتور الکتریکی با توان ۵/۷ کیلووات و دور حداکثر ۲۸۰۰ درو بر دقیقه ایجاد می‌شود. این حرکت توسط مکانیزم تسمه و پولی در چهار نسبت مختلف به محور اسپیندل منتقل می‌شود. در کل عده دوران اسپیندل در چهار مقدار قابل تنظیم می‌باشد. این آزمایشات در سرعت‌های دورانی ۱۵۴۰، ۱۷۷۰ و ۲۵۵۰ دور در دقیقه انجام شدند. تعویض سرعت‌ها از طریق تعویض پولی موتور و تغییر نسبت انتقال دور موتور به اسپیندل صورت گرفت. پارامترهای ماشینکاری در شرایط مختلف آزمایشی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- پارامترهای ماشینکاری در آزمایش.

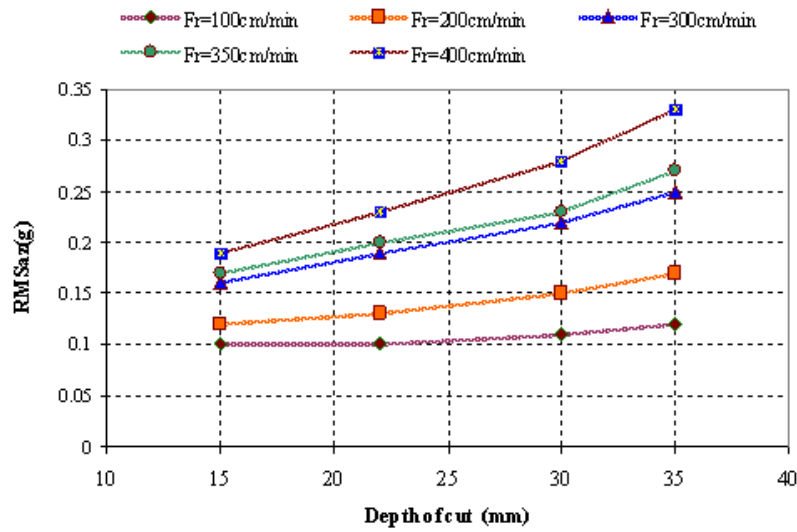
Machining parameters	changes rate
Depth of cut (mm)	15-22-30-35
Rotational speed (rpm)	1540-1770-2550
Feed rate (cm/min)	100-200-300-350-400

### ۳. بررسی نتایج آزمایشگاهی

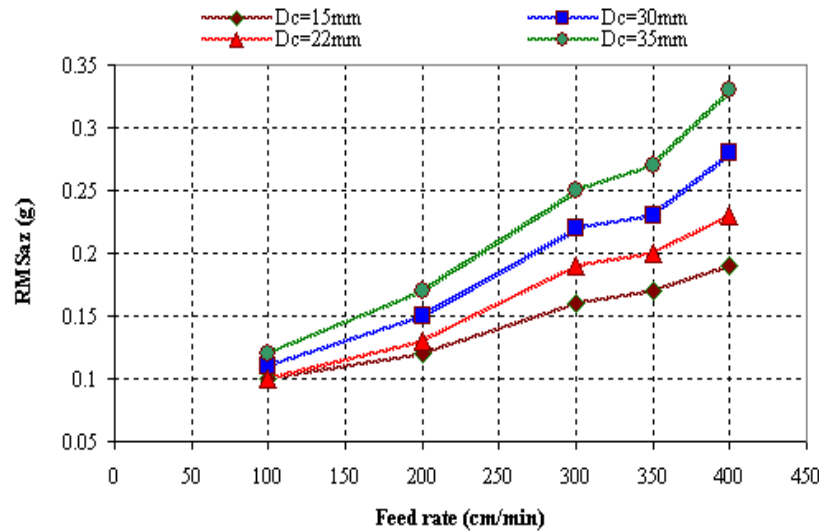
نتایج حاصل از بیش از ۴۰ نمونه تست انجام شده بر روی نمونه سنگ کربناته در شرایط مختلف عملیاتی در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده است.

در این دیاگرام سیگنال‌های خروجی از شتاب سنج توسط آمپلی فایر تقویت شده و برای تبدیل به سیگنال‌های قابل پردازش به جعبه تقسیم و سپس برای پردازش نهایی به کامپیوتر انتقال داده می‌شود. پردازش داده‌ها با کمک یک برنامه تهیه شده در محیط Labview انجام شد. Labview یک زبان برنامه نویسی گرافیکی می‌باشد که به صورت گسترده‌ای در بسیاری از شاخه‌های علوم مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جمع آوری داده و پردازش آن‌ها، تجزیه و تحلیل سیستم‌های اندازه‌گیری، کنترل و شبیه سازی فرآیندها از جمله ویژگی‌های مهم این نرم افزار می‌باشد. در برنامه‌ی نوشته شده، از یک نمودار بلوکی استفاده و سپس این نمودار به کدهای ماشین تبدیل می‌شود. در طول انجام آزمایشات سیگنال‌های اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای شتاب سنج پس از تقویت توسط آمپلی فایر وارد جعبه تقسیم می‌شوند. اطلاعات این جعبه تقسیم به کارت دریافت داده منتقل می‌شود. با قراردادن این کارت در کامپیوتر، اطلاعات توسط نرم افزار خوانده و ذخیره می‌شود. بدین ترتیب می‌توان هرگونه اطلاعات آماری از سیگنال‌ها را در بازه‌های زمانی دلخواه استخراج نمود و نمودار آن را نیز ترسیم کرد. طبیعت سیگنال‌های ارتعاشی ایجاد شده طوری است که استفاده از دامنه ارتعاشات برای تخمین و ارزیابی قابلیت برش دارای خطا می‌باشد به این منظور پارامترهایی نظیر شتاب و سرعت ارتعاشات که در آن نیروهای دینامیکی در واحد زمان تغییر می‌کند اندازه‌گیری شده و در ارزیابی قابلیت برش بکار می‌روند. تمامی پارامترهای ماشینکاری فرآیند از قبیل سرعت پیشروی، عمق برش و سرعت چرخش دیسک در دستگاه تست قابل کنترل و تنظیم می‌باشند.

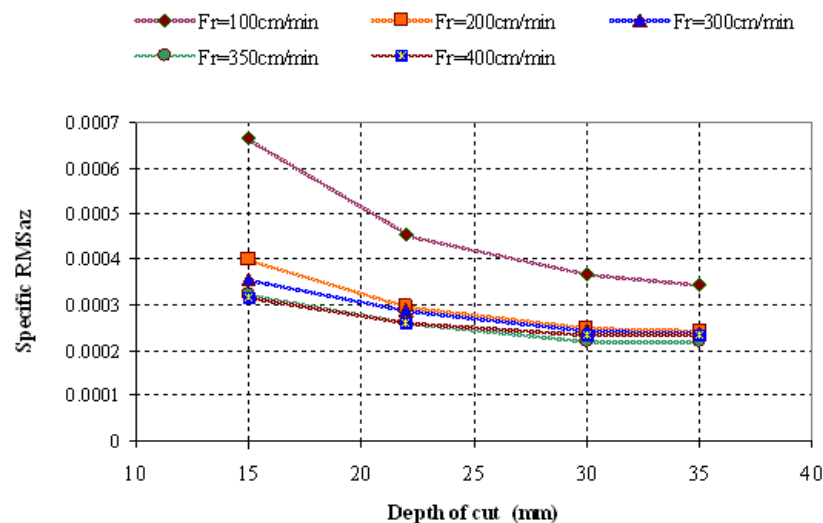
سرعت پیشروی ( $F_r$ ): سرعت پیشروی توسط سیستم هیدرولیک و شمارنده الکترونیکی در طی آزمایش سنجیده



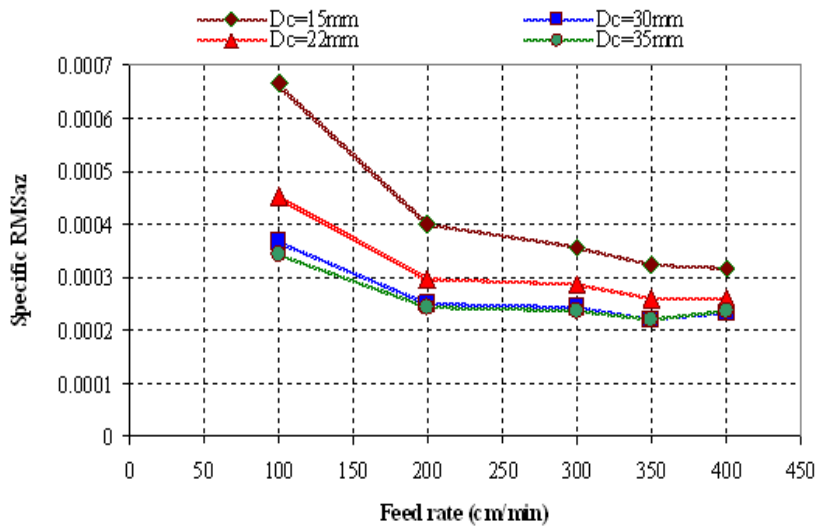
شکل ۲. تغییرات  $RMS_{az}$  نسبت به عمق برش برای نرخ‌های مختلف پیشروی.



شکل ۳. تغییرات  $RMS_{az}$  نسبت به تغییرات نرخ پیشروی برای عمق‌های برش.



شکل ۴. تغییرات  $SRMS_{az}$  ویژه نسبت به تغییرات عمق برش برای نرخ‌های مختلف پیشروی.



شکل ۵. تغییرات  $SRMS_{az}$  ویژه نسبت به تغییرات نرخ پیشروی برای عمق‌های برش.

نیروها و تنش‌های وارد به سنگ می‌شود که در نتیجه باعث تشکیل و رشد ترک‌های جانبی و شعاعی می‌شود [۸]. تشکیل و گسترش این ترک‌ها در سنگ باعث ایجاد براده‌های ثانویه می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش عمق نفوذ دانه الماس، درصد براده‌های ثانویه افزایش می‌یابد تا جایی که حتی حجم عمده‌ای از براده‌های ایجاد شده از نوع براده‌های ثانویه می‌باشند. در کل در اثر گسترش ترک‌های جانبی و تشکیل براده‌های ثانویه عمل براده برداری راحت‌تر انجام می‌شود و نیروهای برشی کاهش می‌یابند. به دلیل کاهش بارهای مکانیکی و حرارتی وارد بر دانه‌های الماسی، سایش این دانه‌ها نیز کاهش یافته و در کل شرایط برشی بهتری ایجاد می‌شود.

روند تغییرات ارتعاش ویژه با افزایش میزان عمق برش و نرخ پیشروی به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. با بررسی این نمودارها می‌توان دریافت که میزان کاهش ارتعاش ویژه با افزایش دو پارامتر عملیاتی عمق برش و نرخ پیشروی کاهش می‌یابد. این مسئله را می‌توان مرتبط با ماهیت و خاصیت ترد و شکننده سنگ‌ها دانست. به طوری که با افزایش پارامترهای عملیاتی برش (نرخ پیشروی و عمق برش)، نیروهای برش (نیروهای قائم و مماسی فرایند که در

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سرعت چرخشی ثابت از دیسک (۱۵۴۰ دور در دقیقه) با افزایش مقدار عمق برش و نرخ پیشروی مقدار ارتعاش ( $RMS_{az}$ ) افزایش می‌یابد. همانطوری که در دو نمودار ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، میزان تغییرات  $RMS_{az}$  با افزایش نرخ پیشروی و عمق برش افزایش می‌یابد به طوری که نسبت این تغییرات در نرخ‌های پیشروی ۴۰۰ به ۱۰۰ و عمق برش ۱۵ به ۳۵ در حدود ۶ برابر می‌باشد. علت این امر افزایش تنش‌های وارد بر دیسک به دلیل نیروهای فرایند شامل دو مولفه نیروهای مماسی و عمودی می‌باشد. نیروهای عمودی موجب نفوذ دانه‌های الماس در سنگ و شکل‌گیری تراشه و نیروهای مماسی موجب برداشت تراشه می‌شوند که در مجموع عملکرد دو نیرو موجب برش سنگ می‌شود. تنش‌های موجود در بدنه دیسک به واسطه این نیروها به صورت تنش‌های فشاری و ممان خمشی ظاهر می‌شوند که در صورت افزایش این نیروها از حد مجاز باعث تشدید ارتعاش و به دنبال آن کماتش و انحراف دیسک می‌شوند. ضخامت براده با سرعت پیشروی و عمق برش نسبت مستقیم دارد به عبارت دیگر با افزایش سرعت پیشروی عمق نفوذ دانه الماسی و ضخامت براده نیز افزایش می‌یابد. افزایش عمق نفوذ دانه الماسی باعث افزایش

نتایج حاصل از مطالعات آماری در جدول ۳ نشان داده شده است. معنی داری کلی مدل با آزمون  $F$ ، با سطح اعتماد ۹۹ درصد (سطح معناداری  $\alpha=0/01$ ) مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج مندرج در جدول ۳، مقدار  $F$  هر یک از مدل‌ها بزرگتر از مقدار  $F$  جدول توزیع (برابر با ۴/۶۱) می‌باشد که در هر دو مدل مقدار معنی داری یا خطا در رد فرضیه صفر ( $\text{sig} \leq 0$ ) کمتر از سطح معناداری یا احتمال خطا ( $\text{sig} \leq 0$ ) می‌باشد. لذا می‌توان فرضیه صفر را که بیان کننده عدم وجود رابطه خطی میان ارتعاش و متغیرهای مستقل است را رد کرده و نتیجه‌گیری کرد که حداقل یکی از ضرایب رگرسیون صفر نمی‌باشد. معنی داری هر یک از متغیرهای مستقل با آزمون  $t$  با سطح اعتماد ۹۰ درصد انجام شد. از آنجا که مقدار  $t$ های به دست آمده از متغیرهای مستقل، بزرگتر از مقدار  $t$  جدول توزیع (برابر با ۱/۶۸) بوده و همچنین کمتر بودن مقادیر معنی داری یا خطا در رد فرضیه صفر برای هر یک از متغیرهای مستقل مسئله ( $\text{sig} \leq 0/1$ ) از مقدار سطح معنی داری ( $\alpha=0/1$ )، می‌توان فرضیه صفر بودن ضرایب متغیرهای مستقل را رد کرد.

شکل انشان داده شده است) افزایش یافته و به دنبال آن ارتعاش نیز افزایش می‌یابد. در یک چنین شرایطی، ترک‌های جانبی و شعاعی گسترش یافته و به دنبال آن ناحیه پلاستیک وسیع‌تری در زیر دانه الماس تشکیل خواهد شد. در این حالت عمده براده‌های برش از نوع ثانویه بوده که موجب افزایش حجم براده برداری دانه الماس می‌شود. بدین ترتیب نسبت نرخ افزایش ارتعاش به حجم براده برداشته شده از سنگ با افزایش عمق برش و نرخ پیشروی کاهش یافته که این مسئله موجب کاهش ارتعاش ویژه در فرایند برش می‌شود. دلایل فوق را می‌توان به طور مشابه در نتایج تحقیق محققین دیگر نیز مشاهده کرد [۸ و ۳].

#### ۴. ارائه مدل‌های آماری غیرخطی

روابط ۵ و ۶ مدل‌های رگرسیون غیرخطی حاصل از تحلیل‌های آماری جهت بررسی ارتباط میان سیگنال‌های ارتعاشی و پارامترهای عملیاتی را نشان می‌دهند.

$$RMSa_z = 10^{-2.541} \times \frac{F_r^{0.677} \times D_c^{0.414}}{P_s^{0.123}} \quad (5)$$

$$SRMSa_z = 10^{-2.993} \times \frac{P_s^{0.333}}{F_r^{0.338} \times D_c^{0.569}} \quad (6)$$

جدول ۳. نتایج حاصل از بررسی‌های آماری برای مدل‌های پیش‌بینی ارتعاش.

Model	Coefficient	Standard error	F	Sig	F-Table	t	sig	t-Table	R <sup>2</sup>
Model 1	constant number	-2.54	0.374			-6.8	0		
	$F_r$	0.67	0.037	132.5	0	4.61	18.18	0	1.68
	$D_c$	0.41	0.051				8.05	0	
	$P_s$	-0.123	0.118				-2.49	0.03	
Model 2	constant number	-2.99	0.68			-4.38	0		
	$D_c$	-0.569	0.04	77.8	0	4.61	-11.9	0	1.68
	$F_r$	-0.338	0.035				-9.5	0	
	$P_s$	0.333	0.214				2.55	0.1	

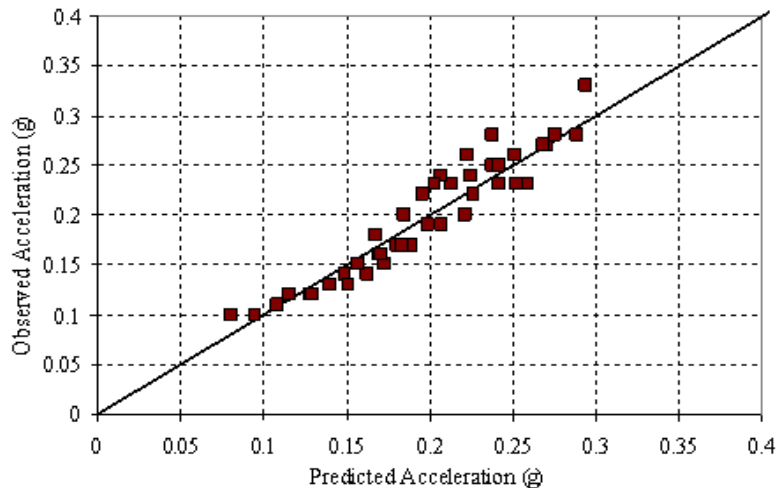
را برای هر یک از مدل‌های پیش‌بینی نشان می‌دهد هرچه تراکم این نقاط نسبت به خط نیم ساز بیشتر باشند مدل از دقت بهتری برخوردار می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی‌ها

جدول ۳- یکی دیگر از روش‌های ارزیابی مدل‌های آماری پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم ساز ۱:۱ می‌باشد. شکل‌های ۶ و ۷ پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده

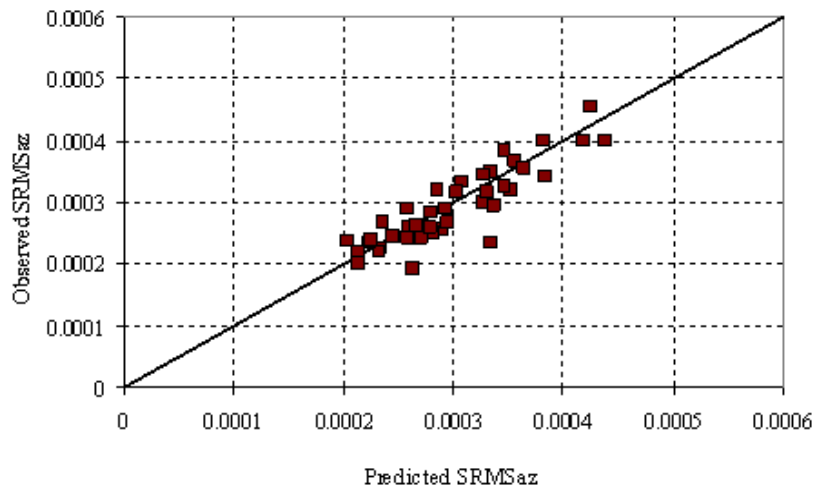


همچنین با توجه به اختلاف پائین میان مقادیر پیش بینی شده و واقعی، دقت مدل‌های فوق را می‌توان قابل قبول ارزیابی نمود.

حاکمی از وجود خطای ۷/۹۴ و ۸/۹۱ درصد به ترتیب برای مدل‌های ۱ و ۲ در پیش بینی میزان ارتعاشات می‌باشد. از آنجائیکه تاکنون مدل‌هایی جهت پیش بینی ارتعاشات در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی مشاهده نشده است و



شکل ۶. پراکندگی مقادیر  $RMS_{az}$  واقعی در مقابل مقادیر پیش بینی شده نسبت به خط نیم ساز ۱:۱.



شکل ۷. پراکندگی مقادیر  $SRMS_{az}$  واقعی در مقابل مقادیر پیش بینی شده نسبت به خط نیم ساز ۱:۱.

##### ۵. بحث و نتیجه گیری

این تحقیق نشان داد که، با افزایش مقدار پارامترهای عملیاتی نظیر عمق برش و نرخ پیشروی مقدار شدت ارتعاشات افزایش می‌یابد. این در حالی است که در نقطه مقابل مقدار شدت ارتعاشات ویژه روندی کاهشی را دنبال می‌کند. دلیل این امر را می‌توان در مکانیزم برش و سهولت تشکیل تراشه در عمق برش و نرخ پیشروی بالا دانست. شیب تغییرات در

تاکنون مطالعات جامعی در ارزیابی ارتعاشات به ویژه ارتباط آن با مشخصات عملیاتی صورت گرفته نشده است. تحقیق حاضر را می‌توان ادامه مطالعات پیشین با نگرشی خاص به مشخصات عملیاتی با کمک مطالعات آماری برای نمونه سنگ‌های نرم عنوان کرد. نتایج حاصل از بررسی‌های اولیه در

شده و نقاط واقعی نسبت به خط نیم ساز ۱:۱ نشان از دقت خوب مدل‌ها با خطای کمتر از ۱۰ درصد در پیش بینی مقادیر ارتعاش داشتند. به علاوه هر یک از مدل‌ها از ضریب تبیین خوب (۰/۸۷ و ۰/۹۲) با سطح معنی داری قابل قبول برخوردار بودند. ضرایب اختصاص داده شده به هر یک از متغیرها در مدل‌ها منطبق بر منطق حاکم بر فرایند برش می‌باشند. با استفاده از مدل‌های ارائه شده می‌توان علاوه بر پیش بینی میزان ارتعاشات سیستم به شرایط بهینه برش با توجه به سایر پارامترهای تاثیر گذار از قبیل نرخ مصرف انرژی و هزینه‌های ابزاری نزدیک شد. به عبارت دیگر توجه به این موضوع لازم و ضروری است که برای دستیابی به یک شرایط ایده آل برش تمامی فاکتورهای موثر در کنار هم مورد بررسی قرار گرفته تا بدین وسیله بهترین شرایط برش تعیین شود.

نمودار شدت ارتعاشات نسبت به عمق برش با افزایش نرخ پیشروی افزایش چشمگیری داشته به طوری که نسبت این تغییرات در نرخ‌های پیشروی ۴۰۰ به ۱۰۰ سانتی متر بر دقیقه بیش از ۶ برابر می‌باشد. این در حالی است که تغییرات چشمگیری در مقادیر شدت ارتعاشات نسبت به تغییر نرخ پیشروی در عمق‌های مختلف برش دیده نمی‌شود. این امر را می‌توان دلیلی بر ارتباط بیشتر ارتعاش نسبت به مقادیر بالای نرخ پیشروی قلمداد کرد. در ادامه به منظور پیش بینی میزان ارتعاش و ارتعاش ویژه، مدل‌های رگرسیون غیرخطی چند متغیره ارائه شدند. بدین ترتیب میزان ارتعاشات و ارتعاشات ویژه با توجه به متغیرهایی نظیر عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت چرخش دیسک مورد ارزیابی و پیش بینی قرار گرفت. نتایج آزمون‌های آماری (آزمون  $F$  و  $t$ ) نشان از صحت ضرایب متغیرها در مدل‌ها داشتند. پراکندگی نقاط پیش بینی

## منابع

- Arnold R. N., "Cutting Tools Research: Report of Subcommittee on Carbide Tools: The Mechanism of Tool Vibration in the Cutting of Steel", *Instit. of Mech. Eng.*, 154(1) (1946)154-261.
- Aryafar, A., Mikaeil, R., Haghshenas, S.S. and Haghshenas, S.S., 2018. Application of metaheuristic algorithms to optimal clustering of sawing machine vibration. *Measurement*, 124, pp.20-31.
- Mikaeil R, Ataei M, Yousefi R. Application of a fuzzy analytical hierarchy process to the prediction of vibration during rock sawing. *Mining Science and Technology (China)*. 2011 Sep 1;21(5):611-9.
- Mikaeil, R., Ataei, M., Ghadernejad, S., Sadegheslam, G. (2014). Predicting the Relationship between System Vibration with Rock Brittleness Indexes in Rock Sawing Process, *Archives of Mining Sciences*, Vol. 59 (1), pp: 139-153
- Ozcelik Y., Kulaksiz S., Engin L. C., & Eyuboglu A.S. "Investigation into Relationship Between Cutting Depth and Vibration in Cutting Process", 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, (2001).
- Ozcelik Y., Yilmazkaya E., "The effect of the rock anisotropy on the efficiency of diamond wire cutting machines", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(4) (2011)626-636.
- Polini W., Turchetta S., "Monitoring of diamond disk wear in stone cutting by means of force or acceleration sensors", *Int. j. Adv. Manuf. Technol.*, 35(2007)454-467.
- Tobias S.A., Fishwick W., "The Chatter of Lathe Tools Under Orthogonal Cutting Conditions", *Transactions of ASME*, 80(1958)1079-1088.
- Thusty J., Polacek M., "The Stability of Machine Tools Against Self Excited Vibrations in Machining", *International Research in Production Engineering*, ASME, (1963)465-474.