

## تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر سایش ابزار در فرآیند برش سنگ گرانیت یزد

رضا یوسفی\*<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>استادیار مرکز کارگاههای آموزشی - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت ۸۲/۱۰/۱۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۵/۵/۹، تاریخ تصویب ۸۵/۷/۸)

### چکیده

رفتار سایشی یک دیسک برش الماس نسبت به پارامترهای ماشینکاری در برش سنگ گرانیت یزد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می‌دهند که افزایش سرعت پیشروی موجب کاهش سایش دیسک برش الماس می‌شود، علت آن کاهش نسبی نیروهای برشی و کاهش تأثیر حرارت حاصله بر چسب اتصال دهنده در ابزار برشی می‌باشد. اما با افزایش سرعت برش، سایش ابزار نیز افزایش می‌یابد زیرا که حرارت حاصله و ضربه مکانیکی افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** دیسک الماس برش سنگ - سایش ابزار - سنگ گرانیت یزد

### مقدمه

بر هر دانه کاهش می‌یابد و در این صورت فاصله و فضای بیشتری برای براده‌های ایجاد شده فراهم می‌شود. در صورتی که از ابزارها دانه‌های بزرگ الماس برای برش سنگ‌های سخت استفاده شود، نفوذ دانه‌های الماس به داخل سنگ محدودتر می‌شود. در این صورت دانه‌ها از باند فلزی جدا میشوند یا دچار سایش تخت شدید می‌گردند. دانه‌های الماس به شکل کریستالهای مکعبی هشت وجهی منظم حداکثر استحکام و مقاومت در برابر سایش را از خود نشان می‌دهند. ابزارهای برشی که در آنها دانه‌های الماس با این شکل بکاررفته است، برای برش سنگهای با سختی بالا و یا برش با نرخ بالا مناسب می‌باشند. اگر ماده چسب بیش از اندازه سخت باشد، باعث می‌شود که دانه‌های الماس سریعتر از ماده چسب سایش پیدا کنند. این عمل موجب لیزش ابزار می‌گردد [۲]. در نتیجه کارکرد دیسک را با مشکل روبرو می‌سازد. از طرف دیگر، اگر ماده چسب بیش از حد نرم باشد، قبل از پایان عمر مفید ابزار، دانه الماس از چسب جدا می‌شود که اینکار هزینه ابزار را افزایش می‌دهد. بنابراین سختی ماده چسب بایستی متناسب با سختی دانه‌های الماس بگونه‌ای انتخاب شود که نرخ سایشی متناسب با سایش دانه‌های الماس داشته باشد تا برش موثر یکنواخت میسر شود. در نرخ برشهای بالا استفاده از دانه‌های متوسط با تراکم

دیسکهای الماس برش دایره‌ای به شکل گسترده‌ای در صنایع سنگ و سیمان و کاشی جهت برش، شکل دادن، پرداخت و تزئین بکار می‌روند. استفاده از این ابزارها به دلیل نرخ بالای برش، انعطاف پذیری، دقت مناسب و صرفه اقتصادی مناسب می‌باشند. بطور کلی سه عامل مهم یعنی اندازه و شکل دانه‌های الماس، تراکم الماس در چسب و سختی چسب فلزی تعیین کننده کارکرد این نوع ابزارها می‌باشند. اما برای یک ابزار مشخص عوامل دیگری مثل نوع برش (برش موافق یا مخالف)، سرعت برش، عمق برش، سرعت پیشروی، دقت ماشین، خصوصیات سنگ تحت برش، مهارت اپراتور و... نیز تعیین کننده هستند. انتخاب بهینه این عوامل برای رسیدن به حداکثر بازده فرآیند مؤثر می‌باشند. بازده فرآیند نیز با توجه به سایش ابزار، انرژی مصرفی و نرخ تولید سنجیده می‌شود. در این راستا شناخت تأثیر هر یک از این عوامل بر سایش ابزار، انرژی مصرفی و نرخ تولید در فرآیند برش سنگ لازم می‌باشد. مطالعات زیادی برای بررسی کارکرد دیسک‌های برش در سنگبری با توجه به متغیرهایی نظیر اندازه و شکل دانه‌های الماس، تراکم دانه‌های الماس و سختی چسب فلزی انجام شده است. برای سنگهای سخت نسبت به سنگهای نرم تر به اندازه‌های دانه‌های الماس کوچکتری نیاز است [۱]. با کوچکتر شدن اندازه دانه‌ها سهم بار وارد

به خاطر کلیه زحماتی که متحمل شده اند، تشکر می نمایم.

### سیستم آزمایش

نمای کلی دستگاه آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است. دستگاه آزمایش بر اساس اصول برش دایره ای ساخته شده است. قسمت‌های مختلف دستگاه بگونه ای طراحی شده است که امکان تغییر پارامترهای ماشینکاری با تغییرات جزئی در ماشین میسر باشد. اجزاء دستگاه آزمایش به شرح زیر است. بستر دستگاه حامل دو ریل راهنما برای میز ماشین می باشد. قسمت فوقانی شاسی، محل قرارگیری محور اصلی ماشین (اسپیندل) و تکیه گاه آن می باشد. قسمت تحتانی شاسی به گونه ای است که امکان جمع آوری گل، آب و براده های حاصل از برش فراهم شود.

میز متحرک دستگاه دارای سطحی تخت می باشد که قطعات سنگ جهت عملیات برش روی این صفحه ثابت می شوند. میز دستگاه توسط یک مکانیزم چرخ و زنجیر به یک موتور هیدرولیکی روی ریل دستگاه حرکت می کند. استفاده از سیستم هیدرولیک امکان کنترل و تنظیم سرعت حرکت میز که همان سرعت پیشروی می باشد را فراهم می آورد.

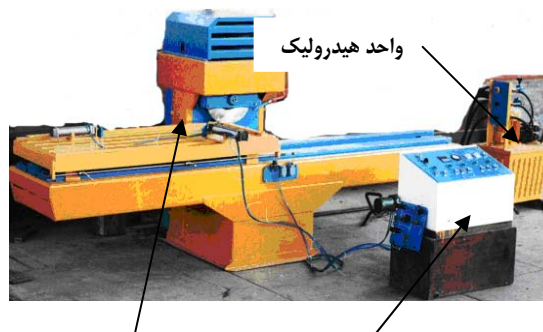
انتقال نیرو به محورها اصلی توسط پولی و تسمه لاستیکی V شکل انجام می شود. دیسک برشی در بین دو واشر چدنی توسط مکانیزم پیچ و مهره نصب و محکم می شود. کل گلوبی بر روی بستری فولادی که روی بستر اصلی یاتاقان بندی شده است ثابت می شود. یاتاقان بندی بستر گلوبی بگونه ای می باشد که امکان یک حرکت چرخشی بسیار محدود تقریباً  $8^\circ$  را به آن می دهد. موتور اصلی اسپیندل با توان  $7/5 \text{ KW}$  در بالای بستر نصب می شود. پیشروی عمودی توسط یک مکانیزم ترکیبی با یک موتور هیدرولیکی انجام می شود. این مکانیزم که پایه و اساس آن پیچ و مهره می باشد قابلیت تنظیم عمق برش با دقت  $0/01$  میلیمتر را فراهم می آورد. مهره اصلی مکانیزم همراه با یک نیروسنج مکانیکی که در هم ادغام شده اند به بستر گلوبی ماشین بسته شده است. چرخش پیچ موجب تغییر وضعیت بستر گلوبی حول محور یاتاقان آن می گردد که در نتیجه آن عمق برش نیز تغییر خواهد

بالا درچسب و در نرخ برشهای پائین استفاده از دانه های کوچک با تراکم کم در چسب باعث پایداری و ایجاد شرایط برشی مناسبی در ابزار میگردد [۳].

تعیین کننده اندازه دانه های الماس ساینده سرعت برش و سطح تمام شده مورد نیاز در سنگ تحت برش می باشد. به عنوان یک قاعده کلی، حتی الامکان از درشتترین و خشن ترین دانه های متناسب با سطح تمام شده مطلوب در سنگ استفاده می شود. برای بیشتر ابزارهای سنگ بری دانه بندی اندازه دانه های الماس مورد استفاده بین ۲۵ تا ۱۰۰ (قطر متوسط کریستال الماس  $0/15-0/75 \text{ mm}$ ) میباشد [۴].

مطالعات دیگری در ارتباط با خصوصیات سایشی و کارکرد دیسکهای برش الماس در برش سنگ توسط چندین محقق گزارش شده است [۵-۱۰].

در مورد رفتار سایشی دیسک الماس در سرعت و پیشروی و عمق برش ثابت در دو روش برش موافق (Down-Cut) و برش مخالف (Up-Cut) روی سنگ قرمز هندی آزمایشاتی انجام گرفته است و نیروهای برش عمودی، مماسی و همچنین میزان سایش دیسک مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱].

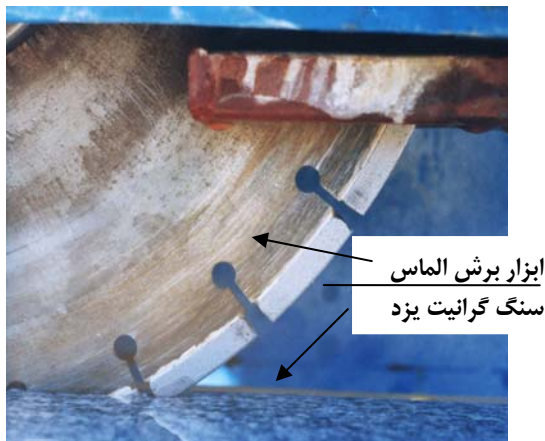


شکل ۱: نمای کلی دستگاه آزمایش.

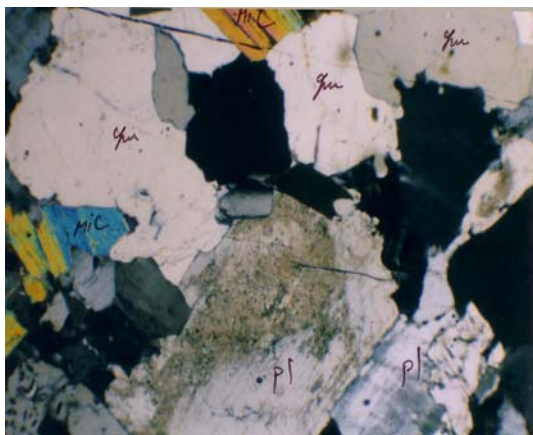
با وجود این مطالعات، بررسی رفتار سایشی دیسک الماس در برش سنگ تحت تاثیر سرعت برشی و سرعت پیشروی متغیر جای کار بیشتری دارد. در این پژوهش رفتار سایشی یک نوع دیسک برش الماس ساخت داخل تحت تاثیر این عوامل با استفاده از یک ماشین برش سنگ در فرآیند برش سنگ گرانیت یزد مورد بررسی قرار گرفته است.

در اینجا از آقای مهندس رسول عباسیان آفرانی دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه تهران

می باشد نشان داده شده است. کانی هایی مانند سنگ کوارتز به صورت بی شکل، فلدسپاتهای آلکان (قلیایی)، پلاژیوکلاز به صورت نیمه شکل دار، کانی های میکا از نوع موسکوویت و بیوتیت به صورت شکل دار بافت سنگ مورد آزمایش را تشکیل می دهند. در بعضی نقاط این سنگ کانی های سبز ( آمفیبولها) نیز دیده می شوند. قطر متوسط دانه ها ۲ تا ۳ میلیمتر می باشند. البته در بعضی نقاط این مقدار به ۵ mm نیز می رسند.



شکل ۲: ابزار برش الماس در تماس با سنگ گرانیت یزد.



شکل ۳: تصویر میکروسکوپی ریز ساختار سنگ گرانیت یزد مورد استفاده در آزمایش (بزرگنمایی ۱۵ برابر)

درصد کانیهای تشکیل دهنده سنگ گرانیت مورد نظر و سختی متوسط آن در جدول (۱) آورده شده است. گرچه خلل و فرج این سنگ بسیار کم است، اما در بافت آن ترکهای میکروسکوپی مشاهده می شوند. نمونه های آزمایشی به شکل پلاک های نازک به ضخامت ۱۷/۵ تا ۱۸/۵ میلیمتر از سنگ گرانیت موردنظر برای انجام

کرد. با استفاده از مدار هیدرولیکی می توان سرعت پیشروی عمودی را تنظیم نمود. جهت راه اندازی موتورهای محرک میز (پیشروی افقی) و بستر گلوبی (پیشروی عمودی) از یک واحد هیدرولیکی استفاده شده است. این سیستم امکان کنترل سرعت های پیشروی را فراهم می نماید. مدار الکتریکی دستگاه به گونه ای است که کنترل حرکات پیشروی ماشین را در سه حالت دستی و نیمه خودکار و تمام خود کار امکان پذیر می نماید. توسط یک شمارشگر الکترونیکی سرعت پیشروی  $V_f$  سنجیده می شود. توان مصرفی موتور اصلی با استفاده از یک آمپرسنج دقیق اندازه گیری می شود. عمق برش نیز توسط یک کلید زمانی کنترل و با استفاده از یک ساعت اندازه گیری سنجیده می شود.

### مشخصات ابزار

در آزمایشهای برش از یک دیسک فلزی به قطر ۴۱ cm و ضخامت ۲/۷ mm استفاده شده است. سگمنت های الماس آن با ابعاد ۳×۱×۴۰ mm ساخت یک شرکت داخلی است و ۲۸ عدد از آنها در پیرامون بدنه فولادی لحیم شده اند. چسب فلزی بکار رفته در سگمنت ها از آلیاژ پایه کبالت Co می باشد. پودرهای کبالت از نوع مرغوب با مش ۴۰۰ است. فلز پرکننده از آلیاژ برنز  $\alpha$  (Cu) ۹۰٪ - Sn ۱۰٪) بشکل پودرهایی با مش ۳۲۰ است که ۱۵٪ وزنی چسب فلزی را تشکیل می دهد ((Cu-Sn ۸۵٪ - ۱۵٪). دانه های الماس مصنوعی به شکل کریستالهای مکعب هشت وجهی با دانه بندی ۴۰-۵۰ و ۴۰-۳۰ با درصد وزنی برابر در چسب فلزی توزیع شده اند.

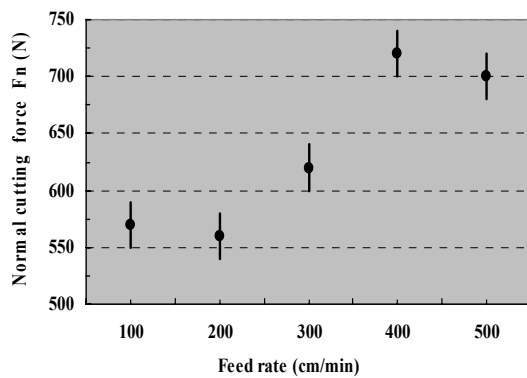
### مشخصات سنگ

سنگ مورد استفاده در این تحقیق از نوع سنگ گرانیتی سخت می باشد. این سنگ گرانیت متعلق به منطقه ای در استان یزد به نام کذاب می باشد. در شکل (۲) ابزار برشی پس از برش سنگ گرانیت یزد نشان داده شده است. با انجام آزمایشات مینرالوگرافی و تهیه مقاطع نازک از سنگ، بافت سنگ مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در شکل (۳) بافت سنگ که از نوع دانه ای

آزمایش تهیه گردیده است. گیری و ثبت شده است. در این آزمایش از سیال آب به عنوان خنک کننده استفاده شده است.

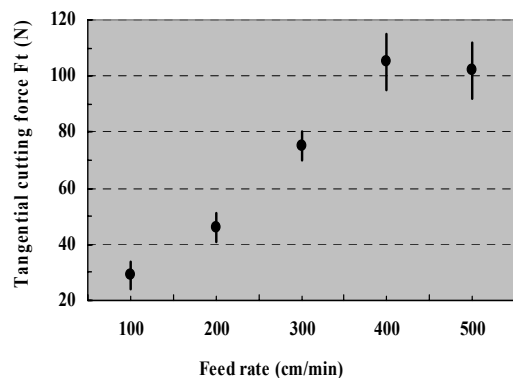
### نتایج آزمایش و بحث پیرامون آنها

با ثابت نگهداشتن دوران اسپیندل که متناسب با سرعت برش است و همچنین عمق برش میزان سایش ابزار و مقدار نیروهای برشی در سرعت های پیشروی متغییر ثبت شده است. شکل های (۴) و (۵) به ترتیب مقادیر متوسط و دامنه تغییرات نیروهای عمودی و مماسی را بر حسب تغییرات سرعت پیشروی نشان می دهند. همانطور که مشاهده می شود



شکل ۴: تغییرات نیروی عمودی برش بر حسب سرعت پیشروی ( $t=17/5 - 18/5$  mm ،  $n=1540$  rpm).

نیروهای برشی با افزایش سرعت پیشروی در ابتدا افزایش اما پس از عبور از یک مقدار حداکثر شروع به کاهش می کنند.



شکل ۵: تغییرات نیروی مماسی برش بر حسب سرعت پیشروی ( $t=17/5 - 18/5$  mm ،  $n=1540$  rpm).

شکل (۶) تغییرات نسبت نیروهای برشی ( $F_n/F_t$ ) در سرعت های پیشروی مختلف را نشان می دهد. نسبت

آزمایش تهیه گردیده است.

### جدول ۱: کانی های تشکیل دهنده سنگ گرانیات کذاب یزد و درصد ترکیب و سختی آنها در مقیاس موهس

کانی های سنگ	درصد	سختی موهس
کوارتز	٪ ۳۰	۷
فلدسپاتهای آلکالن	٪ ۴۰	۶
پلاژیوکلاز	٪ ۲۰	۶
میکا	٪ ۱۰	۲
سختی متوسط سنگ	--	۶

### روش آزمایش

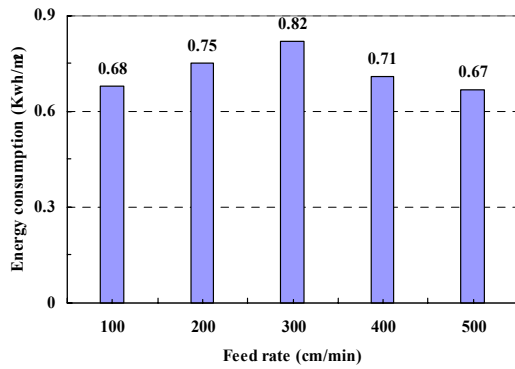
ابزار برش الماس بر روی اسپیندل دستگاه آزمایش نصب می شود. سرعت پیشروی توسط سیستم هیدرولیک در محدوده (۵۰۰-۰) cm/min با دقت ۳ cm/min قابل کنترل و تنظیم می باشد. نیروهای برشی توسط یک نیروسنج مکانیکی دست ساز با تقریب ٪۲ اندازه گیری می شوند. پس از پایان هر دوره آزمایش سایش شعاعی ابزار اندازه گیری و میزان سایش آن ثبت می شود. به منظور بررسی تاثیر پارامترهای ماشینکاری در کارایی ابزار، آزمایشاتی با شرایط آورده شده در جدول (۲) انجام شده است.

### جدول ۲: شرایط آزمایش

عمق برش (mm) (t)	سرعت پیشروی ( $V_f$ ) (cm/min)	دوران اسپیندل (n) (rpm)
۱۷/۵ - ۱۸/۵	۳۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۴۰۰	۱۵۴۰
۱۷/۵ - ۱۸/۵	۴۰۰	۱۷۵۰، ۱۵۴۰، ۲۵۵۰

همه آزمایش های برش در حالت موافق انجام گرفته است. برش موافق وقتی است که جهت های پیشروی و گردش ابزار یکی باشند.

در هر مرحله از آزمایشات قطعات سنگ گرانیات یزد به طول ۱۴۰ cm روی میز ماشین ثابت و سپس عمل برش انجام میشود. به عبارت دیگر طول هر بار برش ۱۴۰ سانتیمتر است. در هر یک از شرایط آزمایش ۴۰ بار عمل برش انجام گرفته است. مقدار سایش ابزار، نیروهای برشی و توان مصرف شده در هر مرحله با خطای ٪۲ اندازه



شکل ۸: تغییرات نرخ انرژی مصرفی بر حسب سرعت پیشروی  
( $t = 17/5 - 18/5$  mm,  $n = 1540$  rpm).

ضخامت براده میانگین و ضخامت براده معادل بر حسب سرعت پیشروی، سرعت برشی و ضخامت برش از روابط زیر بدست می آیند.

$$\bar{h} = k \cdot \frac{V_f \cdot t}{V_s} \quad (1)$$

ضخامت براده معادل

$$h_{eq} = \frac{5}{3} \cdot \frac{V_f \cdot t}{V_s} \quad (2)$$

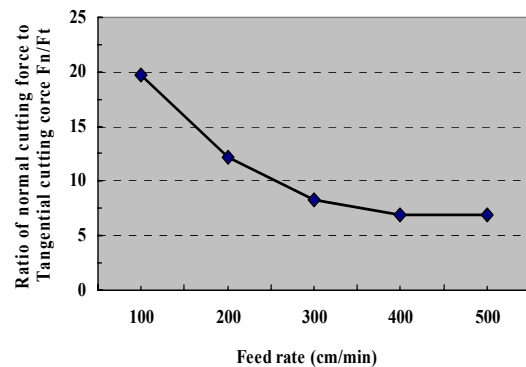
البته یک سری پیش فرض هایی در این روابط در نظر گرفته شده است که بعضی از آنها غیر واقعی است و برای ساده کردن روابط و محاسبات و اجتناب از پیچیدگیهای غیرضروری در نظر گرفته شده اند [۱۱]. پارامترهای موجود در روابط فوق به شرح زیر است:

$k$ : ضریب ثابت  $V_f$ : سرعت پیشروی

$V_s$ : سرعت برش  $t$ : عمق برش

همانگونه که مشاهده می شود، ضخامت براده با سرعت پیشروی نسبت مستقیم دارد. به عبارت دیگر با افزایش سرعت پیشروی عمق نفوذ دانه های الماس و ضخامت براده افزایش می یابد. افزایش عمق نفوذ دانه های الماس باعث افزایش نیروها و تنش های وارد به سنگ می شود که در نتیجه باعث تشکیل و رشد ترکهای جانبی و شعاعی در سنگ می گردد. تشکیل و گسترش این ترکها سبب ایجاد براده های ثانویه می شود. به عبارت دیگر با افزایش عمق نفوذ دانه های الماس درصد براده های ثانویه، براده های حاصل از شکست ترد ماده سنگ در اثر اعمال نیروهای وارد به آن و رشد ترکها، افزایش می یابد تا جایی که حجم عمده ای از براده های ایجاد شده از نوع

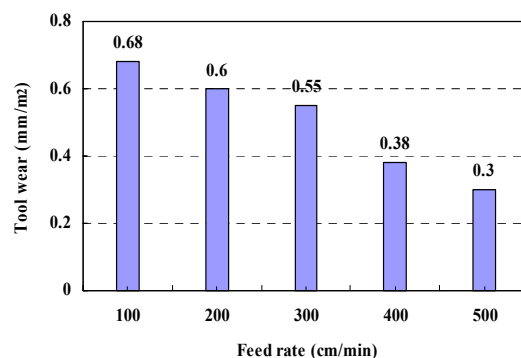
نیروهای برشی با افزایش سرعت پیشروی کاهش می یابد. به عبارتی دیسک شرایط برشی بهتری پیدا می کند به اصطلاح تیز تر می شود.



شکل ۶: تغییرات نسبت نیروهای برشی بر حسب سرعت پیشروی  
( $t = 17/5 - 18/5$  mm,  $n = 1540$  rpm).

همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است با افزایش سرعت پیشروی مقدار سایش شعاعی دیسک برشی در واحد سطح برش کاهش می یابد.

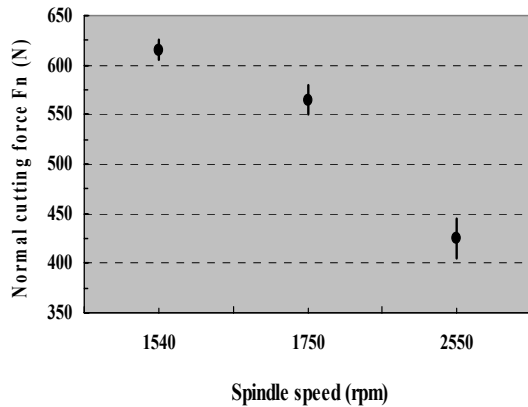
میزان انرژی الکتریکی مصرف شده در واحد سطح مقطع سنگ برش خورده بر حسب تغییرات پارامترهای ماشینکاری معیاری برای مقایسه نرخ مصرف انرژی در هر یک از شرایط آزمایش می باشد. در شکل (۸) نرخ مصرف انرژی بر حسب تغییرات سرعت پیشروی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، روند تغییرات انرژی مصرفی نسبت به سرعت پیشروی مشابه روند تغییرات نیروهای برشی بر حسب



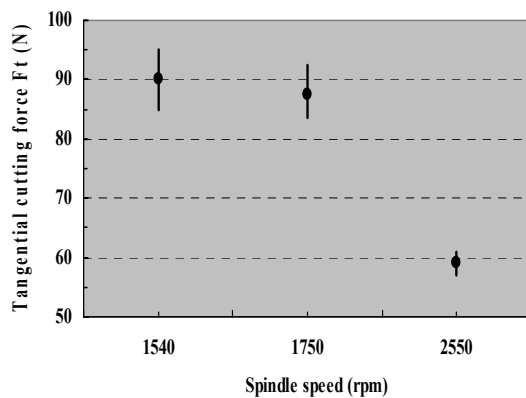
شکل ۷: تغییرات سایش ابزار بر حسب سرعت پیشروی  
( $t = 17/5 - 18/5$  mm,  $n = 1540$  rpm).

سرعت پیشروی می باشد. به این معنی که در ابتدا نرخ مصرف انرژی افزایش و پس از رسیدن به یک مقدار حداکثر کاهش می یابد.

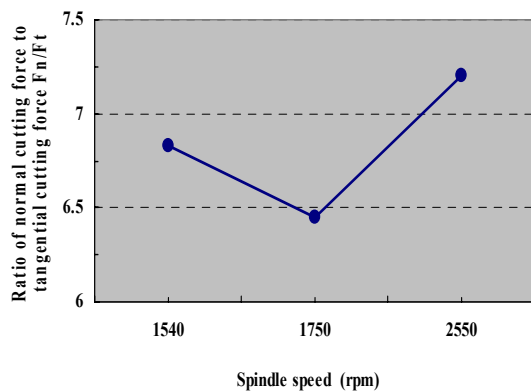
شکل (۱۱). شکل (۱۲) نشان می دهد که سایش ابزار با افزایش سرعت برشی افزایش می یابد. تغییرات نرخ مصرف انرژی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۹: تغییرات نیروی عمودی برش بر حسب تغییرات سرعت محور اصلی ( $t = 1.7/5 - 1.8/5$  mm,  $V_f = 400$  cm/min).



شکل ۱۰: تغییرات نیروی مماسی برش بر حسب تغییرات سرعت محور اصلی ( $t = 1.7/5 - 1.8/5$  mm,  $V_f = 400$  cm/min).



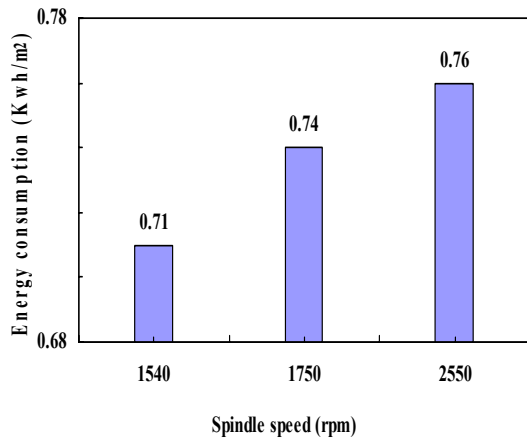
شکل ۱۱: تغییرات نسبت نیروهای برشی بر حسب سرعت محور اصلی ( $t = 1.7/5 - 1.8/5$  mm,  $V_f = 400$  cm/min).

براده های ثانویه می باشند. به همین دلیل با کاهش بارهای مکانیکی و حرارتی وارده بر دانه های الماس در اثر افزایش سرعت پیشروی، سایش این دانه ها نیز کاهش یافته و شرایط برشی بهتری فراهم می شود. همانگونه که در

شکل های (۴) و (۵) نیز مشاهده می شود نیروهای برشی با افزایش سرعت پیشروی ابتدا افزایش می یابند که این امر به دلیل افزایش عمق نفوذ دانه های الماس و افزایش تغییر شکل پلاستیکی سنگ می باشد. در نهایت در سرعت پیشروی (cm/min) ۴۰۰ به حداکثر مقدار خود می رسد و پس از آن شروع به کاهش می نماید. با مشاهده تغییرات نیروهای عمودی به مماسی  $F_n/F_t$  در شکل (۷) می توان نتیجه گرفت که ابزار با سرعت پیشروی سهل تری براده برداری می کند. سایش ابزار نیز به همین دلیل کاهش می یابد. البته به دلیل اینکه ابزار برشی از نوع سگمندی می باشد تاثیر سایشی براده های بزرگ ایجاد شده در ماتریس ابزار نسبتاً کم می شود و براده های بزرگ قبل از اینکه فرصت درگیری با چسب ابزار را پیدا کنند در شکافهای موجود پیرامونی دیسک بدام افتاده و به بیرون پرتاب می شوند. تغییرات نرخ مصرف انرژی نیز با این نظریه قابل توجیه می باشد. براده های ثانویه ایجاد شده برای جدا شدن از قطعه کار (سنگ گرانیت یزد) به انرژی کمتری نیاز دارند. به همین دلیل است که نرخ مصرف انرژی با افزایش سرعت پیشروی افزایش و پس از گذشتن از یک مقدار حداکثری مجدداً کاهش می یابد، شکل (۸).

در این مرحله برای بررسی تاثیر سرعت برش بر فرآیند تراش سنگ گرانیت یزد، با ثابت نگه داشتن سرعت پیشروی در حد (cm/min) ۴۰۰ و عمق برش در اندازه ۱.۷/۵ - ۱.۸/۵ mm آزمایش های دیگری انجام شده است. در این آزمایش ها با تغییر سرعت محور اصلی ماشین در دوره های ۱۵۴۰، ۱۷۵۰ و ۲۵۵۰ دور بر دقیقه عمل برش انجام شده است. نیروهای برشی و سایش ابزار اندازه گیری شده اند. شکل های (۹) و (۱۰) نشان می دهند که با افزایش سرعت برشی نیروهای فرآیند کاهش می یابند. با مقایسه نسبت نیروهای برشی  $F_n/F_t$  می توان مشاهده کرد که این نسبت با افزایش سرعت برشی در ابتدا کاهش یافته اما در سرعت دورانی ۲۵۵۰ rpm افزایش می یابد،





شکل ۱۳: تغییرات انرژی مصرف شده بر حسب تغییرات سرعت محور اصلی  
 $(t = 17/5 - 18/5 \text{ mm}, V_f = 400 \text{ cm/min})$ .

### نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر بعضی از پارامترهای ماشینکاری مثل سرعت برش و سرعت پیشروی بر رفتار سایشی یک دیسک برش الماس در برش سنگ گرانیت یزد مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است و نتایج زیر حاصل گردیده است:

۱- با افزایش سرعت پیشروی، نیروهای برشی ابتدا افزایش و پس از رسیدن به نقطه اوج خود کاهش می یابند. علت آنرا در افزایش ترکهای عرضی در سنگ گرانیت یزد حاصل از افزایش عمق نفوذ دانه های الماس و تشکیل براده های ثانویه می توان جستجو کرد.

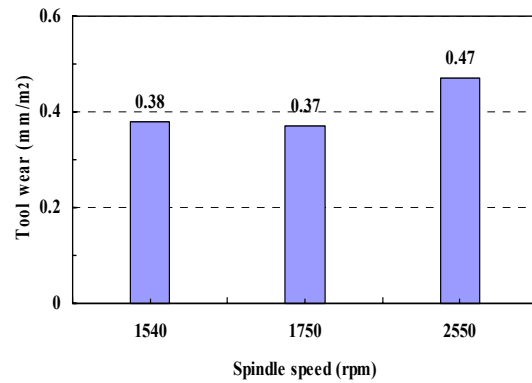
۲- با افزایش سرعت پیشروی، سایش ابزار نیز کاهش یافته است که علت آن کاهش نسبی نیروهای مکانیکی و همچنین کاهش تأثیر حرارت حاصل بر چسب اتصال دهنده دانه های الماس در ابزار برشی می باشد.

۳- با افزایش سرعت برشی، نیروهای برشی کاهش می یابند. زیرا که با افزایش سرعت برشی عمق نفوذ دانه به درون ماده سنگ کاهش و از طرفی به دلیل افزایش ضربه های مکانیکی دانه های الماس به سنگ تشکیل و رشد ترکهای جانبی نیز بیشتر می شود.

۴- با افزایش سرعت برشی، سایش ابزار نیز افزایش می یابد زیرا که بارهای حرارتی و ضربه های مکانیکی در سرعت های بالا بیشتر می گردد.

همانطور که مشاهده می شود افزایش نرخ تغییرات مصرف انرژی با سرعت برشی ناچیز است. همانطور که از روابط (۱) و (۲) فهمیده می شود، عمق نفوذ دانه های الماس که متناسب با ضخامت براده میانگین میباشد با سرعت برشی نسبت معکوس دارد. به همین دلیل نیروهای برشی با افزایش سرعت برشی کاهش می یابند.

کاهش نیروهای برشی وارد بر ابزار باعث پایداری ابزار در هنگام برش می شود. اما از طرفی در سرعت های بالا ضربه های مکانیکی و بارهای حرارتی وارد بر دانه های الماس افزایش می یابند. که این امر باعث کنده شدن دانه ها و سایش تخت در آنها می شود. با مشاهده شکل (۱۲) می توان به صحت این مطلب پی برد. این نمودار ستونی نشان می دهد که با افزایش سرعت برشی سایش ابزار نیز بیشتر می شود.



شکل ۱۲: تغییرات میزان سایش ابزار بر حسب تغییرات سرعت محور اصلی  
 $(t = 17/5 - 18/5 \text{ mm}, V_f = 400 \text{ cm/min})$ .

افزایش نسبت نیروهای برشی ( $F_n/F_t$ ) با افزایش سرعت برشی نیز نشان دهنده کند شدن ابزار برشی می باشد که حاکی از سایش دانه های الماس می باشد. کاهش عمق نفوذ دانه های الماس باعث کاهش تنش های وارده به سنگ می شود که کاهش گسترش ترکهای جانبی در سطح سنگ را به دنبال دارد. بنابراین برای عمل براده برداری انرژی بیشتری لازم است. زیرا که از درصد براده های ثانویه در فرآیند برش کاسته می شود. گرچه افزایش ضربه های مکانیکی به ماده سنگ تا حدودی باعث گسترش ترکها می شود.

شکل (۱۳) نشان می دهد که با افزایش سرعت برشی، نرخ مصرف انرژی افزایش یافته است اما تغییرات آن چندان قابل ملاحظه نیست.

## مراجع

- 1 - Jennings, M. and Wright, D. (1989). "Guidelines for sawing stone." *Ind. Diamond Rev.*, Vol. 49, No. 2, PP. 70-75.
  - 2 - Buttner, A. (1974). "Diamond tools and stone." *Ind. Diamond Rev.*, Vol. 34, PP. 89-93.
  - 3 - Tone Shoff, H. K. and Warnecke, G. (1982). "Research on stone sawing, in P. Daniel (ed.)." *Proc. of Conf. on Advances in Ultrahard Materials Application Technology*, Vol. 1, hornbeam, England, PP. 36-49.
  - 4 - Burgess, R. R. *Man-made Diamond for Stone Processing*, GE Pub. No. SMD, PP. 89-329.
  - 5 - Bailey, M. W. and Bullen, G. J. (1979). "Sawing in the stone and civil engineering industries." *J. of Ind. Diamond Rev.*, Vol. 39, PP.56-60.
  - 6 - Wright, D. N. and Cassapi, V. B. (1985). "Factors influencing stone sawability." *Ind. Diamond Rev.*, Vol. 45, No. 2, PP. 84-87.
  - 7 - Wright, D.N. and Wapler, H. (1986). "Investigations and prediction of diamond wear when sawing." *Ind. On Cirp.*, Vol. 35, No.1, PP. 239-244.
  - 8 - Ertingshausen, W. (1985). "Wear processes in sawing hard stone." *Ind. Diamond Rev.*, Vol. 45, No. 5, PP.254-258.
  - 9 - Mamanlis, A. G., Schulze, R. and Tonshoff, H. K. (1979). "Slotting of blocks of hard rock with a diamond segmented circular sawblade." *Ind. Diamond Rev.*, Vol. 39, PP. 356-365.
  - 10 - Luo, S. Y. and Liao, Y. S. (1993). "Effects of diamond grain characteristics on sawblade wear." *Int. J. Mach. tools Manufact.*, Vol. 33, No. 2, PP. 257-266.
  11. Luo, S. Y. and Liao, Y. S. (1995). "Study of the behaviour of diamond saw-blades in stone processing." *Int. J. Materials Processing Technology*, Vol. 51, PP. 296-308.
  - 12 - Konstanty, J. (2000). "Theoretical analysis of stone sawing with diamonds." *Materials Processing Technology*, Vol. 123, PP. 146-154.
-