

تاثیر سرعت انجام آزمون بر اندیس خراش سورشار در کانی‌های نرم تا سخت

بهنام کرمی^۱؛ محمدتقی همزبان قراملکی^{۲*}؛ رسول حمیدزاده مقدم^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، hamzaban@sut.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند

چکیده

در حال حاضر، بخش عمده‌ای از فضاهای زیرزمینی عمرانی و معدنی به وسیله دستگاه‌های حفاری مکانیزه‌ای چون TBMها حفر می‌شوند. فرآیند برش و حفر سنگ، شامل تماس‌هایی تکراری میان سنگ و ابزارهای برنده متحرک است. این امر باعث بوجود آمدن انواع متفاوتی از آسیب‌ها روی ابزارهای برنده می‌گردد. شناخت کامل شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی و به خصوص ویژگی‌های خراشنده زمین، یکی از پارامترهای مهم در تخمین عمر ابزارهای برنده، هزینه‌ها و کارایی عملیات حفاری مکانیزه است. روند عمومی به کار رفته برای ارزیابی قدرت خراشندگی سنگ‌ها، اجرای آزمایش و اندازه‌گیری میزان سایش مواد به کار رفته در آزمایش است. آزمون خراش سورشار یکی از ساده‌ترین روش‌های تعیین قدرت خراشندگی سنگ‌هاست که در سرتاسر جهان، به طور گسترده‌ای برای تخمین عمر ابزارهای برنده مورد استفاده در TBMها به کار می‌رود. مطالعات زیادی در مورد تاثیر پارامترهای مختلف زمین‌شناسی و تکنیکی بر نتایج آزمون سورشار انجام شده‌اند. اما تاکنون مطالعه دقیقی روی تاثیر سرعت حرکت نسبی میان پین و نمونه سنگی بر نتایج اندیس خراش سورشار انجام نشده است. در مطالعه حاضر، با استفاده از مدل جدیدی از دستگاه آزمایش سورشار، آزمون‌هایی با سرعت‌های متفاوت و کنترل شده، روی هفت نمونه تک کانی با سختی موس متفاوت انجام شد. نتایج نشان دادند که سرعت حرکت نسبی میان پین و نمونه آزمایش، در اندیس خراش سورشار به دست آمده موثر است. نتایج همچنین نشان دادند که سختی نمونه‌ها و پین‌های مورد استفاده نیز در چگونگی ارتباط میان اندیس خراش سورشار و سرعت اجرای آزمایش تاثیر گذار است.

کلمات کلیدی

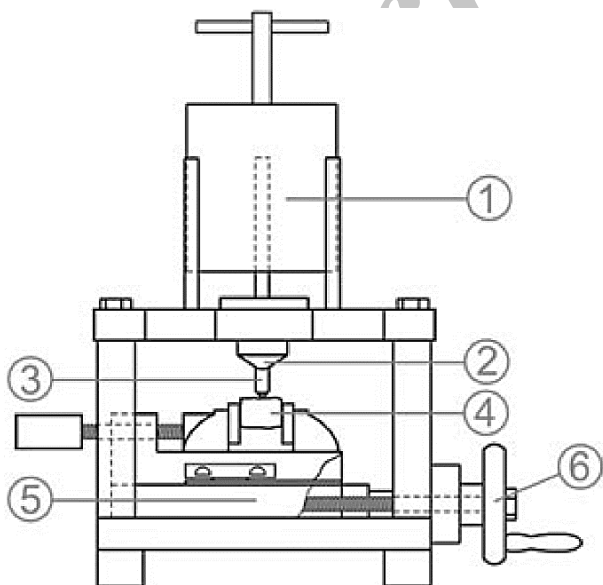
سایش، سرعت حرکت نسبی، اندیس سایش سورشار، آزمون آزمایشگاهی

سنگ‌ها [۹] و پیش‌بینی مصرف ابزارهای برنده استفاده می‌شود [۷، ۱۳-۱۰].

مولفین مختلف، اثر پارامترهای گوناگون بر نتایج *CAI* را بررسی کرده‌اند. پارامترهای موثر را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم کرد: پارامترهای زمین‌شناسی مربوط به نمونه‌ها و پارامترهای تکنیکی مربوط به روند و تجهیزات آزمایش. مطالعات انجام یافته روی پارامترهای زمین‌شناسی، به یافته‌های زیر منتهی شده است:

- همبستگی مستقیمی میان اندیس خراش سورشار و میانگین وزنی سختی کانی‌های تشکیل دهنده سنگ وجود دارد [۸، ۱۲، ۱۷-۱۴].
- با افزایش ابعاد دانه‌ها و کانی‌ها در نمونه‌های مورد آزمایش، مقادیر *CAI* اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد [۲۰-۱۸].
- *CAI* همبستگی مستقیمی با مقاومت فشاری تک محوره^۱ (*UCS*) و همچنین سرعت عبور موج *P* دارد [۱۲، ۱۶، ۱۷، ۲۴-۲۱].
- مدول الاستیسیته^{۱۱} و مقاومت کششی^{۱۲} نمونه‌ها، همبستگی مستقیم با مقادیر *CAI* دارند [۱۷].
- اعمال فشار محصور کننده و افزایش آن، سبب افزایش مقادیر *CAI* به‌دست آمده می‌شود [۲۵].

نتایج بررسی‌های انجام شده روی پارامترهای تکنیکی را نیز می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:



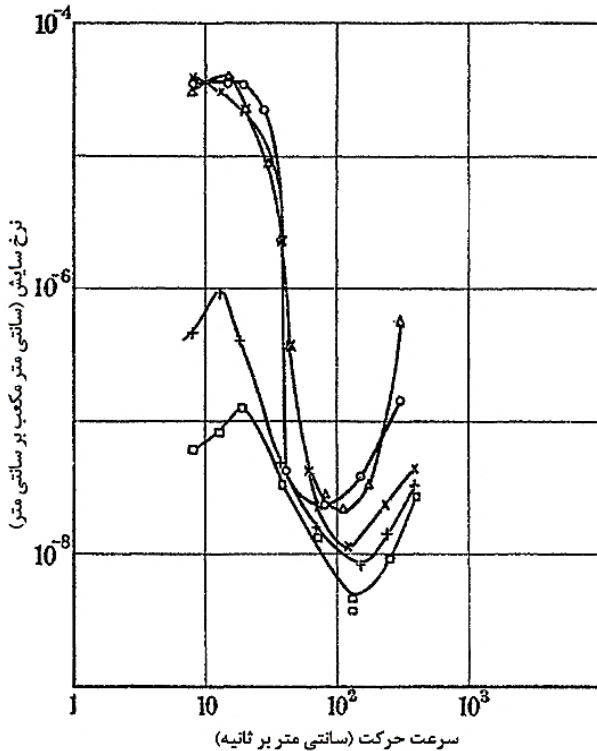
شکل ۱: نسل سوم دستگاه آزمایش سورشار (مدل وست) و اجزای تشکیل دهنده: (۱) جرم (۲) نگهدارنده و هدایت کننده پین، (۳) پین، (۴) نمونه، (۵) گیره، (۶) دست‌گیره [۶]

فرآیند برش سنگ، شامل تماس‌های مکرر میان سنگ و ابزار برنده متحرک است. این مساله باعث به‌وجود آمدن انواع متفاوتی از آسیب‌ها روی ابزار برش می‌گردد که بخش مهمی از آنها را سایش^۱ تشکیل می‌دهد. سایش را می‌توان به‌صورت از دست رفتن پیش‌رونده مواد از سطح جسم یکپارچه^۲ (بخشی از سیستم که دچار سایش می‌شود)، بر اثر برهم‌کنش مکانیکی با جسم مقابل^۳ (بخشی که باعث سایش می‌شود) تعریف کرد. جسم مقابل می‌تواند جامد، مایع و یا گاز باشد. پدیده سایش در ابزارهای برش سنگ، معمولاً در نوک تیز آنها اتفاق می‌افتد [۱].

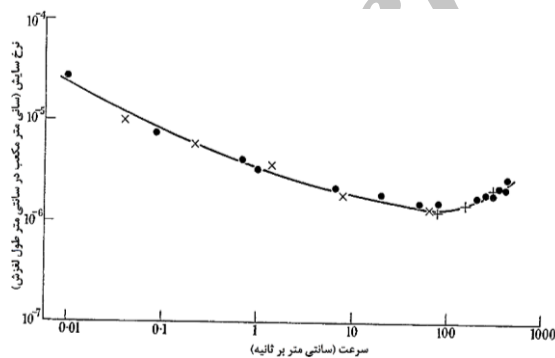
اجرای آزمون‌های خراشندگی و اندازه‌گیری سایش مواد به‌کار رفته در آزمایش، روند عمومی ارزیابی ویژگی‌های خراشنده سنگ‌های مختلف است. با وجود توسعه روش‌های آزمایشی مختلف، مسئله اساسی این است که نتایج به‌دست آمده، به‌شدت وابسته به ویژگی‌های مواد مورد استفاده و مکانیزم‌ها و شرایط حاکم بر انجام آزمایش اند [۲].

آزمون سورشار^۴ برای نخستین بار در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی معرفی شد [۳]. نخستین توصیف رسمی از روند اجرای آزمون، در استاندارد فرانسوی NF P 94-430-1 ارائه شده است [۴]. ASTM^۵ روند استاندارد برای اجرای آزمون سورشار در سال ۲۰۱۰ منتشر کرده است [۵]. آلبر و همکاران^۶ روش پیشنهادی *ISRM*^۷ برای انجام آزمون سورشار را تدوین کرده‌اند [۶]. بر اساس روش پیشنهادی *ISRM*، یک پین فولادی با نوک مخروطی، زاویه راس ۹۰° و سختی ۵۵ راکول-C، تحت بار استاتیکی ۷۰ نیوتن، روی سطح نمونه سنگی قرار می‌گیرد. پین به طول ۱۰ میلی‌متر روی سنگ کشیده می‌شود. زمان توصیه شده برای اجرای آزمون، ۱ ثانیه (و یا ۱۰ ثانیه، بسته به مدل وسیله اجرای آزمایش) است. تا کنون سه نسل مختلف از دستگاه آزمایش سورشار ساخته شده‌اند که همگی دارای اصول مشابهی اند [۷]. با این وجود، امروزه در اکثر آزمایشگاه‌ها از دستگاه نسل سوم معرفی شده توسط وست^۸ (شکل ۱) استفاده می‌شود [۸]. پهن‌شدگی سایشی ایجاد شده در نوک پین، که در طول آزمایش پدید می‌آید، با یک میکروسکوپ اندازه‌گیری می‌شود. این مقدار اندازه‌گیری شده، برحسب ۰/۱ میلی‌متر، گزارش شده و اندیس سایش سورشار^۹ (*CAI*) خوانده می‌شود. آزمایش را می‌توان روی سطوح صاف اره‌بر، یا سطوح تازه شکسته سنگی انجام داد [۶]. این آزمون، روشی ساده و سریع برای اندازه‌گیری قدرت خراشندگی سنگ-ها بوده و از نتایج آن، برای طبقه‌بندی قدرت خراشندگی

در سال ۱۹۶۰ هرست^{۱۶} و لنکستر^{۱۷} با استفاده از آزمون پین روی رینگ^{۱۸}، مطالعاتی را روی فلز برنج^{۱۹} انجام دادند و نتایج مشابهی بدست آوردند (شکل ۳). در مطالعات آنها، جنس جسم میزبان از نوع فولادی خاص، با سختی ۸۰۰ ویکرز^{۲۰} بود [۳۱].



شکل ۲: تأثیر سرعت بر روی نرخ سایش فولاد با ۰/۶۴ درصد کربن، تحت بار ۳۰ کیلوگرم [۳۰]



شکل ۳: تغییرات نرخ سایش با سرعت [۳۱]

در سال ۱۹۶۵ ولش^{۲۱} نموداری مشابه نتایج کهل و سیبل بدست آورد [۳۰]. ساکا و همکاران^{۲۲} نیز مطالعاتی را روی فولاد AISI 1020، با استفاده از آزمایش پین روی رینگ و با استفاده از فولاد AISI 52100 به عنوان جسم مقابل، انجام دادند و نمودار شکل ۴ را ارائه کردند. آنها نیز کاهش اولیه در نرخ سایش را ناشی از اکسیداسیون آهن و تشکیل فاز هماتیت

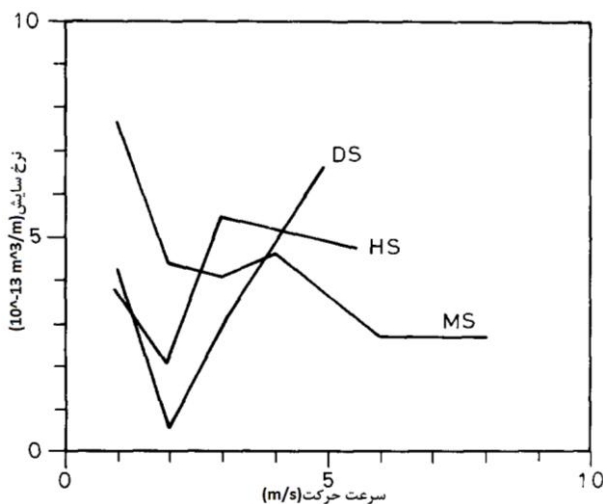
- پین‌های سخت‌تر، سایش‌های کمتری را تجربه می‌کنند [۷، ۱۱، ۱۵، ۲۱، ۲۶ و ۲۷].
- روی سطوح شکسته شده زبر، مقادیر CAI بزرگ-تری، در مقایسه با سطوح صاف اره‌بر، به‌دست می‌آید [۷، ۱۵، ۱۶، ۲۱ و ۲۸].
- بخش عمده‌ای از سایش نوک پین، در میلی‌مترهای اول لغزش پدید می‌آید [۱۵ و ۱۶]. با این وجود، انجام بررسی‌های دقیق‌تر نشان داده است که در نمونه‌های خراشنده‌تر، روند افزایشی سایش نوک پین، در بخش بزرگ‌تری از طول مسیر لغزش ادامه می‌یابد [۲۹].
- اندازه‌گیری پهن‌شدگی سایشی نوک پین از نمای بالا، مقادیر CAI بزرگ‌تری نسبت به اندازه‌گیری از نمای پایین، نتیجه می‌دهد [۲۸]. همچنین ثابت شده است که اندازه‌گیری‌های انجام شده از نمای جانبی پین، داری دقت بیشتری می‌باشند [۲۱].
- ارتباط مستقیمی میان بار قائم اعمال شده و مقادیر سایش نوک پین وجود دارد [۲۱].
- به نظر نمی‌رسد که ارتباطی میان سایش نوک پین و سرعت حرکت آن روی نمونه وجود داشته باشد [۲۱].

۲- پیش‌زمینه

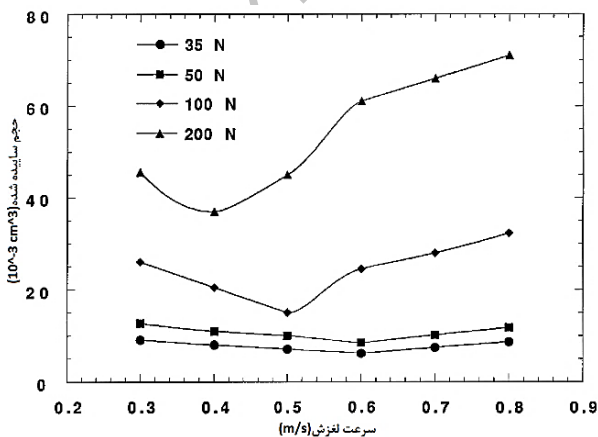
یکی از عوامل تأثیر گذار روی سایش، سرعت حرکت دو جسم نسبت به یکدیگر می‌باشد. تأثیر سرعت حرکت نسبی میان دو فلز بر نرخ سایش‌های به‌وقوع پیوسته، توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۱۹۳۹، کهل^{۱۳} و سیبل^{۱۴} مطالعاتی برای به‌دست آوردن تأثیر سرعت، بر نرخ سایش فولاد با ۰/۶۴ درصد کربن انجام دادند. آنها یک استوانه‌ای توخالی از جنس فولاد پرکربن را روی استوانه‌ای در حال دوران از جنس مشابه قرار دادند. بر اساس نتایج بدست آمده (شکل ۲)، با افزایش سرعت حرکت نسبی، ابتدا نرخ سایش کاهش می‌یابد. اما پس از رسیدن به یک مقدار حداقل، نرخ سایش دوباره افزایش می‌یابد. آنها ادعا کردند که کاهش اولیه اتفاق افتاده در نرخ سایش، بدلیل تشکیل ذرات ریز اکسید شده‌ی آهن (تشکیل فاز هماتیت^{۱۵}) می‌باشد. در حالی که با افزایش سرعت، نرم‌شوندگی گرمایی در فولاد اتفاق می‌افتد و در نتیجه نرخ سایش به تدریج افزایش می‌یابد [۳۰].

در سال ۱۹۹۶ مولیناری و همکاران^{۲۶} روی آلیاژ تیتانیوم-آهن مطالعاتی را انجام دادند و نتایج خود را به صورت شکل ۶ ارائه کردند [۳۵]. همان گونه که مشاهده می‌گردد، در این نمودار نیز رفتاری مشابه نمودارهای قبل، حاصل شده است. در سال ۲۰۰۶ باسواراجا پا و همکاران^{۲۷} مطالعاتی را روی سه نوع ماده‌ی مختلف، با استفاده از آزمایش پین روی رینگ انجام دادند و نتایج خود را در نمودار شکل ۷ خلاصه کردند [۳۶].

الکوتوب و همکاران^{۲۸}، مطالعاتی را روی ترکیب‌های آلومنیوم و اکسید آلومنیوم، با استفاده از آزمایش پین روی رینگ انجام دادند. جنس جسم مقابل در این مطالعات، از فولاد AISI 4140 بود. نتایج بدست آمده در شکل ۸ ارائه شده است. آنها ادعا کردند که در سرعت‌های پایین لغزش، مکانیزم اصلی، از نوع سایش خراشنده^{۲۹} است در حالی که در سرعت‌های بالا، سایش چسبنده^{۳۰} مکانیزم اصلی خواهد بود [۳۷].

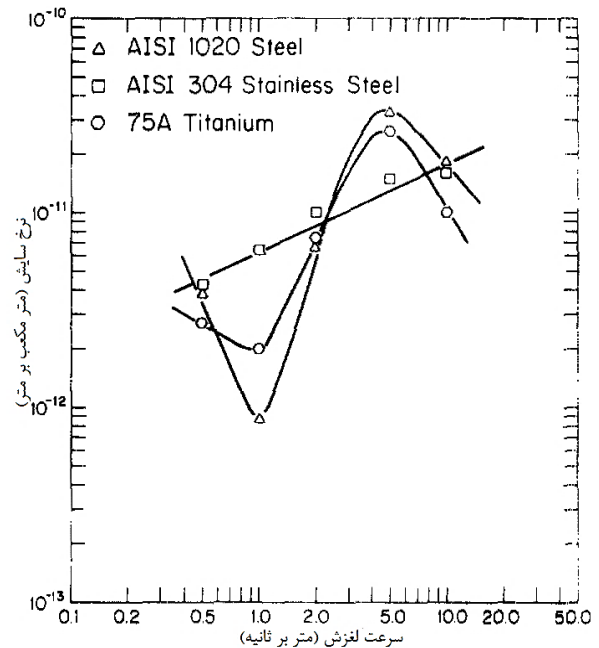


شکل ۵: تغییرات نرخ سایش با سرعت لغزش در فشار ۱/۱ مگاپاسکال در سه نوع مختلف فولاد [۳۴]



شکل ۶: نتایج بدست آمده از آزمایش لغزش در سرعت‌ها و نیروهای عمودی مختلف [۳۵]

دانسته و چنین عنوان کردند که با افزایش سرعت، به تدریج نرم‌شوندگی گرمایی در جسم صلب اتفاق افتاده و در نتیجه نرخ سایش افزایش می‌یابد. اگر سرعت همچنان افزایش یابد، به سرعتی خواهیم رسید که بعد از آن، نرخ سایش بار دیگر کاهش خواهد یافت [۳۲].



شکل ۴: نتایج بدست آمده توسط ساکا و همکاران روی سه نوع فلز [۳۲]

در سال ۱۹۹۱ سوبرامانیان^{۳۳} مطالعات مشابهی را با استفاده از آزمایش پین روی رینگ، برای بررسی تاثیر سرعت لغزش روی نرخ سایش آلیاژ آلومینیوم-سیلیس انجام داد. او از دو نوع فولاد با سختی ویکرز ۱۱۴ و ۷۷۰ به عنوان جسم مقابل (رینگ) استفاده کرد و مشاهده نمود که ابتدا با افزایش سرعت لغزش، نرخ سایش کاهش یافته و سپس با افزایش بیشتر سرعت، نرخ سایش افزایش می‌یابد. او کاهش اولیه در نرخ سایش را این گونه توجیه کرد که افزایش سرعت، باعث افزایش نرخ کرنش می‌شود و این افزایش نیز به نوبه خود باعث افزایش سختی یا مقاومت جریانی^{۳۴} می‌گردد. افزایش مقاومت جریانی، باعث کاهش سطح واقعی تماس شده و در نتیجه نرخ سایش کاهش می‌یابد. افزایش در قسمت دوم نمودار نیز به دلیل افزایش دما و در نتیجه پدیده‌ی نرم‌شوندگی کرنشی، اتفاق می‌افتد [۳۳].

سو^{۲۵} از فولاد AISI 4140 برای پین و از فولاد AISI 4340 به عنوان رینگ استفاده کرد. نتایج بدست آمده، در نمودار شکل ۵ ارائه شده‌اند [۳۴]. این نتایج نیز مشابه نتایج بدست آمده توسط سایر محققین می‌باشند.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تمامی محققین، بخش اول نمودار را، که در آن کاهش نرخ سایش رخ می‌دهد، به کار سختی^{۳۳} اتفاق افتاده در فولاد در اثر فرآیندهای مختلف، نسبت می‌دهند. همچنین عامل اصلی افزایش نرخ سایش در بخش دوم نیز ناشی از نرم شدن فولاد، به دلیل افزایش دما، قلم‌داد شده است.

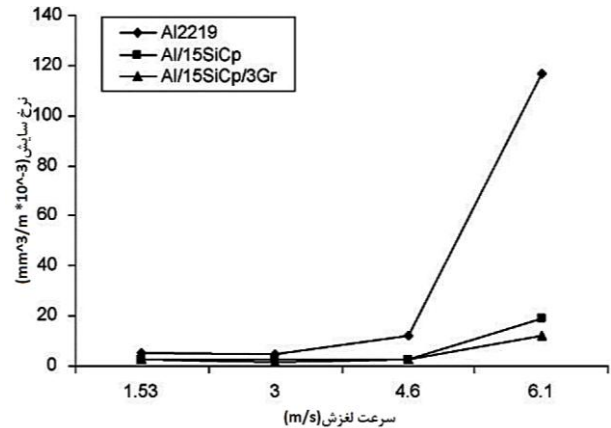
با اینکه آزمایش‌های زیادی برای بررسی تاثیر سرعت، بر سایش‌های به‌وقوع پیوسته در فلزات مختلف انجام شده است، اما تاثیر سرعت در برهم‌کنش سایشی میان نمونه‌های سنگ و فولاد، چندان مورد بررسی قرار نگرفته است. دکت^{۳۴} آزمایش‌های سایشی را روی سنگ و با سرعت‌های مختلف انجام داد و نتایج به دست آمده را در شکل ۱۰ ارائه کرد. وی از آزمایش خراش موسوم به آزمایش خراش دکت^{۳۵} برای مطالعات خود استفاده کرد. این وسیله شامل یک دستگاه تراش می‌باشد که یک دیسک سنگی با قطر ۱۴۰ میلی‌متر را می‌چرخاند. این دیسک با استفاده از یک ابزار برش، با نیروی ثابت، تحت نفوذ قرار می‌گیرد. مقدار وزن از دست رفته ابزار برش، برابر با سایش ایجاد شده در آن است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، در سرعت‌های پایین، فقط مکانیزم سایش خراشنده وجود دارد. در حالی که با افزایش سرعت، مکانیزم سایش چسبیده نیز ظاهر می‌شود [۱].

رستمی و همکاران آزمایش سورشار را روی سنگ‌های مختلف و با سرعت‌های متفاوت انجام دادند (شکل ۱۱) و نتیجه گرفتند که سرعت، تاثیر چندانی بر نرخ سایش پین‌های مورد استفاده ندارد [۲۱].

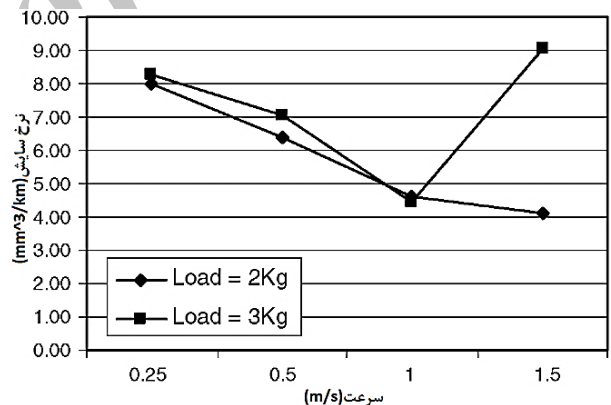
با توجه به مطالب مرور شده، می‌توان گفت تا به حال مطالعات اندکی روی تاثیر سرعت لغزش بر نرخ سایش، در فرآیندهای برش سنگ‌ها انجام گرفته است. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، یکی از آزمایش‌هایی که امروزه به‌صورت گسترده‌ای در بررسی ظرفیت سایشی سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد، آزمایش خراش سورشار است. اما به دلیل مکانیزم دستی آزمایش، تا به حال امکان کنترل دقیق سرعت انجام آزمایش و مطالعه‌ی تاثیر آن بر نتایج به‌دست آمده، بسیار دشوار بوده است.

در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از دستگاه جدیدی برای انجام آزمایش سورشار، امکان کنترل دقیق سرعت آزمایش و بررسی تاثیر آن بر میزان سایش‌های به‌وقوع پیوسته فراهم گردید. نتایج بدست آمده نشان دادند که سرعت حرکت نسبی، پارامتری تاثیر گذار در قدرت خراشندگی نمونه‌های مختلف است.

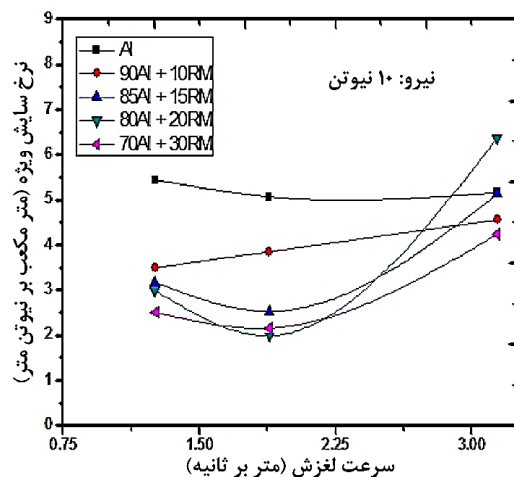
در سال ۲۰۱۳، پراساد و همکاران^{۳۱} نیز روی تاثیر مواد پرکننده‌ای مثل گل قرمز^{۳۲} بر خواص سایشی آلومنیوم خالص، مطالعاتی را انجام دادند. نتایج حاصل از مطالعات آنها در شکل ۹ نشان داده شده است. در این نمودار نیز با افزایش سرعت، نرخ سایش ابتدا کاهش می‌یابد و سپس افزایش می‌یابد [۳۸].



شکل ۷: تغییرات نرخ سایش با تغییرات سرعت لغزش در سه نوع مختلف فولاد در لغزش خشک [۳۶]



شکل ۸: نرخ سایش در برابر سرعت لغزش برای ترکیب آلومنیوم و اکسید آلومنیوم [۳۷]



شکل ۹: تغییرات نرخ سایش ویژه با سرعت [۳۸]

گزارش گردید. برای اندازه‌گیری پهن‌شدگی سایشی نوک پین‌ها از یک میکروسکوپ با بزرگ‌نمایی 32X استفاده شد و اندازه‌گیری‌ها، روی تصاویر تهیه شده از نمای جانبی پین‌ها انجام گرفت. شکل ۱۳ نمونه‌ای از تصاویر مورد استفاده برای اندازه‌گیری اندیس سایش سرشار (CAI) را نشان می‌دهد. برای اینکه تأثیر زبری سطح نمونه‌ها بر نتایج آزمایش‌های انجام شده از بین برود، سطح تمامی نمونه‌ها به مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه با استفاده از ذرات کاربراندوم^{۳۶} و از اندازه‌ی ۱۰۰ تا ۸۰۰ پولیش زده شدند. از آنجا که دستگاه آزمایش در ابتدا به‌منظور کنترل دقیق متغیرهای آزمایش و بررسی برهم‌کنش میان سنگ و فولاد طراحی شده بود، در حال حاضر امکان انجام آزمایش با سرعت‌های صفر تا ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه فراهم است (با انجام تغییراتی در موتور و گیربکس دستگاه می‌توان به سرعت‌های بالاتری نیز دست یافت). بر این اساس، روی هر نمونه، آزمایش‌هایی با سرعت‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه (زمان‌های اجرای به‌ترتیب ۲، ۱، ۰/۶۷ و ۰/۵ ثانیه) و با استفاده از پین‌های با سختی 55HRC و 43HRC انجام شدند. نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها در جدول ۱ به نمایش درآمده‌اند. در این جدول، اندیس‌های سایش به دست آمده با سرعت‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه به‌ترتیب با $CAI_{(5)}$ ، $CAI_{(10)}$ ، $CAI_{(15)}$ و $CAI_{(20)}$ نشان داده شده‌اند.

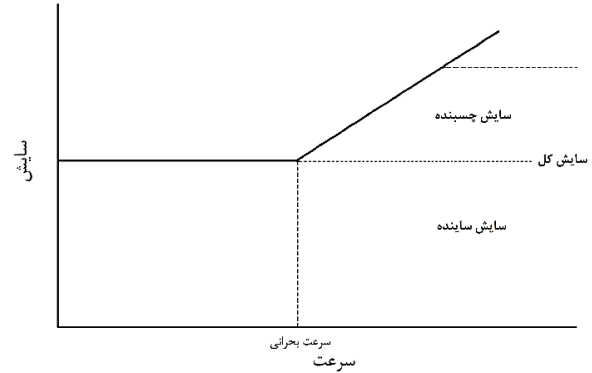
۴- نتایج و بحث

به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر تأثیر سرعت لغزش پین بر مقادیر ساینده‌ی ثبت شده، بیشترین و کمترین مقادیر CAI به دست آمده در سرعت‌های مختلف، به ترتیب با $CAI_{(max)}$ و $CAI_{(min)}$ مشخص شدند. با مبنا قرار دادن سرعت 10mm/sec به‌عنوان مبنای مقایسه‌ها، حد پایین و حد بالای اندیس خراش سورشار ثبت شده در سرعت‌های مختلف، بر حسب درصد، از روابط زیر محاسبه گردید:

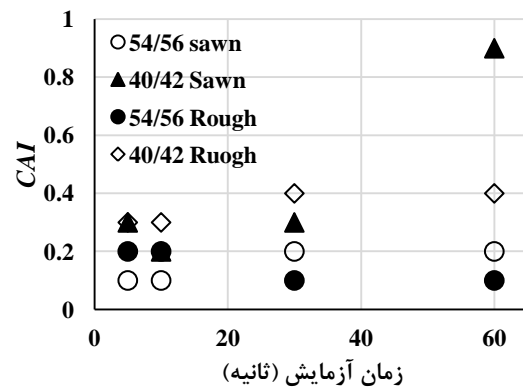
$$Lower Bound (\%) = \frac{CAI_{(10)} - CAI_{(min)}}{CAI_{(10)}} \times 100 \quad (1)$$

$$Upper Bound (\%) = \frac{CAI_{(max)} - CAI_{(10)}}{CAI_{(10)}} \times 100 \quad (2)$$

مقادیر به دست آمده از روابط (۱) و (۲) نیز در جدول ۱ به نمایش درآمده‌اند.



شکل ۱۰: اجزا تشکیل دهنده‌ی سایش در سرعت‌های مختلف [۱]

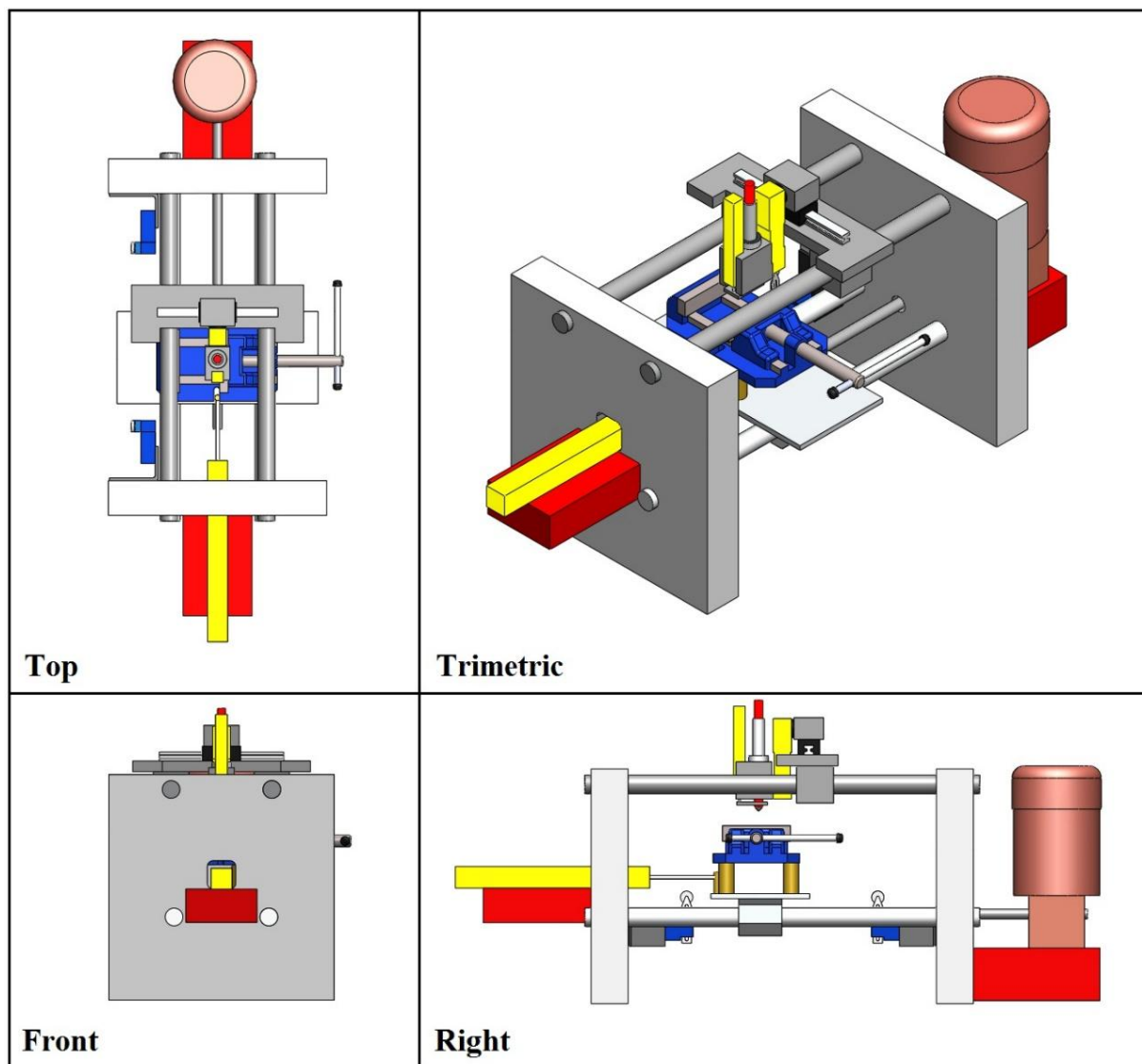


شکل ۱۱: تأثیر سرعت حرکت پین بر روی مقادیر ضریب سورشار برای سنگ آهک [۲]

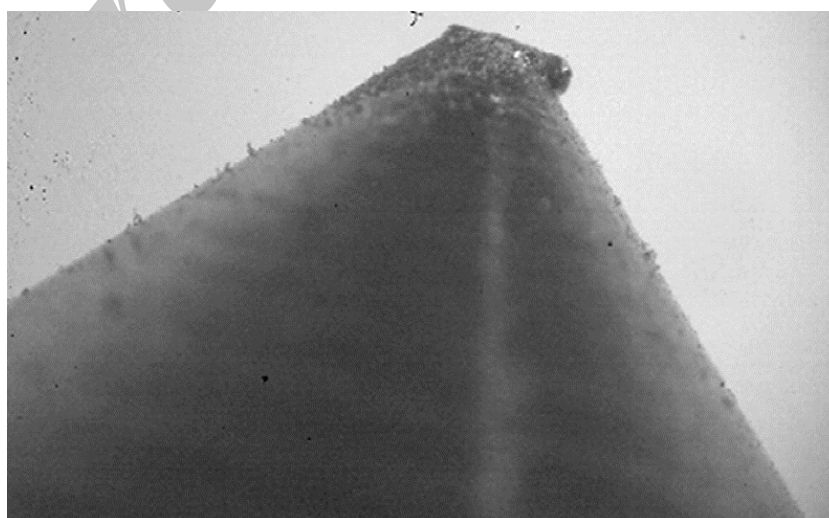
۳- روش و نمونه‌های آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها، از دستگاه جدیدی استفاده شد. ویژگی اصلی این دستگاه، حرکت پین با استفاده از نیروی یک موتور الکتریکی، اندازه‌گیری پارامترهایی مانند نیروی اصطکاکی وارد بر پین و جابجایی‌های افقی و قائم آن روی نمونه، و کنترل دقیق سرعت و میزان جابجایی پین در طول آزمایش است. با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری و ثبت شده به‌وسیله دستگاه، می‌توان برهم‌کنش میان پین و سطح سنگ را به صورت دقیق‌تری بررسی کرد [۲۹ و ۳۹]. شکل ۱۲ تصویر شماتیک دستگاه را از نماهای مختلف و همچنین به‌صورت سه‌بعدی نشان می‌دهد.

آزمایش‌ها روی ۷ نمونه‌ی کانی با سختی‌های مختلف انجام گرفتند. برای دسترسی به نمونه‌های همگن و یکنواخت و به‌منظور تفسیر آسان‌تر نتایج، نمونه‌های تک‌کانی با دامنه سختی موس نسبتاً گسترده ۲ تا ۷، انتخاب شدند. آزمایش‌ها بر اساس روش پیشنهادی ISRM انجام یافتند [۶]. هر آزمایش، پنج بار تکرار شد و میانگین نتایج به‌دست آمده



شکل ۱۲: دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها



شکل ۱۳: نمونه‌ای از تصاویر مورد استفاده برای اندازه‌گیری مقدار CAI

جدول ۱: نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با سرعت‌های لغزشی مختلف

Upper Bound ₄₃ (%)	Lower Bound ₄₃ (%)	Upper Bound ₅₅ (%)	Lower Bound ₅₅ (%)	CAI ₄₃₍₂₀₎	CAI ₄₃₍₁₅₎	CAI ₄₃₍₁₀₎	CAI ₄₃₍₅₎	CAI ₅₅₍₂₀₎	CAI ₅₅₍₁₅₎	CAI ₅₅₍₁₀₎	CAI ₅₅₍₅₎	سختی موس	کانی
۳/۰	-۱/۵	۷/۵	-۹/۸	۰/۱۳۹	۰/۱۳۳	۰/۱۳۵	۰/۱۳۸	۰/۱۳۹	۰/۱۲۰	۰/۱۳۳	۰/۱۴۳	۲	ژیبس ^a (GYP)
۴/۹	-۲/۸	۸/۸	-۱۰/۲	۰/۱۴۹	۰/۱۳۸	۰/۱۴۲	۰/۱۴۷	۰/۱۴۰	۰/۱۲۳	۰/۱۳۷	۰/۱۴۹	۲/۵	هالیت ^b (HAL)
۳۲/۵	۰	۲۸/۷	-۱۱/۶	۱/۵۹۰	۱/۲۹۰	۱/۲۰۰	۱/۳۲۰	۰/۴۶۵	۰/۴۰۴	۰/۴۵۶	۰/۵۸۷	۳	کلسیت ^c (CAL)
۲/۷	۰	۴/۳	-۵/۷	۱/۹۰۰	۱/۸۵۷	۱/۸۵۰	۱/۸۹۰	۱/۴۵۰	۱/۳۲۰	۱/۴۰۰	۱/۴۹۰	۴	فلوریت ^d (FLR)
۶/۲	۰	۲۵/۰	-۳/۸	۱/۵۵۰	۱/۴۹۵	۱/۴۵۹	۱/۵۰۰	۱/۱۶۰	۱/۰۰۰	۱/۰۴۰	۱/۳۰۰	۵	آپاتیت ^e (APT)
۱۰/۸	۰	۹/۱	-۶/۲	۳/۲۸۰	۳/۰۰۰	۲/۹۶۰	۳/۱۵۰	۲/۷۰۰	۲/۳۸۳	۲/۵۴۰	۲/۷۷۰	۶	اورتوز ^f (ORT)
۲۱/۹	-۷/۰	۳۷/۸	۰	۲/۲۸۰	۱/۹۲	۱/۸۷۰	۱/۷۴۰	۲/۱۲۰	۱/۷۱۰	۱/۵۳۸	۱/۵۸۷	۷	کوارتز ^g (QTZ)

^a gypsum^b halite^c calcite^d fluorite^e apatite^f orthoclase feldspar^g quartz

حدود ۱۰ درصد کمتر از $CAI_{55(10)}$ می‌باشد. اما مرز بالا دارای اختلاف کمتری نسبت به $CAI_{55(10)}$ است. در نمونه با سختی ۷، وضعیت کاملاً برعکس است. مرز پایین تقریباً بر $CAI_{55(10)}$ منطبق است. ولی مرز بالا حدود ۴۰ درصد بزرگ‌تر از $CAI_{55(10)}$ به دست آمده است. بنابراین، روند کلی اثر سرعت را می‌توان به این صورت توصیف کرد که در نمونه‌های با سختی کم، تغییرات سرعت موجب کاهش مقادیر سایش‌های اندازه-گیری شده می‌گردد. اما در نمونه‌های با سختی بالاتر، اثر تغییرات سرعت بیشتر به صورت افزایش قابل توجه در مقادیر سایش نوک پین، مشاهده می‌شود.

علاوه بر نتایج یاد شده، با مقایسه روندهای مشاهده شده در پین‌های با سختی مختلف، می‌توان گفت که چگونگی تاثیر سرعت بر سایش نوک پین، علاوه بر سختی نمونه مورد آزمایش، به سختی پین‌هایی که در آزمایش به کار می‌روند نیز بستگی دارد.

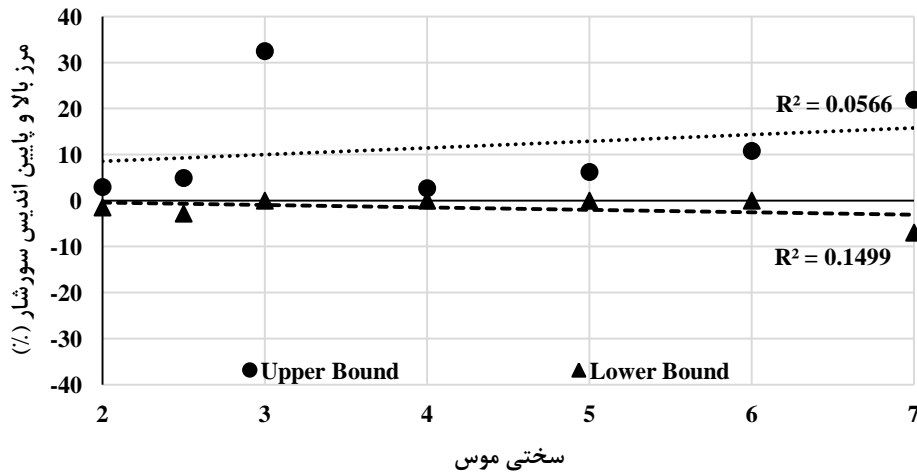
برای اینکه بتوان تفسیر دقیق‌تری از تاثیر سرعت لغزش پین بر مقادیر اندیس خراش سورشار به دست آورد، در شکل ۱۵ تغییرات مقادیر CAI با سرعت‌های لغزش پین، در نمونه‌های مختلف رسم شده است. برای آسان‌تر شدن مقایسه-ها، مقادیر CAI به دست آمده با سرعت‌های مختلف برحسب مقادیر به دست آمده در سرعت 10mm/sec نرمالیزه شده اند

نمودارهای شکل ۱۴، تغییرات مرزهای پایین و بالای به دست آمده با سرعت‌های لغزشی مختلف را بر حسب سختی موس نمونه‌های آزمایشی نشان می‌دهند. در پین‌های 43HRC (شکل ۱۴-الف)، با اینکه پراکندگی زیادی در مقادیر به دست آمده (بویژه در نمونه کلسیت با سختی ۳) مشاهده می‌شود، اما روند افزایشی هر دو مرز پایین و بالا، با افزایش سختی نمونه‌ها، قابل توجه است. در نمونه با سختی ۲، مرز پایین اختلاف چندان زیادی با $CAI_{43(10)}$ ندارد. اما مرز بالا، افزایش متوسطی در حدود ۵ تا ۱۰ درصد را نسبت به $CAI_{43(10)}$ نشان می‌دهد. در نمونه با سختی ۷، مرز بالا به طور متوسط ۱۰ تا ۲۰ درصد بزرگ‌تر و مرز پایین در حدود ۵ درصد کوچک‌تر از $CAI_{43(10)}$ می‌باشند. در حالت کلی، در پین‌های 43HRC، تغییر سرعت لغزش پین می‌تواند موجب تغییر در مقادیر سایش‌های ثبت شده گردد. اما این تغییرات در نمونه‌های مختلف به صورت یکنواخت نیستند. به نظر می‌رسد که در نمونه‌های با سختی کمتر، دامنه تغییرات ایجاد شده در اثر تغییر سرعت، محدودتر است. اما با افزایش سختی نمونه‌ها، این دامنه بزرگ‌تر می‌شود. در پین‌ها با سختی 55HRC، روند متفاوتی مشاهده می‌شود. پراکندگی نتایج، بسیار کمتر از نتایج بدست آمده با پین‌های 43HRC می‌باشد. در نمونه با سختی ۲، مرز پایین در

و محور قائم نمودارها، بدون بعد است. براساس آنچه که از نمودارهای شکل ۱۵ برمی‌آید، در ابتدا *CAI* با افزایش سرعت لغزش پین، کاهش می‌یابد. اما پس از رسیدن به سرعتی مشخص، افزایش بیشتر سرعت، موجب افزایش *CAI* می‌گردد. این روند، بسیار مشابه روند عمومی مشاهده شده در شکل‌های ۲ تا ۹ است که از آزمایش‌های سایش فلز در برابر فلز به دست آمده‌اند. کاهش اولیه مقادیر *CAI* در اثر افزایش سرعت لغزش را می‌توان با وقوع پدیده کارسختی و افزایش آن در سرعت‌های بالاتر مرتبط دانست. با افزایش سرعت لغزش، سرعت بارگذاری در نوک پین افزایش می‌یابد. در اثر بارهای وارد شده در این شرایط، نوک پین با

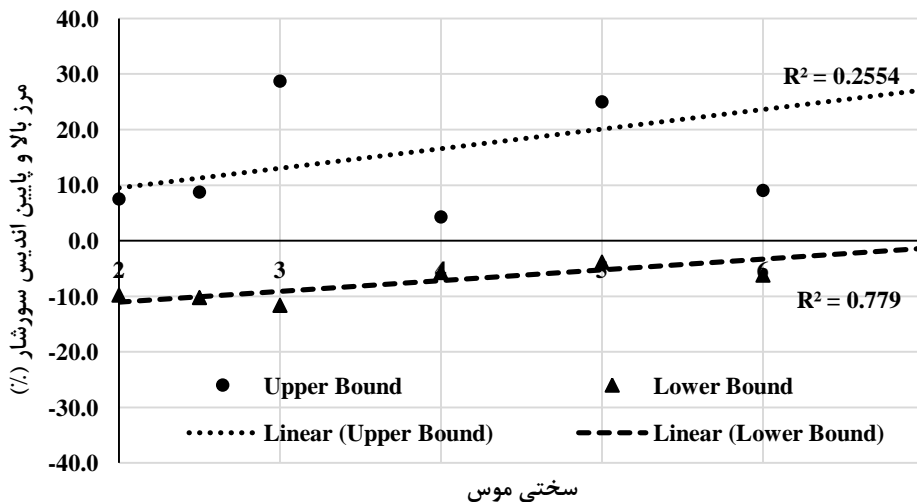
سرعت بیشتری متراکم شده و کارسخت می‌گردد. بنابراین، افزایش سرعت، موجب افزایش سختی نوک پین در مواجهه با نمونه شده و سبب کاهش سایش‌های پدید آمده می‌گردد. با این وجود، وقتی سرعت لغزش از حد معینی فراتر رفت، به نظر می‌رسد که نرخ بارگذاری در نوک پین، به قدری بالا می‌رود که اثر کارسختی ایجاد شده را از بین می‌برد. در چنین شرایطی پین دوباره رفتار نرم‌تری از خود نشان داده و مقادیر سایش افزایش می‌یابند. البته می‌توان این اثر را به نرم‌تر شدن نوک پین در اثر افزایش بیشتر دما، در سرعت‌های بالاتر نیز نسبت داد.

43HRC



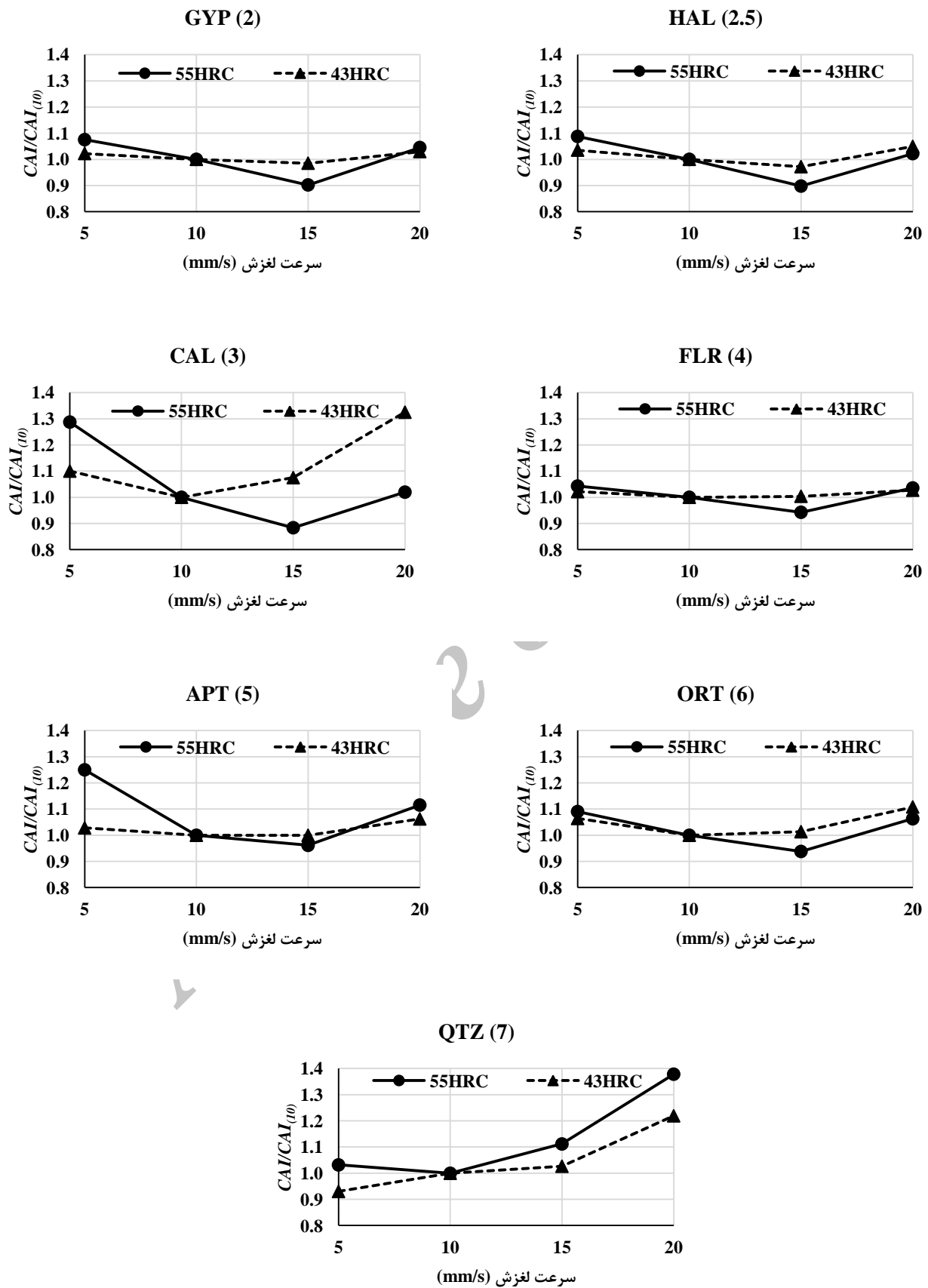
(الف)

55HRC



(ب)

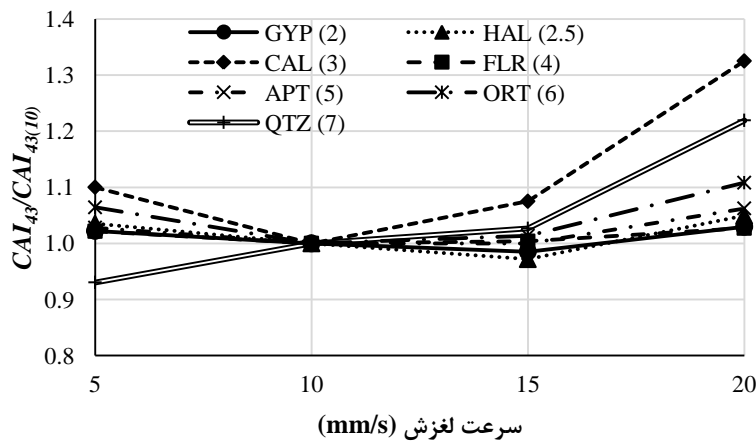
شکل ۱۴: تغییرات مرزهای پایین و بالای سایش‌های اندازه‌گیری شده بر حسب سختی نمونه‌ها (الف) پین‌های 43HRC، (ب) پین‌های 55HRC



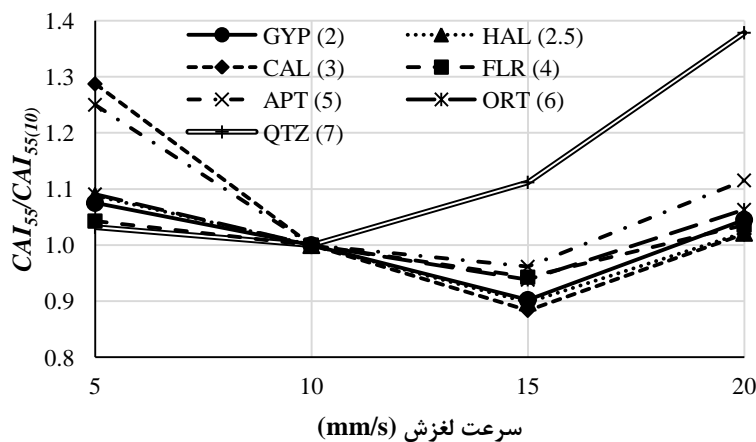
شکل ۱۵: تغییرات مقادیر نرمالیزه CAI با سرعت لغزش بین، در نمونه‌های مختلف

(با سختی ۷) هنگام آزمایش با پین 43HRC، همواره روندی افزایشی را نشان می‌دهد و با افزایش سرعت لغزش پین، سایش نوک پین به صورت تقریباً مداوم افزایش می‌یابد. روند عمومی مشاهده شده را می‌توان این‌گونه توصیف کرد که در حالت کلی، با افزایش سرعت لغزش پین روی نمونه، در ابتدا سایش نوک پین کاهش می‌یابد. اما پس از رسیدن به سرعتی معین، مقادیر سایش به وقوع پیوسته، شروع به افزایش می‌کنند. نکته مهم این است که سرعتی که در آن روند کاهش تبدیل به افزایش می‌شود، همواره ثابت نبوده و علاوه بر سختی نمونه مورد آزمایش، به سختی پینی که آزمایش با آن انجام می‌شود نیز بستگی دارد. اگر سرعت بهینه سرعتی تعریف گردد که در آن، کمترین مقدار سایش به وقوع می‌پیوندد؛ به نظر می‌رسد که با افزایش سختی نمونه‌های مورد آزمایش، سرعت بهینه کاهش می‌یابد. همچنین کاهش سختی پین‌های به کار رفته در آزمایش نیز می‌تواند موجب کاهش سرعت بهینه گردد.

نکته مهم دیگری که با مقایسه نمودارهای مختلف شکل ۱۵ می‌توان دریافت، تغییر در مقدار سرعتی است که در آن، روند تغییرات CAI با سرعت لغزش، از حالت کاهش به افزایشی تبدیل می‌شود. در شکل ۱۶، منحنی‌های مربوط به نمونه‌های مختلف، برای پین‌های 43HRC و 55HRC، روی یک نمودار به نمایش درآمده‌اند. بر اساس نمودارهای شکل ۱۶، هنگام آزمایش با پین‌های 55HRC، در تمامی نمونه‌ها، به غیر از کوارتز (سخت‌ترین نمونه)، روند کاهش CAI در سرعت 15mm/sec تبدیل به افزایشی می‌گردد. اما در نمونه کوارتز (با سختی ۷) این اتفاق زودتر و در سرعت 10mm/sec رخ می‌دهد. در مقابل، در پین‌های 43HRC، در نمونه‌های ژئپس و هالیت (به ترتیب با سختی ۲ و ۲/۵)، تبدیل روند کاهش به افزایشی در سرعت 15mm/sec رخ می‌دهد. در نمونه‌های کلسیت، آپاتیت و اورتوز (به ترتیب با مقادیر سختی ۴، ۵ و ۶)، نقطه تغییر به سرعت 10mm/sec منتقل می‌شود. نمونه کوارتز



(الف)



(ب)

شکل ۱۶: مقایسه تغییرات مقادیر نرمالیزه CAI با سرعت لغزش پین، در پین‌های با سختی الف (43HRC، ب) 55HRC

۵- نتیجه‌گیری

[2] Verhoef P.N.W.; 1997; *Wear of rock cutting tools*, Balkema, Rotterdam, 327pp.

[3] CERCHAR; 1973; *Cerchar tests for the measurement of hardness and abrasivity of rocks*, Centre Study Research, French Coal Industry, Document 73-59:1-10.

[4] AFNOR; 2000; *Roches Détermination du pouvoir abrasif d'uneroche Partie 1: Essai de rayure avec une pointe*, NF P 94-430-1.

[5] ASTM D7625-10; 2010; *Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method*, ASTM International.

[6] Alber M., Yarali O., Dahl F., Bruland A., Kasling H., Michalakopolous T. N., Cardu M., Hagan P., Aydin H.; 2014; *ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the CERCHAR abrasivity test*, Rock Mech Rock Eng, 47:261-266.

[7] Rostami J.; 2005; *CAI testing and its implications*, Tunn & Tunn Int, 37:43-45.

[8] West G.; 1989; *Rock abrasiveness testing for tunneling*, Int J of Rock Mech & Min Sci, 26:151-160.

[9] CERCHAR; 1986; *The Cerchar abrasiveness index*, Centre d' Etudes et Recherches de Charbonnages de France, Verneuil.

[10] Girmscheid G.; 2000; *Construction management and construction techniques in tunneling*, Berlin: Ernst and Sohn.

[11] Plinninger R. J., Käsling H., Thuro K.; 2004; *Wear prediction in hard rock excavation using the Cerchar abrasiveness index (CAI)*, In: Proceedings of the ISRM regional Symposium EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquy, Salzburg, Austria, 599-604.

[12] Yarali O., Yasar E., Bacak G., Ranjith P. G.; 2008; *A study of rock abrasivity and tool wear in coal measures rocks*, Int J of Coal Geol, 74:53-66.

[13] Bieniawski Z. T., Celada B., Galera J. M., Tardagiula I.; 2009; *Prediction of cutter wear*

با توجه به آزمایش‌های انجام شده، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که بر خلاف نتایج گزارش شده قبلی [۲۱]، سرعت لغزش نسبی میان نمونه سنگ یا کانی و فولاد، بر مقدار سایش‌های به‌وقوع پیوسته، موثر است. اما این تاثیر، همزمان به سختی نمونه‌های مورد آزمایش و سختی پین‌های مورد استفاده بستگی دارد. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که:

- در نمونه‌های با سختی بالاتر، عموماً تاثیر سرعت بر مقادیر ساینده‌گی، بیش از نمونه‌های با سختی پایین‌تر است.
- با تغییر سرعت لغزش پین روی نمونه، ابتدا مقادیر CAI کاهش می‌یابند ولی با عبور از سرعتی مشخص، این روند کاهش برعکس شده و مقادیر CAI افزایش می‌یابند.
- سرعتی که در آن کمترین سایش رخ می‌دهد (سرعت بهینه)، بستگی به سختی نمونه و پین دارد. در نمونه‌های با سختی بیشتر، سرعت بهینه کاهش می‌یابد. کاهش سختی پین نیز می‌تواند سرعت بهینه را کاهش دهد.

در نهایت، به نظر می‌رسد که می‌توان از نتایج به دست آمده، برای بهینه‌سازی سرعت حرکت ابزارهای برنده روی سطح سنگ، به‌هنگام حفاری مکانیزه، بهره برد. البته برای دستیابی به این هدف، انجام آزمایش‌های بیشتر با دامنه گسترده‌تری از سرعت‌ها و روی دامنه متنوع‌تری از نمونه‌ها و همچنین بررسی دقیق‌تر مکانیزم‌های سایش و تغییرات آنها، با تکنیک‌هایی چون SEM، ضرورت خواهد داشت.

۶- تشکر و قدردانی

مولفین مراتب سپاس خود را از دکتر حسین معماریان، سرپرست آزمایشگاه مهندسی زمین و خانم مهندس شکری‌زاده در آزمایشگاه مطالعات میکروسکوپی دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران، به خاطر فراهم آوردن امکان انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های لازم، اعلام می‌دارند.

References

[1] Deketh H. J. R.; 1995; *Wear of Rock cutting tools, laboratory experiments on the abrasivity of rock*, Balkema, Rotterdam, 144 pp.

- measurements, *J Appl Geophys*, 71:1-5.
- [24] Deliormanli A. H.; 2012; *Cerchar abrasivity index (CAI) and its relation to strength and abrasion test methods for marble stones*, *Constr Build Mater*, 30:16-21.
- [25] Alber M.; 2008; *Stress dependency of the Cerchar abrasivity index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools*, *Tunn and Undergr Space Technol*, 23:351-359.
- [26] Büchi E., Mathier J. F., Wyss C. H.; 1995; *Rock abrasivity – a significant cost factor for mechanical tunnelling in loose and hard rock*. *Tunn*, 95:38-44.
- [27] Michalakopoulous T. N., Anagnostou V. G., Bassanou M. E., Panagiotou G. N.; 2006; *The influence of styli hardness on the Cerchar abrasiveness index value*, *Int J of Rock Mech & Min Sci*, 43:321-327.
- [28] Majeed Y., Abu Bakar M. Z.; 2016; *Statistical evaluation of CERCHAR abrasivity index (CAI) measurement methods and dependence on petrographic and mechanical properties of selected rocks of Pakistan*, *Bull Eng Geol Environ*, 75:1341-1360.
- [29] Hamzaban M. T., Memarian H., Rostami J.; 2014; *Continuous monitoring of pin tip wear and penetration into rock surface using a new Cerchar abrasivity testing device*, *Rock Mech Rock Eng*, 47:689-701.
- [30] Welsh N. C., 1965; *The dry wear of steels I. The general pattern of behavior*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 257: 31-50.
- [31] Hirst W., Lancaster J. K.; 1960; *The influence of Speed on Metallic Wear*, *Mathematical and physical science*: 228-241.
- [32] Saka N., Eleiche A. M., Suh N. P.; 1977; *Wear of metals at high sliding speeds*, *Wear*, 44: 109-125.
- [33] Subramanian C.; 1991; *Effect of sliding speed on the unlubricated wear behaviour of AL-12.3wt.%Si alloy*, *Wear*, 151: 97-110.
- using RME, In: *Proceedings of the ITA congress*, Budapest, Hungary.
- [14] Suana M., Peters T.; 1982; *The Cerchar abrasivity index and its relation to rock mineralogy and petrography*, *Rock Mech Rock Eng*, 15:1-7.
- [15] Al-Ameen S. I., Waller M. D.; 1994; *The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar abrasive index*, *Eng Geol*, 36:293-301.
- [16] Plinninger R. J., Käsling H., Thuro K., Spaun G.; 2003; *Testing conditions and geomechanical properties influencing the cerchar abrasivity index (CAI) value*, *Int J of Rock Mech & Min Sci*, 40:259-263.
- [17] He J., Li S., Li X., Wang X., Guo J.; 2016; *Study on the correlations between abrasiveness and mechanical properties of rocks combining with the microstructure characteristic*, *Rock Mech Rock Eng*, 49:2945-2951.
- [18] Deketh H. J. R.; 1995; *Wear of the cutting tools of rock excavation machines*, In: *Proceedings of the 35th US symposium of Rock Mechanics*, Reno, USA, 342-347.
- [19] Jager W.; 1988; *An investigation into the abrasive capacity of rocks*, *Dissertation*, Delft University of Technology; 1988.
- [20] Reinking M. W.; 1989; *Linear cutting tests in artificial sand-clay mixtures to study the influence of brittleness on abrasive wear of cutting tools*, *Dissertation*, Delft University of Technology; 1989.
- [21] Rostami J., Ghasemi A., Alavi E., Dogruoz C., Dahl F.; 2014; *Study of dominant factors affecting Cerchar abrasivity index*, *Rock Mech Rock Eng*, 47:1905-1919.
- [22] Kahraman S., Alber M., Fener M., Gunaydin O.; 2010; *The usability of Cerchar abrasivity index for the prediction of UCS and E of Misis Fault Breccia: regression and artificial neural network analysis*, *Expert Sys Appl*, 37:8750-8756.
- [23] Khandelwal M., Ranjith P. G.; 2010; *Correlating index properties of rocks with P-wave*

-
- 22 Saka et al
 23 Subramanian
 24 flow strength
 25 So
 26 Molinary et al
 27 Basavarajappa et al
 28 Al-Qutub et al
 29 abrasive wear
 30 adhesive wear
 31 Prasad et al
 32 red mud (RM)
 33 work hardening
 34 Deketh
 35 Deketh's scraping test
 36 carborundum

[34] So H.; 1995; *The mechanism of oxidational wear*, Wear, 184: 161-167.

[35] Monilari A., Straffelini G., Tesi B., Bacci T.; 1997; *Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy*, Wear, 208: 105-112.

[36] Basavarajappa S., Chandramohan G., Mahadevan A., Thangavelu M., Subramanian R., Gopalakrishnan P.; 2007; *Influence of sliding speed on the dry sliding wear behavior and the subsurface deformation on hybrid metal matrix composite*, Wear, 262: 1007-1012.

[37] Al-Qutub A. M., Allam I. M., Abdul Samad M. A.; 2008; *Wear and friction of Al-Al₂O₃ composites at various sliding speeds*, J Mat Sci, 43: 5797-5803.

[38] Prasad N., Sutar K., Mishra S. C., Sahoo S. K., Acharya S. K.; 2013; *Dry sliding wear behavior of aluminum matrix composite using red mud an industrial waste*, Int Res J Pure & App Chem, 3:59-74.

[39] Hamzaban M. T., Memarian H., Rostami J., Ghasemi H.; 2014; *Study of rock-pin interaction in Cerchar abrasivity test*, Int J of Rock Mech & Min Sci, 72:100-108.

زیر نویس ها

-
- 1 wear
 2 solid body
 3 counter body
 4 Cerchar
 5 American Society for Testing and Materials
 6 Alber et al
 7 International Society for Rock Mechanics
 8 West
 9 Cerchar Abrasion Index
 10 Uniaxial Compressive Strength
 11 modulus of elasticity
 12 tensile strenght
 13 Kehl
 14 Siebel
 15 hematite
 16 Hirst
 17 Lancaster
 18 pin on ring
 19 brass
 20 Vickers
 21 Welsh