

بررسی تأثیر خواص سنگ‌شناسی سنگ‌های ساختمانی گرانیتی بر سایش سگمنت‌های الماسه‌ی دیسک‌های برش

علی رضایی^۱؛ سینا قوامی^۲؛ علی فرهادیان^۳؛ ابراهیم قاسمی^{۴*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵

چکیده

در این تحقیق تأثیر برخی از خواص سنگ‌شناسی سنگ‌های ساختمانی گرانیتی ایران بر سایش سگمنت‌های الماسه‌ی دیسک‌های برش بررسی شده است. بدین منظور چهارده نمونه سنگ گرانیت تجاری پرکاربرد ایران با ترکیب کانی‌شناسی متفاوت، تهیه شد. مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی روی نمونه‌ها از طریق مطالعه مقاطع نازک انجام شد و از این طریق سه پارامتر مهم سنگ‌شناسی تأثیرگذار بر ساینده‌ی، شامل محتوای کوارتز معادل، سختی کلی موهس و متوسط اندازه دانه‌ها برای هر نمونه تعیین گردید. سپس در آزمایشگاه نمونه‌های سنگ، به وسیله دستگاه برش مجهز به دیسک دایره‌ای، برش داده شدند و از این طریق مقدار سایش سگمنت (W_s) با توجه به تغییر وزن آن قبل و بعد از برش برای هر نمونه تعیین گردید. در مرحله بعد به کمک نرم افزار آماری SPSS، ارتباط بین پارامترهای سنگ‌شناسی با سایش سگمنت از طریق مطالعات آماری تحلیل رگرسیون، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که محتوای کوارتز معادل بیشترین تأثیر را بر مقدار سایش سگمنت دارد و رابطه خطی بین این پارامتر با سایش سگمنت، رابطه‌ای مناسب و منطقی به منظور تخمین سایش ابزار برش حین برش سنگهای ساختمانی گرانیتی می‌باشد. مقدار ضریب تعیین (R^2)، برای این رابطه برابر با ۰٫۷۲۸ بدست آمد که بیانگر آن است که رابطه پیشنهادی قادر است با دقت قابل قبول سایش سگمنت را پیش‌بینی کند.

واژگان کلیدی

سنگ‌های ساختمانی گرانیتی، سایش سگمنت الماسه، خواص سنگ‌شناسی، تحلیل‌های آماری

۱- مقدمه

صفحه فولادی زائدهایی وجود دارد که سگمنت‌های الماسه عموماً بر روی آنها جوش داده می‌شوند. در اثر چرخش صفحه فولادی، عملیات برش سنگ توسط سگمنت‌های الماسه متصل به دیسک انجام می‌شود. در این فرآیند، اندرکنش ناحیه در حال برش از طریق تماس‌های سایشی بین سنگ و سگمنت الماسه و نیز مقدار پیوند سگمنت الماسه با دیسک فولادی کنترل می‌شود [۱] و [۲].

امروزه دیسک‌های الماسه دایره‌ای شکل در کارخانه‌های فرآوری سنگ ساختمانی برای برش سنگ به ابعاد دلخواه به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرعت برش بالا، انعطاف پذیری بالا، مقرون به صرفه بودن نسبت به سایر روشها و راحتی کار با آن از جمله عوامل مهم در کاربرد موفقیت آمیز این ابزار بوده است. دیسک‌های الماسه دایره‌ای شامل دو بخش اصلی می‌باشند: (۱) سگمنت‌های الماسه و (۲) صفحه (هسته) فولادی دایره‌ای شکل. بر روی محیط

* نویسنده مسئول: دانشیار گروه استخراج، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

پست الکترونیک: e_ghasemi@iut.ac.ir

دیسک‌های برش در نظر گرفته شده است.

۲- فرآیند و مکانیزم‌های برش در سنگ‌های ساختمانی

فرآیند برش سنگ یک فرآیند تریبولوژیکال^۱ است. می‌توان برش سنگ توسط سگمنت‌های الماسه را سایش ذرات تشکیل دهنده سنگ توسط عبور دانه‌های الماس روی سطح سنگ دانست. ساینده‌های سنگ جزء خواص ذاتی آنها نبوده و پارامتری رفتاری است یعنی به شرایط تریبوسیستم^۲ بستگی دارد و برای هر نوع سنگ و ابزار برش متفاوت می‌باشد [۱۶]. لذا برای درک بهتر این فرآیند و شرایط حاکم بر دانه الماس در حال برش، شناخت مکانیزم برش و پارامترهای مؤثر بر آن ضروری است. به طور کلی، فرآیند برش سنگ با استفاده از تجهیزات الماسه شامل دو مرحله است: در مرحله نخست در اثر حرکت سگمنت‌های الماسه بر روی سطح برش و اعمال نیرو و به دنبال آن تشکیل تراشه سنگ، دانه‌های الماس در داخل سنگ نفوذ می‌کنند. در طی این فرآیند، دانه الماس با خراشیدن و شکافتن سطح برش موجب تشکیل تراشه و ایجاد سطح جدید برای دانه الماس بعدی می‌شود. بدین صورت که هنگامی که سنگ توسط ابزار الماسه تحت برش قرار می‌گیرد اندرکنش مکانیکی میان ابزار و سنگ در اثر اعمال نیرو، سبب ایجاد اصطکاک میان دانه الماس و سنگ شده و نتیجه آن تغییر شکل الاستیک و پلاستیک در سنگ و نهایتاً تشکیل براده اولیه است. تغییرات نیرو به همراه پستی و بلندی‌های موجود در سطح سنگ، بی‌نظمی‌های ضخامت براده، شکسته شدن و لایه‌لایه شدن براده‌ها، اصطکاک بین سطوح و غیره باعث تغییر در شرایط برش می‌شود [۱۷]. شکل ۱ نمایی از یک دانه الماس در حال برش و اندرکنش نیروهای موجود میان دانه الماس و سطح خراشیده شده از سنگ را نشان می‌دهد.

۳- کارهای آزمایشگاهی

۳-۱- تعیین مشخصات سنگ

برای انجام این تحقیق، بلوک‌ها و قطعاتی از چهارده نوع سنگ گرانیته تجاری پرکاربرد، با ترکیب کانی‌شناسی متفاوت که از معادن مختلف سنگ ساختمانی ایران برای فرآوری به کارخانه‌های شهرک محمودآباد استان اصفهان حمل می‌شوند، انتخاب و به مقدار مورد نیاز تهیه گردید. در انتخاب بلوک‌ها دقت شد که عاری از هر نوع هوازگی و ترک باشند.

شناخت کامل سنگ‌های ساختمانی و مواد تشکیل دهنده سگمنت‌های الماسه و همچنین عوامل تاثیرگذار بر سایش سگمنت‌ها، طراحان و برنامه‌ریزان تولید را به سمت بهبود سرعت فرآوری و افزایش تولید و کاهش هزینه‌ها سوق می‌دهد. نیاز به تولید بیشتر، کیفیت بالاتر و قیمت مناسب‌تر برای رقابت موثر در بازار، مستلزم استفاده از تکنولوژی و ابزارهای پیشرفته در بخش استخراج و فرآوری سنگ است [۳]. به کارگیری صحیح ابزار برش و شناخت و بررسی دقیق عملکرد آن می‌تواند به بالا بردن بازدهی و کیفیت سنگ‌های فرآوری شده کمک کند.

یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌ها به ویژه در فرآوری سنگ‌های ساختمانی گرانیته، استهلاک و از بین رفتن ابزارهای برش است. بطوریکه بیش از ۲۵ درصد هزینه‌های فرآوری سنگ را به خود اختصاص داده است [۴]. بر این اساس، در گذشته مطالعات زیادی در مقیاس صنعتی و آزمایشگاهی در مورد عوامل مؤثر بر سایش ابزار حین فرآیند برش انجام شده است. اما تاکنون در مورد عامل اصلی در سایش این نوع از ابزارها اتفاق نظر وجود ندارد. کنستانتی [۵] و وانگ و همکاران [۶] سایش ابزار برش را عمدتاً ناشی از پارامترهای عملیاتی حین برش مانند مقدار نیرو و سرعت دیسک می‌دانند. برخی دیگر مانند لان و همکاران [۷] و وب [۸] مشخصات و جنس ابزار را عامل سایش آن معرفی کرده و افرادی مانند آنور [۹] و دلگادو و همکاران [۱۰] خواص سنگ‌ها را عامل اصلی سایش توصیف کرده‌اند. به طور کلی پارامترهای مؤثر در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی شامل مشخصات سنگ، پارامترهای عملیاتی، مشخصات طرح برش و مشخصات مدیریتی از قبیل مهارت اپراتور و شرایط محیطی کار است [۱۱] و [۱۲]. همچنین مشخصات دیسک‌های برش شامل اندازه و شکل دانه‌های الماس، تراکم الماس و سختی ماده اتصال دهنده، تعیین کننده‌ی عملکرد این نوع ابزارها می‌باشند [۱۳]. از طرفی دیگر، خاصیت ساینده‌ی سنگ‌ها به عنوان پارامتر غیر قابل کنترل، تعیین کننده میزان سایش ابزار، مقدار انرژی مخصوص مورد نیاز برای برش و نهایتاً پیشروی و قابلیت برش محسوب می‌شود. از بین تمامی عوامل مؤثر در فرآیند برش سنگ، خصوصیات سنگ شامل خواص سنگ شناسی، فیزیکی و مکانیکی از مهمترین پارامترهایی هستند که در حدود بیش از نیمی از مطالعات بررسی شده‌اند [۱۴] و [۱۵]. لذا این موضوع نشان از اهمیت خواص سنگ‌ها در میزان سایش ابزار حین فرآیند برش دارد. بر این اساس، مطالعه حاضر سعی دارد با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل‌های آماری به بررسی تاثیر برخی از خواص مهم سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی سنگ‌های ساختمانی گرانیته پرکاربرد ایران بر میزان سایش دیسک‌های الماسه دایره‌ای بپردازد. در این مطالعه، محتوای کوارتز معادل، سختی موهس و متوسط اندازه دانه‌ها به منظور بررسی تاثیر خواص سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی بر میزان سایش سگمنت‌های الماسه

¹ Tribological

² Tribo-system

این است که هر کانی با توجه به سختی رزیوال چه درصدی از ساینده‌گی ناشی از کوارتز را ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است که معمولاً نوع و مقدار کانی‌های تشکیل دهنده سنگ، با استفاده از آنالیزهای مقطع نازک تعیین می‌گردد. لذا محتوی کوارتز معادل سنگ‌ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$EQC = \sum_{i=1}^n V_i R_i \quad (1)$$

که در اینجا V_i درصد کانی i ، R_i سختی روزیوال و n تعداد کانی‌های موجود در سنگ است.

۳-۳- سختی کلی موهس

مقاومت کانی یا سنگ در مقابل نفوذ و یا خراش ابزار را سختی می‌گویند. سختی یکی از خواص سنگ است که نشان دهنده مقاومت سنگ در مقابل تغییر شکل‌های دائمی می‌باشد [۲۰]. سختی واقعی و علمی سنگ با مطالعه مقاطع نازک و بررسی ترکیب کانی شناسی به دست می‌آید. مرسوم‌ترین و ساده‌ترین

مقیاس برای ارزیابی سختی کانی‌ها، مقیاس سختی موهس (H_i) است. این مقیاس بر اساس قابلیت هر کانی در ایجاد خراش بر روی کانی‌های دیگر، ارائه شده است.

بنابراین در این تحقیق از مقیاس سختی موهس برای ارزیابی سختی استفاده شد.

بدین ترتیب که پس از تعیین مقادیر کانی‌ها تشکیل دهنده سنگ با استفاده از مطالعه مقاطع نازک، سختی موهس متوسط هر سنگ، با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$MH = \sum_{i=1}^n A_i \times H_i \quad (2)$$

که در آن A_i مقدار کانی i ، H_i عدد سختی موهس کانی‌ها و n تعداد کانی‌های موجود در سنگ است [۲۰].

۳-۴- اندازه معادل دانه‌ها

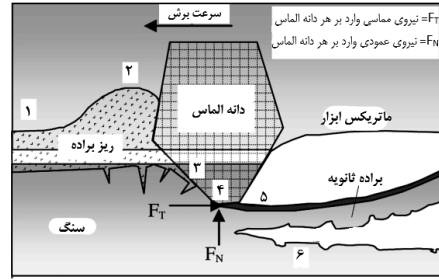
یکی از کاربردهای مقاطع نازک، به دست آوردن اندازه معادل دانه‌های تشکیل دهنده سنگ می‌باشد. برای این کار، ابتدا قطر معادل آنها با استفاده از رابطه ۳ بدست آورده شد [۲۱]:

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4S_i}{\pi}} \quad (3)$$

که در اینجا D_{eq} قطر معادل (میلی‌متر) و S_i مساحت دانه‌ها (میلی‌متر مربع) می‌باشد.

در نهایت، برای به دست آوردن اندازه معادل دانه‌های هر نمونه سنگ از رابطه سوسا^۲ به صورت زیر استفاده شد [۲۱]:

$$G_s = D_{eq(Q)} \times P_{(q)} + D_{eq(kf)} \times P_{(kf)} + D_{eq(f)} \quad (4)$$



۱- ناحیه اصطکاک بین ریز براده‌ها و ماتریکس ابزار ۲- ناحیه اصطکاک بین سنگ و دانه الماس ۳- ناحیه سایش یافته توسط ریز براده‌ها و ریز تراشه‌ها ۴- ناحیه تغییر شکل پلاستیک ۵- ناحیه تغییر شکل الاستیک ۶- ناحیه تغییر شکل الاستیک

شکل ۱- اندرکنش بین ابزار و سطح سنگ حین عملیات برش [۱۷]

لازم به توضیح است که گرانیته دارای دو مفهوم علمی و تجاری می‌باشد. گرانیته در تعریف علمی به سنگ‌های آذرین بلوری و سختی گفته می‌شود که از کوارتز، فلدسپارها و کانی‌های فرعی مانند میکا تشکیل شده باشد. اما از نگاه تجاری به همه سنگ‌های آذرین بلوری، بدون در نظر گرفتن ترکیب کانی‌شناسی، که قابلیت صیقل‌پذیری داشته باشند گرانیته اطلاق می‌شود [۲]. و تمرکز اصلی آزمایش‌ها و تهیه نمونه‌ها روی مورد اخیر است. پس از آماده‌سازی نمونه‌های مختلف، به منظور شناسایی دقیق نمونه‌ها و تاثیر عوامل کانی‌شناسی بر مقدار ساینده‌گی سنگ، مقاطع نازک نمونه‌ها تهیه و سپس با استفاده از میکروسکوپ پولاریزان با بزرگنمایی $40\times$ و مجهز به نور عبوری، تصاویر معرف گرفته شد. پیش از تهیه تصاویر، بررسی های اولیه جهت شناسایی اجزای تشکیل‌دهنده سنگ‌های مورد مطالعه و خصوصیات بافتی آنها روی مقاطع نازک انجام گرفت و بدین ترتیب بخشی از مقاطع که معرف کل بودند، شناسایی و از آن محل‌ها عکس‌برداری شد. با توجه به ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌ها، طبقه‌بندی سنگ‌شناسی آنها با استفاده از سیستم طبقه‌بندی اشتريکایزن^۱ انجام شد [۱۸]. همچنین با استفاده از مقاطع نازک، بافت‌های اصلی و فرعی سنگ‌ها زیر میکروسکوپ تعیین گردید. در جدول ۱، خلاصه‌ای از مشخصات، ترکیب کانی‌شناسی و نوع بافت اصلی نمونه‌ها، ارائه شده است. نتایج مطالعات مقاطع نازک نشان می‌دهد که همه نمونه‌ها جزء سنگ‌های آذرین بوده و اغلب دارای کانی‌های کوارتز، فلدسپات پتاسیم، پلازیوکلاز و بیوتیت می‌باشند.

۳-۲- محتوای کوارتز معادل

سایش ابزارهای فولادی اغلب توسط کانی‌هایی با سختی موهس بیشتر از ۵/۵ ایجاد می‌شود. از میان کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها، کوارتز با سختی موهس هفت، بیشترین فراوانی را در سنگ‌های مختلف دارد. علاوه بر کوارتز سایر کانی‌های تشکیل دهنده سنگ در فرآیند سایش نقش دارند [۱۹]. لذا مبنای شاخص کوارتز معادل بر

² Sousa

¹ Streckeisen

درصد محتوی آنها در سنگ می‌باشند.

که در اینجا $D_{eq}(Q)$ ، $D_{eq}(kf)$ و $D_{eq}(pl)$ به ترتیب قطر معادل کانی‌های کوارتز، فلدسپات پتاسیم و پلاژیوکلاز و P_q ، P_{kf} و P_{pl}

جدول ۱ - ترکیب کانی‌شناسی و نوع بافت اصلی نمونه‌های مورد مطالعه

نمونه	نام تجاری	نام علمی	ترکیب کانی‌شناسی و بافت
۱	گرانیت مشکی نطنز	دیوریت	کانی‌ها: کوارتز ۱۰٪، پلاژیوکلاز ۶۰٪، آمفیبول ۱۵٪، بیوتیت ۵٪، اوپاک ۷٫۵٪، پیروکسن ۲٫۵٪. بافت اصلی: دانه‌ای
۲	گرانیت سفید نطنز	گرانودیوریت	کانی‌ها: کوارتز ۲۳٪، پلاژیوکلاز ۵۱٪، فلدسپات پتاسیم ۵٪، آمفیبول ۸٪، بیوتیت ۱۰٪، اوپاک ۳٪. بافت اصلی: دانه‌ای
۳	گرانیت خرم‌دره	سینوگرانیت	کانی‌ها: کوارتز ۲۰٪، پلاژیوکلاز ۱۵٪، فلدسپات پتاسیم ۵۰٪، تورمالین ۵٪، بیوتیت ۸٪، اوپاک ۲٪. بافت اصلی: دانه‌ای
۴	گرانیت نهبدان	گرانیت	کانی‌ها: کوارتز ۲۸٪، پلاژیوکلاز ۲۶٪، فلدسپات پتاسیم ۳۵٪، بیوتیت ۱۱٪. بافت اصلی: دانه‌ای
۵	گرانیت تایباد	سینوگرانیت	کانی‌ها: کوارتز ۳۰٪، پلاژیوکلاز ۲۰٪، فلدسپات پتاسیم ۴۵٪، بیوتیت ۵٪. بافت اصلی: دانه‌ای
۶	گرانیت بروجرد لرستان	گرانیت	کانی‌ها: کوارتز ۲۲٪، پلاژیوکلاز ۳۸٪، فلدسپات پتاسیم ۳۰٪، بیوتیت ۸٪، کلریت ۲٪. بافت اصلی: دانه‌ای
۷	گرانیت زاهدان	گرانیت	کانی‌ها: کوارتز ۴۷٫۵٪، پلاژیوکلاز ۲۳٪، فلدسپات پتاسیم ۱۹٪، مسکویت ۷٫۵٪، بیوتیت ۳٪. بافت اصلی: دانه‌ای
۸	گرانیت قرمز یزد	آندزیت	ماتریکس: اکسید آهن ۶۰ درصد، فنوکریست: کوارتز ۲۰٪، پلاژیوکلاز ۱۵٪، بیوتیت ۳٪، اوپاک ۲٪. بافت اصلی: پرفیری
۹	گرانیت مروارید مشهد	گرانیت	کانی‌ها: کوارتز ۲۳٫۵٪، پلاژیوکلاز ۱۹٪، فلدسپات پتاسیم ۴۳٫۵٪، مسکویت ۵٫۵٪، بیوتیت ۸٫۵٪. بافت اصلی: دانه‌ای
۱۰	گرانیت شقایق نهبدان	مونزونیت	کانی‌ها: کوارتز ۱۹٪، پلاژیوکلاز ۳۳٫۵٪، فلدسپات پتاسیم ۳۶٪، اپیدوت ۵٪، بیوتیت ۴٫۵٪، اوپاک ۲٪. بافت اصلی: دانه‌ای
۱۱	گرانیت طوسی آستان	گرانیت	کانی‌ها: کوارتز ۴۰٪، پلاژیوکلاز ۲۰٪، فلدسپات پتاسیم ۲۸٪، بیوتیت ۵٪، مابقی ۷٪. بافت اصلی: دانه‌ای
۱۲	گرانیت پرتقالی نهبدان	گرانیت	کانی‌ها: کوارتز ۴۰٪، پلاژیوکلاز ۲۵٪، فلدسپات پتاسیم ۳۰٪، بیوتیت ۳٪، کلریت ۲٪. بافت اصلی: دانه‌ای
۱۳	گرانیت هلویی زنجان	سینیت	کانی‌ها: کوارتز ۸٪، پلاژیوکلاز ۸٪، فلدسپات پتاسیم ۷۵٪، آمفیبول ۶٪، اوپاک ۳٪. بافت اصلی: دانه‌ای
۱۴	گرانیت مراغه	سینوگرانیت	کانی‌ها: کوارتز ۲۵٪، پلاژیوکلاز ۱۶٪، فلدسپات پتاسیم ۵۴٪، مسکویت ۲٪، بیوتیت ۳٪. بافت اصلی: دانه‌ای

سایش سگمنت (W_s) بر حسب گرم بر متر در نظر گرفته شد. شکل ۲ دستگاه برش مستقر در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده معدن دانشگاه صنعتی اصفهان را نشان می‌دهد که در آن عملیات برش توسط دیسک دایروی به قطر ۱۸۰ میلی‌متر و مجهز به سگمنت‌های الماسه انجام می‌شود.

با استفاده از روابط ۱ الی ۴، مقادیر محتوی کوارتز معادل، سختی موهس و اندازه دانه‌ها محاسبه شد. این نتایج به همراه مقادیر

۵-۳- عملیات برش

به منظور تعیین پارامتر سایش دیسک، از سنگ‌های مورد مطالعه، تایل‌هایی به ضخامت دو سانتیمتر تهیه شد. سپس به وسیله دیسک‌های الماسه، برش‌هایی به طول سه متر بر روی هر نمونه انجام و وزن دیسک قبل و بعد از هر برش اندازه‌گیری شد. این آزمایش برای هر نمونه سنگ سه مرتبه تکرار و مقدار متوسط آن به عنوان

سایش دیسک در جدول ۲ ارائه شده است.

و G_s با W_s مورد بررسی قرار گرفت. مقدار ضریب تعیین (R^2) برای هر یک از فرم‌ها در جدول ۳ آورده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار این ضریب و مناسب‌ترین ارتباط از نوع خطی و متعلق به پارامتر محتوی کوارتز معادل است ($R^2 = 0.728$)؛ یعنی با افزایش محتوای کوارتز معادل سنگ‌ها مقدار سایش ابزار برش افزایش می‌یابد (رابطه ۵).

جدول ۲- نتایج مطالعات آزمایشگاهی

نمونه	EQC (%)	MH	G_s (mm)	W_s (g/m)
۱	۳۸.۵۸	۵.۴۴	۱.۳۲	۰.۲۸۵
۲	۴۶.۲۰	۵.۷۱	۱.۵۸	۰.۲۵۸
۳	۴۸.۹۷	۵.۸۸	۱.۷۱	۰.۲۶۴
۴	۴۹.۸۳	۵.۹۵	۱.۵۵	۰.۴۰۲
۵	۵۲.۹۵	۶.۱۴	۱.۹۳	۰.۴۴۱
۶	۴۶.۱۴	۵.۸۹	۱.۷۸	۰.۳۰۰
۷	۶۲.۶۰	۶.۱۲	۲.۸۳	۰.۵۳۵
۸	۴۱.۱۷	۵.۷۹	۰.۴۲	۰.۲۴۴
۹	۴۵.۹۴	۵.۷۸	۰.۶۹	۰.۳۳۷
۱۰	۴۷.۲۹	۵.۹۴	۱.۰۳	۰.۳۹۶
۱۱	۵۷.۹۵	۶.۰۴	۳.۹۲	۰.۴۷۱
۱۲	۵۹.۳۹	۶.۲۳	۳.۳۳	۰.۳۹۵
۱۳	۳۹.۷۵	۵.۸۹	۲.۰۶	۰.۱۹۲
۱۴	۴۹.۷۰	۶.۰۹	۲.۰۷	۰.۳۹۶



شکل ۲- نمایی از دستگاه برش و دیسک مورد استفاده در تحقیق

۴- مطالعات آماری

به منظور بررسی تاثیر خواص سنگ‌شناسی نمونه‌ها بر سایش ابزار حین فرآیند برش، مطالعات آماری بر روی نتایج آزمایشگاهی انجام شد. این مطالعات با استفاده از نرم افزار آماری SPSS V.26 و در دو بخش رگرسیون تک متغیره و رگرسیون چند متغیره صورت گرفت.

۴-۱- رگرسیون تک متغیره

در این بخش از تحقیق، ارتباط بین مشخصات سنگ‌شناسی نمونه‌ها و سایش دیسک توسط آنالیز رگرسیون تک متغیره انجام شد. برای این منظور از چهار فرم متداول رگرسیون ساده یعنی خطی، لگاریتمی، نمایی و توانی بهره گرفته شد و ارتباط بین MH ، EQC و W_s به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$W_s = -0.219 + 0.012EQC \quad (5)$$

اما در مورد دو پارامتر دیگر یعنی سختی موهس و متوسط اندازه دانه‌ها، همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود مقادیر ضریب تعیین به مراتب کمتر است که این امر نشان می‌دهد که این دو پارامتر نسبت به محتوای کوارتز معادل تاثیر کمی در سایش ابزار برش دارند.

جدول ۳- ضریب تعیین بین سایش دیسک و محتوای کوارتز معادل، سختی موهس و اندازه دانه‌ها در فرم‌های مختلف رگرسیونی

فرم رگرسیون	EQC (%)	MH	G_s (mm)
خطی	۰.۷۲۸	۰.۴۳۳	۰.۲۹۸
لگاریتمی	۰.۷۲۵	۰.۴۲۴	۰.۲۳۸
توانی	۰.۷۲۵	۰.۴۶۲	۰.۲۵۵
نمایی	۰.۷۱۴	۰.۴۶۷	۰.۳۰۴

در شکل ۳ ارتباط بین متغیرها با سایش دیسک براساس روابط با بیشترین ضریب تعیین، نشان داده شده است.

۴-۲- رگرسیون چند متغیره

رگرسیون چند متغیره روشی برای بررسی اثر متغیرهای متعدد بر روی متغیر پاسخ می‌باشد. از این‌رو برای بررسی تأثیر همزمان عوامل مختلف بر روی خواص مهندسی سنگ روشی مناسب به نظر می‌آید. هدف اصلی از این روش برآورد یک رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی می‌باشد. به طور کلی تحلیل رگرسیون چند متغیره به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی می‌شود. رگرسیون چند متغیره خطی ارتباط خطی بین پارامترهای ورودی و خروجی را بررسی و ارزیابی می‌کند در حالی که رگرسیون چند متغیره غیرخطی یک روش برای به دست آوردن رابطه غیرخطی بین پارامترهای مستقل و وابسته می‌باشد. در این تحقیق، به منظور بررسی همزمان پارامترهای مستقل بر پارامتر وابسته، از رگرسیون چند متغیره نیز استفاده شد. لازم به ذکر است به دلیل همبستگی ضعیف پارامترهای سختی و اندازه دانه‌ها با مقدار سایش دیسک، رگرسیون چند متغیره غیرخطی انجام نشد.

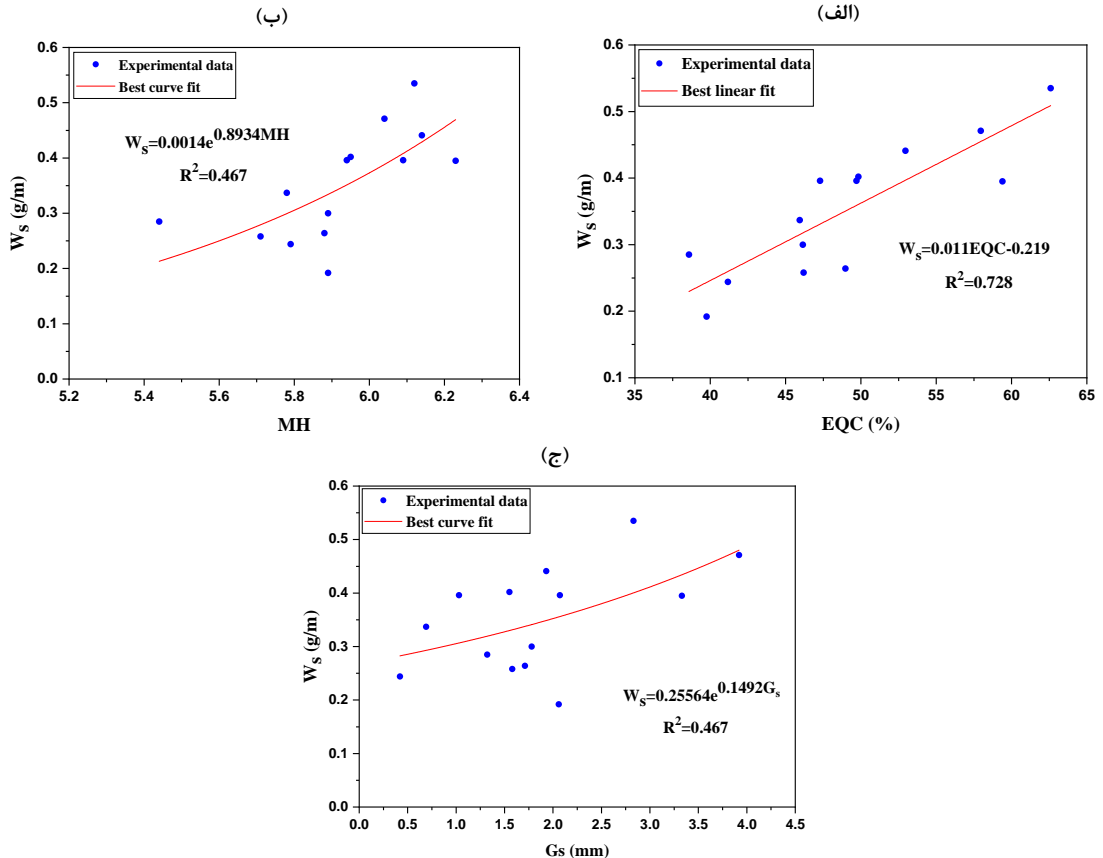
در رگرسیون چند متغیره خطی، ارتباط بین پارامترهای ورودی (متغیرهای مستقل) و پارامتر خروجی (متغیر وابسته) به صورت

رابطه ۶ است:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n \quad (6)$$
 که در اینجا X_1, X_2, \dots, X_n متغیرهای مستقل و $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ ضرایب رگرسیونی متغیرهای مستقل و Y متغیر وابسته می‌باشد. با وارد کردن داده‌های آموزش به نرم افزار SPSS و انجام تحلیل رگرسیونی چند متغیره می‌توان ضرایب

رابطه ۶ است:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n \quad (6)$$
 که در اینجا X_1, X_2, \dots, X_n متغیرهای مستقل و $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ ضرایب رگرسیونی متغیرهای مستقل و Y متغیر وابسته می‌باشد. با وارد کردن داده‌های آموزش به نرم افزار SPSS و انجام تحلیل رگرسیونی چند متغیره می‌توان ضرایب



شکل ۳- ارتباط بین محتوای کوارتز معادل، سختی موهس و اندازه دانه‌ها با سایش سگمنت

جدول ۴- ارتباط بین سایش دیسک و محتوای کوارتز معادل، سختی و اندازه دانه‌ها در رگرسیون چند متغیره

شماره رابطه	پارامتر ورودی	رابطه	R^2
(۷)	EQC, MH	$W_s = -0.032 + 0.013EQC - 0.039MH$	۰,۷۳۱
(۸)	EQC, Gs	$W_s = -0.292 + 0.014EQC - 0.024G_s$	۰,۷۵۲
(۹)	EQC, MH, Gs	$W_s = -0.126 + 0.015EQC - 0.035MH - 0.023G_s$	۰,۷۵۴

تحقیقات گذشته نشان داده شده است که با افزایش سختی موهس و اندازه دانه‌ها قدرت ساینده‌ی سنگ زیاد خواهد شد [۲۰] و [۲۲]. بنابراین می‌توان گفت که روابط فوق با وجود داشتن مقادیر بیشتر ضرایب تعیین نسبت به روابط توسعه یافته براساس رگرسیون تک متغیره، منطقی لازم برای پیش‌بینی مقدار سایش دیسک را ندارند.

همان‌گونه که در روابط جدول ۴ ملاحظه می‌شود علامت ضرایب رگرسیون برای پارامترهای سختی موهس و اندازه دانه‌ها منفی است. این به آن معنی است که با افزایش این دو پارامتر، سایش دیسک کاهش یا به عبارتی دیگر قدرت ساینده‌ی سنگ کمتر خواهد شد. این نتیجه منطبق بر منطق مهندسی نسبت زیرا در

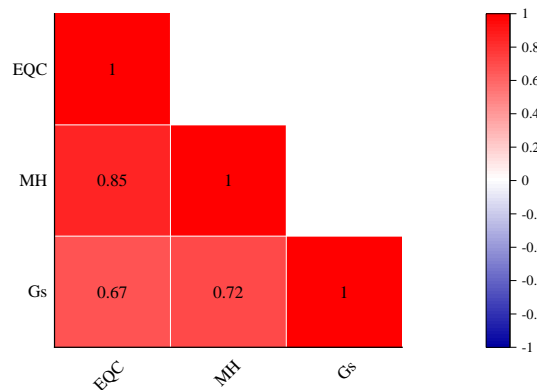
جدول ۵- مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده W_s براساس رابطه ۵

نمونه	EQC (%)	W_s (g/m)	
		واقعی	پیش‌بینی شده
۱	۳۸,۵۸	۰,۲۸۵	۰,۲۲۴
۲	۴۶,۲۰	۰,۲۵۸	۰,۳۳۵
۳	۴۸,۹۷	۰,۲۶۴	۰,۳۶۹
۴	۴۹,۸۳	۰,۴۰۲	۰,۳۷۹
۵	۵۲,۹۵	۰,۴۴۱	۰,۴۱۶
۶	۴۶,۱۴	۰,۳۰۰	۰,۳۳۵
۷	۶۲,۶۰	۰,۵۳۵	۰,۵۳۲
۸	۴۱,۱۷	۰,۲۴۴	۰,۲۷۵
۹	۴۵,۹۴	۰,۳۳۷	۰,۳۳۲
۱۰	۴۷,۲۹	۰,۳۹۶	۰,۳۴۸
۱۱	۵۷,۹۵	۰,۴۷۱	۰,۴۷۶
۱۲	۵۹,۳۹	۰,۳۹۵	۰,۴۹۴
۱۳	۳۹,۷۵	۰,۱۹۲	۰,۲۵۸
۱۴	۴۹,۷۰	۰,۳۹۶	۰,۳۷۷

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شد با انجام مطالعات آزمایشگاهی و با استفاده از روش آماری تحلیل رگرسیون، ارتباط بین سه پارامتر سنگ‌شناسی سنگ‌های ساختمانی گرانیتی شامل محتوای کوارتز معادل، سختی موهس و اندازه دانه‌ها با سایش سگمنت‌های دیسک برش، بررسی شود. برای این منظور چهارده نوع سنگ ساختمانی گرانیتی پرکاربرد ایران انتخاب و مطالعات مقاطع نازک روی آنها انجام شد. از طرفی دیگر، عملیات برش روی نمونه‌ها در آزمایشگاه به منظور تعیین میزان سایش سگمنت حین انجام برش انجام شد. بعد از انجام مراحل فوق با استفاده از رگرسیون تک متغیره و چند متغیره، مطالعات آماری روی نتایج با استفاده از نرم افزار SPSS به منظور توسعه رابطه برای پیش‌بینی سایش سگمنت براساس خواص سنگ‌شناسی صورت گرفت. نتایج رگرسیون تک متغیره نشان داد که سه پارامتر محتوای کوارتز معادل، سختی موهس و اندازه دانه‌ها ارتباط مستقیم با سایش سگمنت دارند. یعنی افزایش هر یک از این پارامترها منجر به افزایش سایش سگمنت یا به عبارت دیگر کاهش عمر آن می‌شود. براساس نتایج رگرسیون تک متغیره از میان سه پارامتر یاد شده، محتوای کوارتز معادل بیشترین تأثیر را بر سایش سگمنت دارد و رابطه توسعه یافته به فرم خطی با ضریب تعیین $0,728$ ، مناسبترین رابطه جهت پیش‌بینی سایش سگمنت می‌باشد. روابط توسعه یافته براساس رگرسیون چند متغیره نسبت به روابط رگرسیون تک متغیره، دقت

دلیل این امر وقوع پدیده هم‌خطی چندگانه^۱ در هنگام اجرای رگرسیون چند متغیره است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که دو یا بیش از دو متغیر مستقل در یک تحلیل رگرسیون چند متغیره نسبت به یکدیگر از همبستگی بالایی برخوردار باشند [۲۳]. همبستگی بین سه پارامتر محتوای کوارتز معادل، سختی موهس و اندازه دانه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود بین این سه پارامتر همبستگی نسبتاً بالایی وجود دارد. یکی از راهکارها به منظور رفع مشکل هم‌خطی چندگانه استفاده از رگرسیون گام به گام^۲ می‌باشد. در روش گام به گام، تنها متغیرهای مستقلی که بیشترین ارتباط را با متغیر وابسته دارند به منظور توسعه رابطه در نظر گرفته می‌شوند. با اجرای رگرسیون گام به گام بر روی داده‌ها، تنها متغیر محتوای کوارتز معادل به عنوان مؤثرترین پارامتر بر سایش سگمنت شناسایی و دو متغیر دیگر به دلیل همبستگی کمتر با متغیر وابسته، از رابطه حذف شدند. نهایتاً رابطه‌ای مانند رابطه ۵ برای پیش‌بینی مقدار سایش سگمنت‌های برش پیشنهاد گردد. در جدول ۵، مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده (با استفاده از رابطه ۵) سایش سگمنت برای انواع سنگهای مورد مطالعه آورده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، این رابطه به دلیل ساده بودن و نیز دقت قابل قبول، می‌تواند به راحتی جهت تخمین سایش سگمنت و بهبود عملکرد فرآیند برش مورد استفاده مهندسان حوزه سنگ‌های ساختمانی قرار گیرد.



شکل ۴- همبستگی بین خواص سنگ‌شناسی

¹ Multicollinearity

² Stepwise regression

رگرسیون چند متغیره به روش گام به گام، همان رابطه توسعه یافته توسط رگرسیون تک متغیره به منظور پیش‌بینی سایش سگمنت پیشنهاد شد. این رابطه از نظر آماری قابل اعتماد و قادر است سایش سگمنت را حین برش سنگ‌های ساختمانی گرانیتی با دقت قابل قبول پیش‌بینی کند.

بالتری داشتند ولی کاربرد این روابط به دلیل مغایر بودن علائم ضرایب رگرسیون با منطق مهندسی، صحیح نمی‌باشد. دلیل این مشکل وقوع پدیده هم‌خطی چندگانه می‌باشد. به منظور حل این مشکل، روش گام به گام برای اجرای رگرسیون چند متغیره به کار گرفته شد و براساس آن محتوای کوارتز معادل به عنوان موثرترین پارامتر بر سایش سگمنت تعیین شد. به عبارتی دیگر، براساس

۶-منبع‌ها

- Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, California, 2015.*
- [12] Aydin, G., Karakurt, I., Aydiner, K. "Wear performance of saw blades in processing of granitic rocks and development of models for wear estimation". *Rock mechanics and rock engineering*, 2013, 46: p. 1559-1575.
- [۱۳] ر. یوسفی، «تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر سایش ابزار در فرآیند برش سنگ گرانیت یزد»، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، جلد ۴۰ شماره ۶، صفحات ۹۰۷-۹۱۴.
- [14] Sun, Q., Zhang, J., Wang, Z., Zhang, H., Fang, J., "Segment wear characteristics of diamond frame saw when cutting different granite types". *Diamond and related materials*, 2016. 68: p. 143-151.
- [15] Bayram, F., Kulaksiz, S., "Evaluation of rock cutting performance of diamond segmented frame saw in terms of diamond segment wear". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021. 139: 104657.
- [16] Kuisma, R., Redsvén, I., Pesonen-Leinonen, E., Sjöberg, A.M., Hautala, M., "A practical testing procedure for durability studies of resilient floor coverings". *Wear*. 2005, 258: p. 826-834.
- [17] Ersoy, A., Buyuksagic, S., Atici, U., "Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks". *Wear*. 2005. 258: p. 1422-1436.
- [18] Streckeisen, A., "To each plutonic rock its proper name". *Earth-science reviews*, 1976. 12 (1): p.1-33.
- [19] Thuro, K., "Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunnelling". *Geologische Rundschau*, 1997. 86: p. 426-438.
- [20] Farhadian, A., Ghasemi, E., Hoseinie, S.H., Bagherpour, R., "Development of a new test method for evaluating the abrasivity of granite building stones during polishing process based on weight loss of abrasive tool". *Construction and Building Materials*, 2021. 303: 124497.
- [21] Sousa, L.M., "The influence of the characteristics of quartz and mineral deterioration on the strength of granitic dimensional stones". *Environmental earth sciences*, 2013. 69(4): p.1333-1346.
- [1] Gunes Yilmaz, N., "Abrasivity assessment of granitic building stones in relation to diamond tool wear rate using mineralogy-based rock hardness indexes". *Rock mechanics and rock engineering*, 2011, 44: p. 725-733.
- [2] Gunes Yilmaz, N., Goktan, R.M., Kibici, Y., "An investigation of the petrographic and physico-mechanical properties of true granites influencing diamond tool wear performance, and development of a new wear index". *Wear*, 2011. 271: p. 960-969.
- [۳] ر. میکائیل، م. عطایی و ر. یوسفی، «ارائه رابطه‌های آماری برای پیش‌بینی قابلیت برش دیسکی سنگ‌های ساختمانی»، نشریه مهندسی معدن، شماره ۱۴، صفحات ۳۱-۴۰، ۱۳۹۱.
- [4] Rehman, Z., Hussain S., Noor, N., Reza, S., Sherin, S., "Comparative analysis of different techniques used for dimension stone mining". *Journal of Himalayan Earth Sciences*, 2018, 1: p. 23-33.
- [5] Konstanty, j., "Diamond bonding and matrix wear mechanisms involved in circular sawing of stone". *Indian Diamond Revision*, 2000, 1: p. 55-65.
- [6] Wang, CY., Wei, X., Tang, L., Pan, Z., "The role of coolant in granite sawing". *Indian Diamond Revision*, 1995. 4: p. 156-160.
- [7] Lan, S., Jinsheng, P., Changjian, L., "A new approach to improve the performance of diamond sawblades". *Materials Letters*, 2002. 57: p.1010-1014.
- [8] Webb, S., "Diamond retention in sintered cobalt bonds for stone cutting and drilling". *Diamond and related materials*, 1999. 8: p. 2043-2052.
- [9] Unver, B., "A statistical method for practical assessment of sawability of rocks". In: *proceedings of eurock'96; prediction and performance in rock mechanics and rock engineering, torino, Italy*, 2008. p. 59-65.
- [10] Delgado, N., Rodriguez L., Suarez D., Sarria L, Argandona V., "The influence of rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain)". *International Journal of Rock Mechanic and Mining Science*, 2005. 42:161-166.
- [11] Yurdakul, M., Akdas H. "The Effect of Rock Mineralogic and Petrographic Properties on Stone Cutting Feed Rate". *Paper presented at the 49th U.S.*

- [22] Yaralı, O., Yaşar, Bacak, G., Ranjith, P.g., “A study of rock abrasivity and tool wear in coal measures rocks”. *International Journal of Coal Geology*, 2008. 74(1): p. 53-66.
- [23] Bahri, M., Ghasemi, E., Kadkhodaei, M.H., Romero-Hernandez, R., Mascort-Albea, E.J.,

“Analysing the life index of diamond cutting tools for marble building stones based on laboratory and field investigations”. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021. 80: 7959-7971.

