

## بررسی تاثیر برخی عوامل اصلی بر رفتار سایشی فولاد هادفیلد

مجید عباسی، شهرام خیراندیش، یوسف خرازی و جلال حجازی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

در این مقاله، رفتار سایشی فولاد هادفیلد با استفاده از آزمون پین روی دیسک و سنگ سایشی مورد ارزیابی قرار گرفته است. تاثیر عوامل اصلی این آزمون شامل میزان نیروی عمود بر پین، سرعت خطی دیسک و طول مسیر بر میزان سایش فولاد هادفیلد مشخص شده است. در این تحلیل معادلات رگراسیونی و اثرات اصلی و متقابل این عوامل استخراج گردید. نتایج نشان داد که مکانیزم‌های کندگی و خراشان در اثر نیروهای برشی در مراحل اولیه سایش و ترکدار شدن سطح در اثر خستگی در مراحل پایانی دو مکانیزم اصلی سایش فولاد هادفیلد است. مشخص شد که در آزمون پین روی دیسک با استفاده از سنگ سایشی، نیروی عمود بر پین نسبت به سرعت خطی دیسک نقش مؤثرتری بر میزان کاهش وزن دارد. همچنین با بیشتر شدن طول مسیر (زمان) سایش، نقش نیرو بیشتر می‌گردد در صورتی که نقش سرعت خطی دیسک تقریباً ثابت می‌ماند. به علاوه برای مطالعه شرایط سایش آرام، فشار عمودی کمتر از ۰/۵ مگاپاسکال نیاز است.

واژه‌های کلیدی: تریبولوژی، پین روی دیسک، سنگ سایشی، فولاد هادفیلد، سایش

## Evaluation of some of the main parameters on the wear behavior of Hadfield steel

M. Abbasi, Sh. Kheirandish, Y. Kharrazi and J. Hejazi

Department of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology

**Abstract:** In this paper, the wear behavior of Hadfield steel has been investigated by using the grinding wheel in the pin on disk test method. The main parameters of this test method such as normal load on pin, sliding speed and sliding distance have been studied. In this test, the main and interaction effects of parameters on the weight loss and its regression models have been obtained. The results show that chipping and surface cracking are two basic mechanisms of wear of the steel. In addition, the normal load is more effective than sliding speed in weight loss of the steel. In addition, the role of normal load on the weight loss increases with increasing the sliding distance, while the role of disk velocity fixes. The normal pressure (load) must also be lower than 0.5 MPa for low stress wear condition.

**Keywords:** Tribology, Pin on Disk, Grinding Wheel, Hadfield Steel, Wear

**E-mail of corresponding author (s):** majid\_abbasi@iust.ac.ir

## مقدمه

فولاد هادفیلد با ترکیب اسمی ۱/۲ درصد کربن و ۱۳ درصد منگنز توسط سرروبرت هادفیلد در سال ۱۸۸۲ میلادی معرفی شد [۱]. استفاده در تجهیزات حمل و نقل و فرآوری خاک، استفاده در صنایع کانه‌آرایی برای لاینرها و چکش سنگ‌شکن‌ها و آسیاب‌ها، استفاده در تجهیزات و ماشین‌آلات راه‌سازی برای ناخن‌ها و بیل‌های مکانیکی، ساخت ریل آهن (به ویژه برای تقاطع‌ها، سراسیمی‌ها و ایستگاه‌ها) و حتی استفاده در صنایع خودروسازی نمونه‌هایی از کاربردهای گسترده این فولاد است [۱، ۲].

رفتار این فولاد در حین تغییر شکل پلاستیک به گونه‌ای است که دارای خواص ویژه‌ای نظیر چقرمگی و مقاومت به ضربه بالا است. همچنین مقاومت به سایش آن به ویژه در شرایط سایش ضربه‌ای و خراشی بسیار بالا است [۲، ۳]. در واقع بالا بودن نرخ کارسختی این فولاد سبب رفتار منحصر به فرد آن در شرایط ضربه و سایش شدید شده است [۳]. از طرفی دیگر، مقاومت به سایش این فولاد تحت سایش آرام (تنش کم و بدون ضربه) پایین است [۲، ۴]. بنابراین رفتار سایشی و تریبولوژیکی فولاد هادفیلد تابعی از شرایط مکانیکی و فیزیکی سایش است. از این رو در هر شرایطی از آزمایش یا کارکرد فولاد هادفیلد، ابتدا باید محدوده سایش شدید و آرام آن را شناخت. یعنی تعیین کرد که در چه محدوده‌ای از عوامل سایشی، سایش شدید یا آرام مشاهده می‌گردد. این شناخت کمک می‌کند که طراحان و کاربران فولادهای هادفیلد (به ویژه در ماشین‌آلات و تجهیزات معدنی) شرایط کاربری این فولادها را به گونه‌ای طراحی کنند که طول عمر بیشتری از آن به دست آید.

تحقیقات گذشته نشان داد که نرخ بالای کارسختی در فولاد هادفیلد به علت‌هایی نظیر استحاله آستنیت به مارتزیت در اثر تغییر شکل پلاستیک<sup>۱</sup> [۵]، ایجاد دوقلویی مکانیکی [۶]، پیرسازی کرنشی دینامیکی [۷، ۸] و تقابل

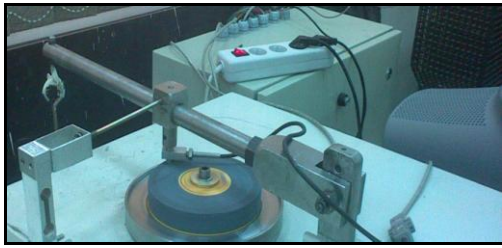
ناجایی‌ها با نقص‌های انباشتگی [۹، ۱۰] است. بر اساس این تحقیقات مشخص شده است که مکانیزم اصلی تغییر شکل پلاستیک در فولاد هادفیلد ایجاد دوقلویی مکانیکی و لغزش است. ولی این مکانیزم به تنهایی عامل بالا بودن نرخ کارسختی آن نیست. در واقع پیرسازی کرنشی دینامیکی همراه با ایجاد زوج‌های کربن-منگنز در ناحیه تغییر شکل یافته عوامل اصلی بالا بودن نرخ کارسختی در فولادهای هادفیلد هستند [۳، ۷].

در تازه‌ترین تحقیقات انجام شده، یان و همکارانش [۱۱] اثر عملیات ساچمه‌کوبی و ایجاد نانو ساختار در لایه‌های سطحی را بر رفتار سایشی فولاد هادفیلد بررسی کردند. آنها مشخص کردند که این عملیات در تمامی شرایط سایشی نمی‌تواند سبب افزایش مقاومت به سایش گردد. آنها نمونه‌های ساچمه‌کوبی شده را به دو روش مورد آزمایش قرار دادند. در آزمایش نخست، آنها به روش پین روی دیسک (سایش دو جزئی<sup>۲</sup>) با استفاده از کاغذ سنباده با ذرات ساینده سرامیکی یافتند که عملیات ساچمه‌کوبی نمی‌تواند روش مناسبی برای بهبود مقاومت سایش باشد. در آزمایش دوم آنها سایش را به صورت سه‌جزئی<sup>۳</sup> انجام داده‌اند. به این صورت که ذرات ساینده (با سختی معادل ۵۰۰ ویکرز) روی یک ریل قرار داده می‌شد و نمونه به صورت یک بلوک تحت نیروی عمودی و سرعت مشخص روی ریل حرکت می‌کرد. آنها در این آزمایش بر خلاف آزمایش اول یافتند که عملیات ساچمه‌کوبی روش مناسبی برای بهبود مقاومت به سایش است. هر چند این نتیجه‌گیری، مطالعه شرایط و عوامل سایش را با توجه به روش آزمایش با اهمیت نشان می‌دهد ولی ضعف‌های اساسی که در این تحقیق مشاهده شده به شرح زیر ارائه می‌گردد:

۱- دو روش آزمایش سایش خراشان در شرایطی با یکدیگر مقایسه شدند که مقدار انتخاب شده برای عوامل سایشی (نظیر نیروی عمودی و سرعت خطی) یکسان یا متناسب نبوده است.

2. Two-Body Abrasive Wear  
3. Three-Body Abrasive Wear

1. Strain Induced Transformation of  $\gamma$  to  $\alpha$  or  $\epsilon$  Martensite



شکل ۱- تصویری از دستگاه پین روی دیسک با استفاده از سنگ سایشی و تجهیزات کنترل کامپیوتری

سرامیکی به روش ریخته‌گری دقیق و با استفاده از مدل فومی ساخته شده است. پس از ریخته‌گری برای حذف کاربدهای موجود در ساختار ریختگی و ایجاد ساختار آستنیتی همگن، نمونه‌ها در دمای ۱۰۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه آستنیتیه و بعد در آب سرد، کوئنچ شدند. جدول ۱، خواص مکانیکی فولاد مورد استفاده در دمای محیط را نشان می‌دهد که با نرخ کرنش  $10^{-4} S^{-1}$  در آزمون کشش بدست آمده است. برای کنترل ابعادی با استفاده از سنگ‌زنی دقیق مغناطیسی تمامی نمونه‌های به شکل استوانه با قطر ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴ سانتی‌متر تهیه شدند. سطح سایش تمامی نمونه‌ها قبل از انجام سایش با استفاده از کاغذ سنباده شماره ۶۰۰ یکنواخت شدند تا زبری اولیه سطح در تمامی نمونه‌ها یکسان باشد. آزمایش سایش در دمای محیط با رطوبت نسبی بین ۴۰-۶۰ درصد و بدون روان‌کار انجام شده است.

عوامل اصلی آزمون سایش نظیر میزان نیروی عمود بر پین، طول مسیر سایش و سرعت خطی دیسک بر میزان کاهش وزن و نرخ سایش فولاد هادفیلد مورد مطالعه قرار گرفت. نرخ سایش ویژه<sup>۲</sup> برای هر طول مسیر و شرایط مختلف با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است [۱۳].

$$K = \frac{\Delta m}{L.F_N} \quad (1)$$

که در آن  $K$  نرخ سایش بر حسب  $mg/m.N$ ،  $\Delta m$  میزان کاهش وزن نمونه در هر طول سایش بر حسب میلی‌گرم،  $L$  طول مسیر سایش بر حسب متر و  $F_N$  نیروی عمودی روی پین بر حسب نیوتن است. به علاوه معکوس

۲- به علت استحکام کم دانه‌های ذرات ساینده روی کاغذ سنباده، عملاً طول مسیر سایش بسیار کم (۸/۷ متر) انتخاب شده است.

۳- از نقش سرعت خطی دیسک (نمونه) بر میزان سایش صرف‌نظر شده است.

۴- به علت انتخاب نامناسب عوامل سایشی، تحلیل درستی بر مکانیزم‌های سایش انجام نشده است.

در این مقاله رویه‌ای در آزمون پین روی دیسک ارائه گردید که در آن از سنگ ساینده استفاده شده است. مهم‌ترین ویژگی استفاده از سنگ سایشی در مقایسه با کاغذ سنباده، امکان انجام آزمون در زمان یا طول مسیر بیشتر و استحکام بالاتر ذرات ساینده است. همچنین در این روش نقش عوامل اصلی آزمون سایش بر رفتار تریبولوژیکی و مقاومت به سایش فولاد هادفیلد ارزیابی شده است تا شرایط سایش شدید و آرام به درستی شناخته و تفکیک شود.

### روش تحقیق

در این تحقیق با رویکرد استفاده از روش پین بر دیسک و برای بررسی مقاومت به سایش ساینده (خرایشان) فولاد هادفیلد، از سنگ‌های سایشی آلومینایی (A) استحکام بالا (P) با کد استاندارد<sup>۱</sup> A36P4V [۱۲] به عنوان ساینده استفاده شده است. شکل ۱ تصویری از این دستگاه آزمایشگاهی مجهز به سیستم ثبت درجا دمای پین، ضریب سایش، تعداد دور و زمان سایش را نشان می‌دهد. برای ساخت پین از فولاد منگنزی ریختگی آلیاژ شده با آلومینیم با ترکیب ۱/۳۵ درصد کربن و ۱۴ درصد منگنز و ۰/۲ درصد آلومینیم استفاده شده است. عملیات ذوب در کوره القایی با ظرفیت ۲۵ کیلوگرم تحت اتمسفر آرگون و با استفاده از قراضه‌های فولادی کم کربن، فرومگنز و آلومینیم خالص تجاری انجام شده است. قالب از پوسته

۱- استحکام سنگ را با حروف انگلیسی از A تا Z نشان می‌دهند. هرچه کد استحکام سنگ به حرف Z نزدیک‌تر باشد، استحکام بالاتر دارد و میزان فرسایش آن به هنگام سنگ‌زنی یا آزمون سایش کمتر است [۱۲].

جدول ۲- طرح آزمایش سایش

عوامل		کد آزمایش
$V_L$ (m/s)	$F_N$ (N)	
۰/۵۵	۳۰	A
۱/۱	۳۰	B
۰/۵۵	۷۰	C
۱/۱	۷۰	D

متغیرهای وابسته و پاسخ‌های مدل انتخاب شدند که تابعی از دو متغیر مستقل سرعت خطی دیسک و نیروی عمود بر پین بودند. با استفاده از داده‌های مربوطه، اثرات اصلی و متقابل نیروی عمودی و سرعت خطی روی میزان کاهش وزن در هر طول مسیر سایش مشخص شد.

اثر اصلی هر متغیر در هر سطح برابر متوسط تمامی مقادیر کاهش وزن مشاهده شده‌ای است که متغیر مورد نظر در آن سطح قرار دارد [۱۵]. همچنین اثر اصلی هر عامل را می‌توان بدون در نظر گرفتن سطح آن بیان نمود که در این صورت برابر اختلاف بین اثر اصلی آن عامل در دو سطح ۱ و ۲ است. در این صورت اثر اصلی هر عامل بیان می‌کند که وقتی مقدار آن عامل از سطح ۱ به سطح ۲ تغییر کند، میزان سایش (پاسخ آزمایش) چقدر تغییر می‌کند [۱۵].

اثر متقابل نیرو در سطح  $A$ ،  $F_{Ni}$ ، با سرعت خطی در سطح  $A$ ،  $V_{Lij}$ ، برابر است با متوسط تمامی مقادیر مشاهده شده‌ای که دو متغیر در سطوح مورد نظر قرار دارند [۱۵]. اثر متقابل، مقدار تغییرات در کاهش وزن را در شرایط تعریف شده بیان می‌کند.

لذا نمودار مقادیر تغییرات کاهش وزن مشاهده شده بر حسب نیرو در دو سرعت ثابت (۰/۵۵ و ۱/۱ متر بر ثانیه) و بر عکس نمودار کاهش وزن مشاهده شده بر حسب سرعت خطی در دو نیروی ثابت (۳۰ و ۷۰ نیوتن) اثرات متقابل دو عامل را مشخص می‌سازد.

همچنین با کمک روش عددی رگرسیون، مدل رگرسیونی درجه یک غیرخطی برای بیان رابطه میزان کاهش وزن با مقدار نیروی عمودی و سرعت خطی دیسک در طول

نرخ سایش،  $K^{-1}$ ، به عنوان معیار مقاومت به سایش در نظر گرفته شده است.

برای مطالعات میکروسکوپی از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM و میکروسکوپ نوری استریو مجهز به لنز دیجیتالی استفاده شده است. نمونه‌های متالوگرافی پس از ماند سرد با استفاده از کاغذ سنباده نوع SiC تا شماره ۱۲۰۰ ساییده شده و سپس با استفاده از پودر آلومینا ۱ و یک چهارم میکرومتر پولیش شده‌اند. [۱۴].

همچنین از دستگاه میکروسختی سنجی به روش ویکرز ساخت شرکت بوهرلر تحت نیروی ۲۰۰ گرم به مدت ۲۰ ثانیه برای اندازه‌گیری سختی سطح ساییده شده و لایه‌های زیری استفاده شده است.

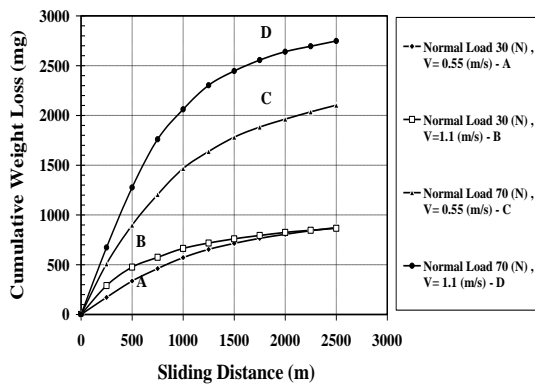
جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد مورد استفاده در دمای محیط

استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)	سختی اولیه (HV)	سختی بعد از شکست (HV)	چگالی ( $kg/m^3$ )
۳۸۰	۸۷۰	۴۸	۲۰۵	۴۸۰	۷۷۰۰

در این بررسی از روش‌های عددی طراحی آزمایشات<sup>۱</sup> برای استخراج معادلات تجربی و تعیین اثرات اصلی<sup>۲</sup> و متقابل<sup>۳</sup> عوامل بر میزان سایش استفاده شده است [۱۵]. مطابق جدول ۲، آزمایش سایش با دو متغیر اصلی و مستقل نیروی عمود بر پین و سرعت خطی دیسک و در دو سطح و با سه بار تکرار انجام شد. پس از هر ۲۵۰ متر سایش، کاهش وزن نمونه‌ها با استفاده از یک ترازوی دقیق با دقت ۰/۱ میلی‌گرم اندازه‌گیری شده تا نمودار کاهش وزن بر حسب طول مسیر سایش تا ۲۵۰۰ متر حاصل شود. سطوح انتخاب شده برای نیرو و سرعت خطی به گونه‌ای انتخاب شده است تا سایش شدید و آرام مطالعه گردد.

برای تحلیل عددی، میزان کاهش وزن نمونه‌ها در پنج طول مسیر ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ متر به عنوان

1. Design of Experiments (DOE)
2. Main Effect
3. Interaction Effect



شکل ۲- اثر نیروی عمودی و سرعت خطی دیسک بر میزان کاهش وزن بر حسب مسافت طی شده

جدول ۳- نرخ متوسط کاهش وزن در چهار شرایط مختلف سایشی در دو مرحله از نظر طول مسیر سایش

نرخ کاهش وزن (میلی گرم بر متر) در حالت‌های مختلف سایش				مرحله سایش
D	C	B	A	
۲/۴	۱/۶	۰/۷	۰/۵۵	۱۰۰۰ متر اول
۰/۲	۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۱۹	در ۱۵۰۰ متر آخر

مطابق شکل ۳، مشاهدات میکروسکوپ الکترونی از محصولات سایش نیز این نتایج را تایید می‌کند. مشاهدات نشان می‌دهد که محصولات سایش در مراحل اولیه در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید به صورت تراشه‌های بلند (در حدود  $500 \mu\text{m}$  تا  $1 \text{mm}$ ) و با نشانه‌هایی واضح از باندهای لغزشی تشکیل می‌شوند. این رفتار در هر چهار حالت سایش مورد مطالعه، تقریباً یکسان مشاهده شده است. بنابراین در مراحل اولیه، سایش در اثر خیش خوردن و کندگی<sup>۲</sup> پیشرفت می‌کند و در نتیجه مکانیزم سایش خراشان غالب است [۱۳، ۱۶، ۱۷].

شکل ۴ توزیع سختی از سطح ساییده شده را در شرایط مختلف نشان می‌دهد. مطابق این نتایج (شکل ۴ و جدول ۱) مشخص است که فولاد هادفیلد از نرخ کار سختی بسیار بالایی برخوردار است. پس از طی مراحل اولیه، سطح سایش در اثر نیروهای سایشی (به ویژه تحت نیروی ۷۰ نیوتن) کارسخت می‌گردد و سختی آن به بیش از ۲/۵

مسیرهای مختلف مشخص شد که معادله کلی آن به صورت زیر است:

$$W_L = f(F_N, V_L) = \beta_0 + \beta_{F_N} \cdot F_N + \beta_{V_L} V_L + \beta_{F_N, V_L} F_N \cdot V_L + \varepsilon \quad (2)$$

که در آن  $W_L$  میزان کاهش وزن بر حسب میلی گرم، به صورت تابعی از نیروی عمود بر پین  $F_N$  بر حسب نیوتن و سرعت خطی دیسک  $V_L$  بر حسب متر بر ثانیه است و ضرایب رگرسیون  $\beta_i$  مقادیر ثابتی هستند که از آنالیز رگرسیون بدست می‌آیند. همچنین  $\varepsilon$  مقدار خطای کل مدل است [۱۵].

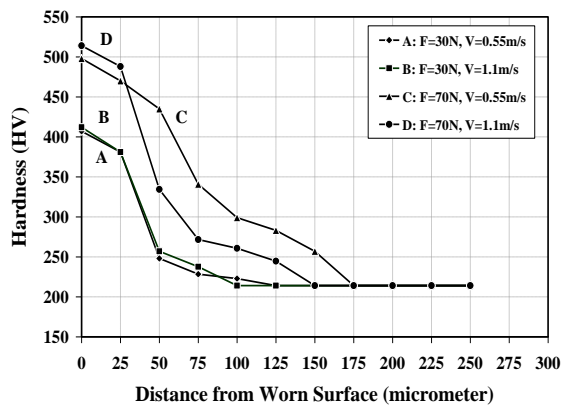
## نتایج و بحث

### ۱- تغییرات رفتار سایش با طول مسیر سایش

شکل ۲، میزان کاهش وزن نمونه‌ها بر حسب طول مسیر سایش در چهار شرایط مختلف را نشان می‌دهد. همچنین بر اساس داده‌های این شکل، نرخ متوسط کاهش وزن بر حسب طول مسیر سایش در دو مرحله ۱۰۰۰ متر اول و ۱۵۰۰ متر پایانی محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است.

مطابق این نتایج، مشاهده می‌شود که رفتار سایش بر حسب طول مسیر سایش از ابتدا خطی نیست. میزان کاهش وزن (سایش) در مراحل اولیه سایش، بسیار زیاد است. سپس با بیشتر شدن طول مسیر سایش، نرخ کاهش وزن بر حسب طول مسیر روند نزولی پیدا می‌کند تا اینکه تقریباً در مسیرهای بالای ۱۰۰۰ متر، ثابت می‌گردد. به این شرایط سایش پایدار<sup>۱</sup> اطلاق می‌گردد که رابطه خطی بین میزان کاهش وزن و مسافت طی شده برقرار می‌شود.

مطابق جدول ۱، مشخص است که سختی اولیه و استحکام تسلیم این فولاد در شرایط کار نشده پایین است. بنابراین در مراحل اولیه سایش به علت پایین بودن استحکام تسلیم و سختی اولیه (حدود ۲۰۰ ویکرز) فولاد هادفیلد، محصولات سایش در اثر نیروهای برشی ذرات ساینده با تغییر شکل پلاستیک زیاد از روی سطح نمونه کنده می‌شوند [۱۶].



شکل ۴- توزیع سختی از سطح ساییده شده در شرایط مختلفی از نیرو و سرعت خطی پس از ۲۵۰۰ متر سایش

سطحی و رشد آن به سمت سطح است [۱۱، ۱۶]. با توجه به چقرمگی بالای زمینه آستنیتی فولاد هادفیلد، پیشرفت این مکانیزم سایش، نیاز به زمان دارد [۱۶]. به عبارت دیگر سایش، در اثر خستگی پیشرفت می‌کند. رشد این ترک‌ها در اثر تنش‌های خستگی سایشی سبب جدا شدن تراشه‌ها در اندازه‌های بسیار کوچک‌تر از تراشه‌های اولیه (که در اثر تغییر شکل پلاستیک جدا شده‌اند) می‌شود. بنابراین در اثر کارسخت شدن سطح، مکانیزم سایش خراشان به سایش خستگی تغییر می‌نماید [۱۷].

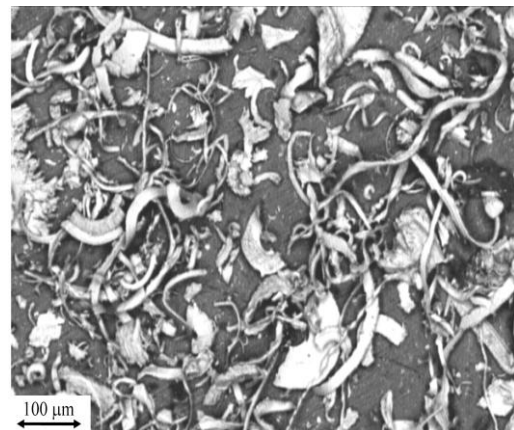
شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه C را نشان می‌دهد که اثر سایش خراشان و نیز وجود ترک‌های سطحی در آن نمایان است.

## ۲- اثر نیرو و سرعت خطی دیسک

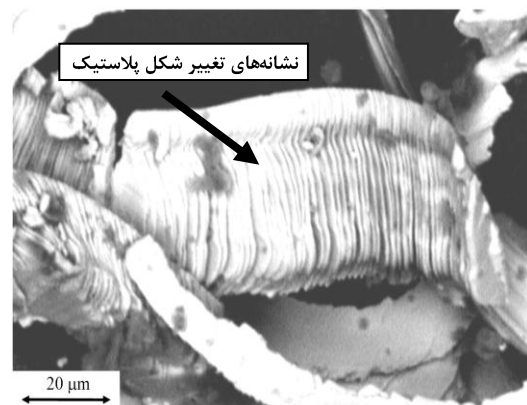
در بخش قبل، تغییر الگوی رفتاری سایش فولاد هادفیلد با افزایش طول مسیر بدون در نظر گرفتن میزان نیروی عمودی و سرعت خطی دیسک بررسی شده است. در این بخش، به نقش این دو عامل بر رفتار سایشی فولاد هادفیلد پرداخته می‌شود.

مطابق شکل ۲ مشخص است که افزایش نیروی عمود بر پین و سرعت خطی دیسک سبب افزایش میزان کاهش وزن (سایش) در تمامی مسافت‌های طی شده می‌گردد. همچنین تغییرات نیروی عمودی در مقایسه با تغییرات

برابر مقدار اولیه می‌رسد. حتی سختی در این شرایط بیش از سختی پس از شکست نمونه‌های کشش است که در کرنش پلاستیک کم حاصل شده است (به داده‌های جدول ۱ و شکل ۴ نگاه شود). در نتیجه سطح فولاد بیش از حد ممکن سخت می‌گردد. این تغییر رفتار مکانیکی سطح موجب می‌گردد تا پیشرفت فرآیند سایش با جدا شدن



(الف)



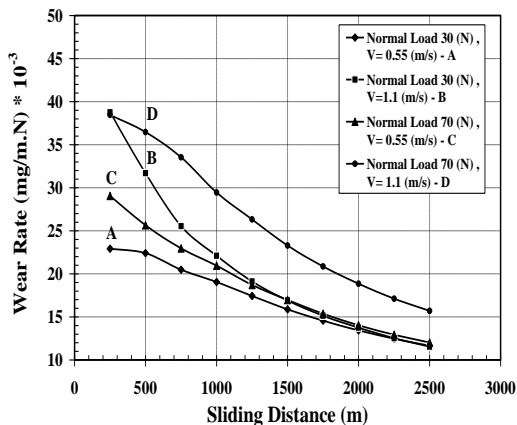
(ب)

شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از: تراشه‌های سایش در اندازه‌های مختلف، (ب) نشانه‌های تغییر شکل پلاستیک روی تراشه بزرگ در مراحل اولیه سایش

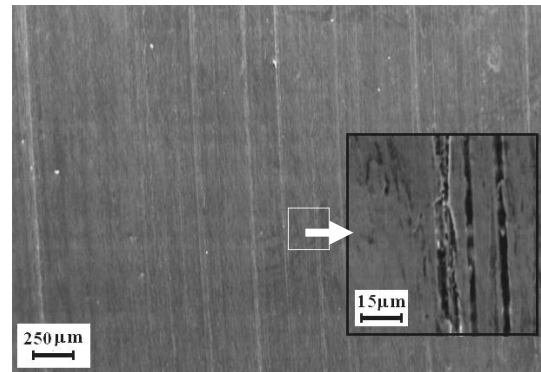
تراشه‌ها از طریق تغییر شکل پلاستیک صورت نگیرد، چرا که رفتار سطح شبیه مواد سخت و ترد است. لذا نیروهای برشی فقط در مراحل اولیه که فولاد سختی پایینی دارد و شرایط تغییر شکل پلاستیک سطح فراهم است، عامل اصلی جدا شدن تراشه‌ها است. بنابراین راه ممکن برای جدا شدن محصولات سایش، جوانه‌زنی و ایجاد ترک در زیر لایه‌های

است. در این شرایط سرعت خطی دیسک نسبت به نیروی عمودی تاثیرگذاری بیشتری بر مکانیزم سایش دارد. پس از طی مسافت نزدیک به ۱۰۰۰ متر، مشاهده می‌گردد که نرخ سایش و به تبع آن مقاومت به سایش در سه شرایط A، B و C تقریباً یکسان می‌شود. این پدیده به این معنی است که مکانیزم سایش در این سه شرایط یکسان است. در حالی که در شرایط D که سرعت و نیروی عمودی هر دو بالا انتخاب شده‌اند، مقاومت به سایش کمتری از سه حالت دیگر مشاهده می‌گردد. به عبارت دیگر، در حالت D به علت بالا بودن سرعت خطی و در نتیجه بالا بودن شدت نیروی‌های برشی، حذف لایه‌های کارسخت شده سریع‌تر انجام می‌گیرد و تعمیق لایه‌های کارسخت شده نسبت به سایر حالت‌ها کمتر است.

مطابق شکل ۴، بررسی دقیق توزیع سختی در زیر سطح سایش نشان می‌دهد که عمق لایه سخت شده در شرایط D کمتر از حالت C است. این نشان می‌دهد که سرعت خطی بالا در مراحل اولیه سایش، سبب خراشیده شدن بیشتر سطح و حذف سریع لایه‌های کارسخت شده می‌گردد. مطابق شکل‌های ۶ و ۷ و با توجه به بالا بودن نرخ کارسختی در فولادهای هادفیلد مشاهده می‌گردد که نرخ سایش در مسیرهای طولانی سایش تا حدودی مستقل از سرعت و بار عمودی می‌گردد. بنابراین آنچه که باعث اختلاف شدید در میزان سایش (کاهش وزن) نمونه‌ها در



شکل ۶- اثر نیروی عمودی و سرعت خطی دیسک بر نرخ سایش بر حسب مسافت طی شده



(الف)



(ب)

شکل ۵- تصاویر SEM از سطح سایش نمونه C: (الف) در مراحل اول سایش، (ب) در مراحل سایش پایدار (به ایجاد ترک در سطح ساییده شده توجه شود)

سرعت خطی دیسک تاثیر بیشتری بر میزان کاهش وزن (سایش) دارد. چرا که میزان سایش تحت نیروی ۷۰ نیوتن در هر دو سرعت خطی بیشتر از شرایطی است که نیروی ۳۰ نیوتن استفاده شد.

بر اساس داده‌های شکل ۲، نرخ سایش و مقاومت به سایش بر حسب مسافت طی شده به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. در هر دو شکل مشخص است که در مراحل اولیه، سرعت خطی دیسک به شدت بر نرخ سایش و مقاومت به سایش تاثیرگذار است. به عبارت دیگر در مراحل اولیه سایش، در شرایطی که سرعت خطی دیسک ۱/۱ متر بر ثانیه است (حالت‌های B و D)، میزان نرخ سایش بالاتر از شرایطی است که سرعت ۰/۵۵ متر بر ثانیه (حالت‌های A و C) است. این رفتار نشان می‌دهد که در مراحل اول سایش، مکانیزم کنده شدن تراشه‌ها در اثر بالا بودن نیروی برشی و پایین بودن سختی اولیه سطح، غالب

نتیجه‌گیری را در تحقیقات آقای یان و همکارانش [۱۱] می‌توان یافت. بنابراین در مرحله استفاده از فولاد هادفیلد، طراحی صحیح متغیرهای فرآیند به گونه‌ای که عوامل سایشی در محدوده تعریف شده مطلوب قرار گیرند، بسیار ضروری است تا طول عمر قطعات ساخته شده از فولاد هادفیلد بیشتر گردد.

### ۳- بررسی و تحلیل آماری نتایج

برای کمی کردن اثرات اصلی و متقابل عوامل، نتایج بدست آمده در طول مسیر سایش ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متر به عنوان نمونه انتخاب و در جدول ۴ ارائه شده است.

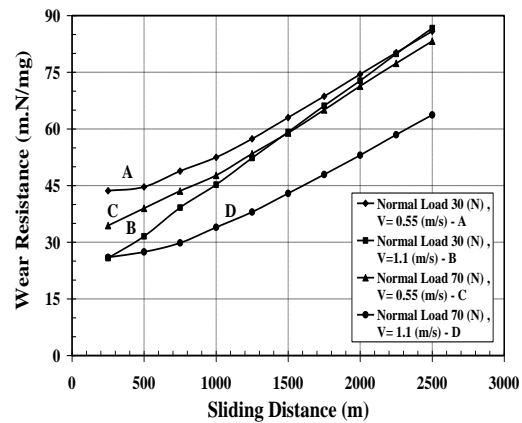
جدول ۴- متوسط کاهش وزن مشاهده شده بر حسب میلی گرم در طول مسیرهای سایش مختلف (با سه بار تکرار)

طول مسیر سایش (m)	۲۵۰۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	میانگین	
A	۸۶۵	۸۰۵	۷۱۴	۵۷۲	۳۳۶		۳۰۰
B	۸۷۳	۸۲۵	۷۶۰	۶۶۳	۴۷۵		
C	۲۱۰۲	۱۹۶۳	۱۷۸۱	۱۴۶۶	۸۹۷		
D	۲۷۴۸	۲۶۴۰	۲۴۴۵	۲۰۶۰	۱۲۷۶		

### ۳-۱- بررسی اثرات اصلی عوامل

در شکل ۸ اثر اصلی دو عامل در دو سطح بالا و پایین بررسی شده است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که در تمامی طول مسیر سایش، با افزایش نیرو و سرعت خطی دیسک، میزان سایش افزایش می‌یابد. در این بین، نقش نیرو بسیار نمایان است، به عبارت دیگر تغییرات نیرو، تغییرات بیشتری در کاهش وزن ایجاد می‌نماید. چرا که مطابق شکل ۸، در تمامی طول مسیرهای سایش انتخاب شده، شیب خطوط مربوط به نیرو بیشتر از سرعت خطی است.

برای بیان عددی پدیده فوق اگر طول مسیر ۱۰۰۰ متر به عنوان نمونه در نظر گرفته شود، وقتی نیرو از ۳۰ نیوتن به ۷۰ نیوتن افزایش می‌یابد، میزان سایش به اندازه ۱۱۴۶ میلی‌گرم افزایش می‌یابد. در حالی که در همین طول مسیر، با افزایش سرعت خطی دیسک از ۰/۵۵ به ۱/۱ متر بر



شکل ۷- اثر نیروی عمودی و سرعت خطی دیسک بر مقاومت به سایش بر حسب مسافت طی شده

شرایط مختلف می‌گردد، میزان سایش در مراحل اولیه است. به بیان دیگر در مرحله اول سایش که استحکام تسلیم و سختی اولیه فولاد (۲۰۰ ویکرز) نسبت به سختی ذرات ساینده سنگ (حدود ۲۰۰۰ ویکرز) بسیار پایین است، هر چه نیروی اولیه و سرعت خطی بیشتر باشد، قدرت ذرات ساینده برای خراشاندن سطح بیشتر است [۱۷]. به همین دلیل مشاهده می‌گردد که در دو شرایط D و C که نیرو عمودی برابر ۷۰ نیوتن است، میزان کاهش وزن در مراحل اولیه بسیار زیاد است. بنابراین اگر بتوان با روش‌هایی، سایش اولیه این فولاد را کاهش داد، می‌توان عمر بیشتری برای چنین قطعاتی ایجاد نمود. برای این منظور راه‌کارهای متعددی در حال مطالعه است که از آن جمله عملیات ساچمه‌کوبی قبل از استفاده [۱۳]، آلیاژسازی با آلومینیم [۱۸] و ساخت کامپوزیت‌هایی از فولاد هادفیلد با کاربرد تنگستن [۱۹] را می‌توان نام برد.

با مقایسه منحنی‌های A، B و C در شکل‌های ۶ و ۷ نتیجه می‌شود که در طول مسیرهای بالاتر از ۱۰۰۰ متر و در محدوده از نیرو و سرعت خطی دیسک که مطالعه شده است، مکانیزم سایش مستقل از این عوامل است. لذا می‌توان انتظار داشت که عملیات پیش‌کرشی بتواند سبب بهبود مقاومت به سایش این فولاد در محدوده تعریف شده گردد. در صورتی که در شرایط D نمی‌توان چنین انتظاری داشت. همچنان که در مقدمه به آن اشاره شد، چنین



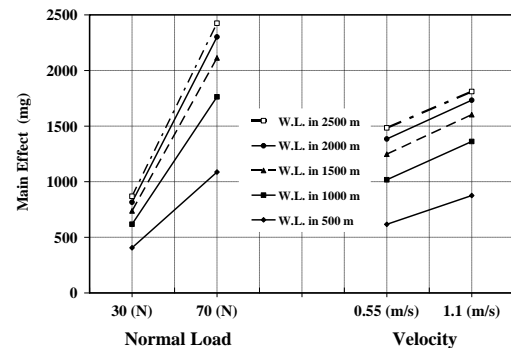
### ۳-۲- بررسی اثر متقابل عوامل

مطابق داده‌های جدول ۴، اثرات متقابل نیرو و سرعت بر میزان سایش در طول مسیرهای مختلف استخراج شده و در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به چند روش نشان داده شد. شکل ۱۰ این اثر را با توجه به سطوح هر دو عامل و شکل‌های ۱۱ و ۱۲ با توجه به سطوح تغییراتی یکی از عوامل بر حسب طول مسیر سایش نشان می‌دهد.

در شکل ۱۰، شیب خط‌های رسم شده نشان دهنده میزان اثرات متقابل مورد نظر است. به عنوان نمونه در سمت چپ این شکل مشاهده می‌گردد که در نیروی ۳۰ نیوتن، وقتی سرعت خطی دیسک از ۰/۵۵ به ۱/۱ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد، تغییرات کاهش وزن (به جز در ۵۰۰ متر اول)، ثابت و ناچیز است. ولی در نیروی ۷۰ نیوتن با تغییر سرعت سایش، تغییرات کاهش وزن در تمامی طول مسیرها، بیشتر از شرایط قبلی است. به عبارت دیگر تاثیر افزایش سرعت خطی دیسک در کاهش وزن زمانی مشاهده می‌گردد که نیروی اعمال شده بر پین زیاد (حدود ۷۰ نیوتن) باشد.

در سمت راست شکل ۱۰، اثر متقابل سرعت با افزایش نیرو نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش نیرو در هر دو سرعت مورد نظر، میزان سایش افزایش می‌یابد. البته در سرعت ۱/۱ متر بر ثانیه سایش شدیدتری مشاهده می‌گردد چرا که شیب نمودارهای مربوط به آن تندتر است. در شکل ۱۱، اثرات متقابل نیرو با تغییرات سرعت در سمت چپ و اثرات متقابل سرعت با تغییرات نیرو در سمت راست نشان داده شده است.

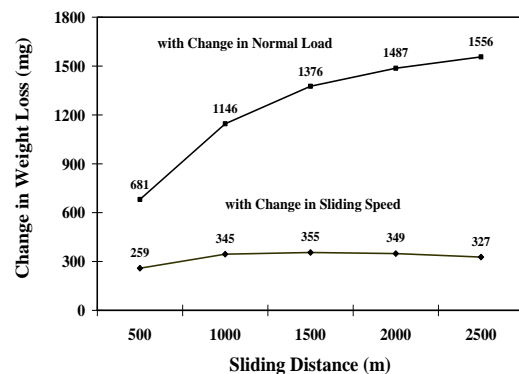
نتیجه جالب از شکل ۱۱ این است که مطابق نمودارهای سمت راست آن، مشاهده می‌گردد که تحت نیروی ۳۰ نیوتن، هر چه طول مسیر سایش بیشتر می‌گردد، افزایش سرعت خطی دیسک، اثر کاهنده‌ای بر میزان افزایش سایش دارد. در حالی که در نیروی ۷۰ نیوتن، افزایش سرعت خطی دیسک، اثر افزایش‌دهنده‌ای دارد. مرز بین این دو حالت را به خوبی در این نمودار می‌توان شناخت. تقریباً در محدوده ۴۰ تا ۴۵ نیوتن، می‌توان انتظار داشت که تغییرات سرعت



شکل ۸- اثرات اصلی نیروی عمودی و سرعت خطی دیسک در دو سطح بالا و پایین بر حسب طول مسیر سایش

ثانیه، میزان سایش فقط به اندازه ۳۴۵ میلی‌گرم افزایش می‌یابد. این چنین رفتار در تمامی طول مسیر سایش مشاهده می‌گردد. شکل ۹ همین نتایجی که از شکل ۸ بدست آمده را با حذف کردن سطوح تغییرات عوامل نشان می‌دهد.

از منحنی پایینی شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات سرعت خطی دیسک از ۰/۵۵ به ۱/۱ متر بر ثانیه تقریباً تغییرات ثابتی (حدود ۳۴۵ میلی‌گرم) بر میزان سایش ایجاد می‌نماید که با افزایش طول مسیر تغییر نمی‌کند. در حالی که از منحنی بالایی شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر افزایش نیرو از ۳۰ به ۷۰ نیوتن با افزایش طول مسیر سایش صعودی است. بنابراین در این محدوده‌ای از نیرو و سرعت خطی که مطالعه شد، مشاهده می‌گردد که در کاهش وزن فولاد هادفیلد نقش نیروی عمود بر پین بیشتر از سرعت خطی دیسک بیشتر است.



شکل ۹- تغییرات اثرات اصلی نیروی عمودی و سرعت خطی دیسک بر کاهش وزن بر حسب طول مسیر سایش

نیوتن (معادل ۰/۵ مگاپاسکال تنش عمودی) و سرعت‌های کم (حدود ۰/۵ متر بر ثانیه یا کمتر) می‌توان شرایط سایش آرامی را طراحی نمود که در آن مکانیزم‌های سایش تقریباً مستقل از تغییرات سرعت خطی دیسک باشد.

شکل ۱۲ بیان ساده‌تری از شکل ۱۱ را ارائه می‌نماید. این شکل، اثرات متقابل دو عامل بر میزان تغییرات کاهش وزن را بر حسب طول مسیر سایش به صورت چهار نمودار مستقل نشان داده است. مشخص است که در نیروی ۳۰ نیوتن، افزایش سرعت، تاثیر کاهنده‌ای بر تغییرات کاهش وزن دارد. در حالی که در ۳ حالت دیگر چنین رفتاری مشاهده نمی‌گردد.

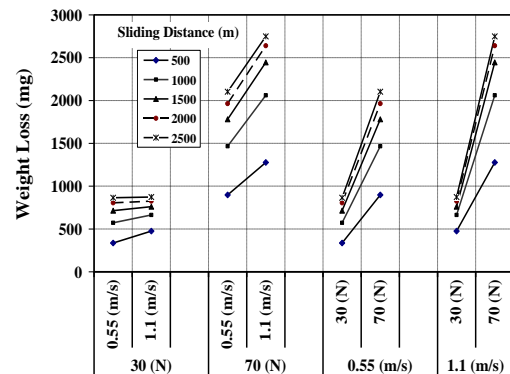
برای درک بیشتر این پدیده، اندازه‌گیری ضریب اصطکاک در ۳ نیروی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ نیوتن تحت سرعت خطی ۰/۷ متر بر ثانیه انجام شده است. نتایج این اندازه‌گیری در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشخص است که در مرحله اول با افزایش نیرو از ۳۰ به ۵۰ نیوتن، متوسط ضریب اصطکاک از ۰/۳۴ به ۰/۴۰ افزایش می‌یابد. ولی در مرحله بعد با افزایش نیرو از ۵۰ به ۷۰ نیوتن، متوسط ضریب اصطکاک از ۰/۴ به ۰/۲۹ کاهش می‌یابد که حتی در ۷۰ نیوتن کمتر از ۳۰ نیوتن است. دلیل این امر، افزایش شدید سختی در سطح فولاد هادفیلد تحت نیروهای بالا است که تغییر مکانیزم سایش خراشان به سایش در اثر خستگی را تسریع می‌کند که پیشتر تشریح شده است.

### ۳-۳- استخراج مدل ریاضی

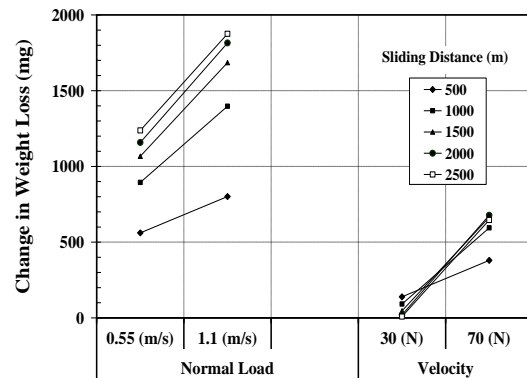
با انجام آنالیز رگرسیون، معادله رگرسیونی میزان کاهش وزن بر حسب مقادیر نیروی عمودی و سرعت خطی برای هر طول مسیر حاصل شده است که در روابط زیر ارائه شده است.

$$W_{L(500m)} = -44 + 8F_N - 75V_L + 11F_N.V_L \quad (3)$$

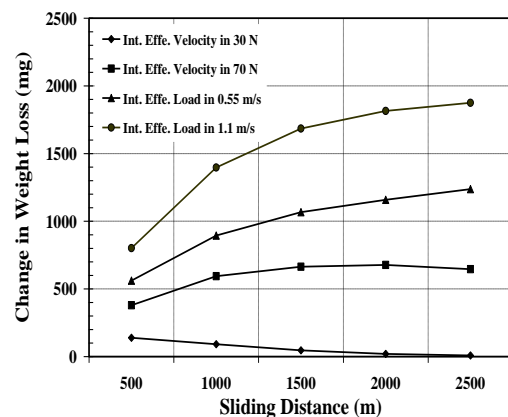
$$W_{L(1000m)} = 189 + 10F_N - 52V_L + 23F_N.V_L \quad (4)$$



شکل ۱۰- رابطه نیروی عمودی و سرعت خطی دیسک با کاهش وزن بر حسب طول مسیر سایش و سطوح تغییرات هر دو عامل



شکل ۱۱- رابطه اثرات متقابل نیروی عمودی و سرعت خطی دیسک با میزان تغییرات کاهش وزن بر حسب طول مسیر سایش و سطح تغییرات یکی از عوامل



شکل ۱۲- رابطه اثرات متقابل نیروی عمودی و سرعت خطی دیسک با میزان تغییرات کاهش وزن بر حسب طول مسیر سایش

خطی دیسک (از ۰/۵۵ به ۱/۱ متر بر ثانیه) تاثیر ثابتی بر میزان سایش در همه طول مسیر سایش دارد. بنابراین می‌توان با اطمینان نتیجه گرفت که در نیروهای کمتر از ۴۰

۳. در مرحله اول، سایش در اثر کندگی (خراشان) و تغییر شکل پلاستیک شدید پیشرفت می‌کند، در حالی با کار سخت شدن سطح، سایش خستگی غالب می‌گردد.
۴. نیروی عمود بر پین نسبت به سرعت خطی سنگ سایشی، تاثیر بیشتری بر میزان کاهش وزن و سایش دارد. در حالی که در مراحل اول سایش، سرعت خطی دیسک نقش مؤثرتری بر مکانیزم سایش دارد.
۵. در آزمون سایش فولادهای هادفیلد، آنچه که باعث اختلاف شدید در میزان کاهش وزن می‌گردد، میزان سایش در مراحل اولیه آزمون است. لذا می‌توان انتظار داشت که عملیات پیش کرنش سبب بهبود مقاومت به سایش گردد.
۶. اثر اصلی سرعت خطی دیسک بر میزان کاهش وزن تابعی از طول مسیر سایش نیست ولی اثر اصلی نیرو با افزایش طول مسیر سایش افزایش می‌یابد.
۷. در نیروهای پایین‌تر از ۴۰ نیوتن روی مقطع با قطر ۱۰ میلیمتر (با فشار عمودی معادل ۰/۵ مگاپاسکال)، تغییرات سرعت تاثیر چندانی بر میزان کاهش وزن ندارد. بنابراین می‌توان سایش تحت تنش پایین را در نیروهای کمتر از ۰/۵ مگاپاسکال بررسی کرد.

### تشکر و قدردانی

از حمایت‌های مالی وزارت صنایع (دبیرخانه طرح تحقیقات اساسی بخش صنعت و معدن) و شرکت‌های ریخته‌گری فولاد طبرستان و ریخته‌گری دقیق‌سازی و از همکاری ارزشمند آقای مهندس محمد یاقوتی‌نیا در ساخت سیستم کنترل کامپیوتری دستگاه سایش صمیمانه تشکر می‌شود.

### مراجع

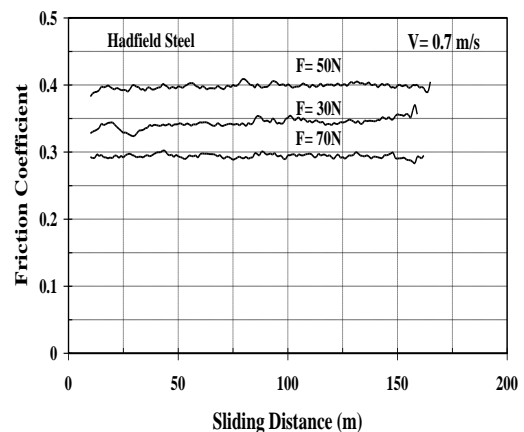
1. ASM Handbook, 10th, Vol. 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, Austenitic Manganese Steels, September (2005).

$$W_{L(1500m)} = 331 + 11F_N - 759V_L + 28F_N \cdot V_L \quad (5)$$

$$W_{L(2000m)} = 409 + 12.5F_N - 860V_L + 30F_N \cdot V_L \quad (6)$$

$$W_{L(2500m)} = 408 + 15F_N - 855V_L + 29F_N \cdot V_L \quad (7)$$

که در آنها  $W_L$  میزان کاهش وزن بر حسب میلی‌گرم در طول مسیر سایش مشخص،  $F_N$  مقدار نیروی عمود بر پین بر حسب نیوتن و  $V_L$  سرعت خطی دیسک بر حسب متر بر ثانیه است. مقایسه ضرایب  $\beta$  نشان می‌دهد که در طول مسیرهای سایش بالای ۱۵۰۰ متر فقط ضریب مربوط به متغیر  $F_N$  با افزایش طول مسیر، افزایش می‌یابد و بقیه ضرایب تقریباً مقدار ثابتی یافته‌اند که نشان‌دهنده نقش مؤثرتر نیرو بر میزان کاهش وزن است.



شکل ۱۳- تغییر ضریب اصطکاک با نیرو در سرعت خطی ۰/۷ m/s

### نتیجه‌گیری

۱. در روش آزمون پین بر سنگ سایشی، میزان کاهش وزن فولادهای هادفیلد در مراحل اولیه زیاد است و به شدت تابعی از میزان سرعت خطی سنگ سایشی و نیروی عمودی است.
۲. پس از گذراندن مراحل اولیه سایش، نرخ سایش به شدت کاهش یافته و به مقدار ثابت و بسیار کم می‌رسد. در این شرایط (سایش پایدار) تغییرات نیروی عمودی و سرعت خطی بر میزان تغییرات نرخ سایش ناچیز می‌گردد.

2. R. W. Smith, A. DeMonte and W. B. F. Mackay, *Development of high-manganese steels for heavy duty cast-to-shape applications*, Journal of Materials Processing Technology, 153–154 (2004) 589–595.
3. Y. N. Dastur and W. C. Leslie, *Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel*, Metallurgical Transaction A, 12 (1981) 749-759.
4. B. K. Zuidema, D. K. Subramanyam and W.C. Leslie, *The effect of aluminum on the work hardening and wear resistance of Hadfield manganese steel*, Metallurgical Transaction A, 18 (1987) 1629-1639.
5. N. Jost and I. Schmidt, *Friction-induced martensitic transformation in austenitic manganese steels*, Wear, 111(4) (1986) 377-389.
6. V. Tsakiris and D.V. Edmonds, *Martensite and deformation twinning in austenitic steels*, Materials Science and Engineering A, 273–275 (1999) 430–436.
7. W. S. Owen and M. Grujicic, *Strain aging of austenitic Hadfield manganese steel*, Acta Mater., 47 (1) (1999) 111-126.
8. L. H. Almeida, I. L. May and P. R. O. Emygdio, *Mechanistic modeling of dynamic strain aging in austenitic stainless steels*, Materials Characterization, 41 (1998) 137–150.
9. B. Hutchinson and N. Ridly, *On dislocation accumulation and work hardening in Hadfield steel*, Scripta Materiala, 55 (2006) 299-302.
10. D. Canadinc, H. Sehitoglu and H. J. Maier, *The role of dense dislocation walls on the deformation response of aluminum alloyed Hadfield steel polycrystals*, Materials Science and Engineering A, 454-455 (25) (2007) 662-666.
11. W. Yan, L. Fang, K. Sun and Y. Xu, *Effect of surface work hardening on wear behavior of Hadfield steel*, Materials Science and Engineering A, 460–461 (2007) 542–549.
۱۲. مجید فریسی و وحید فریسی، تکنولوژی سنگ‌زنی، (۱۳۸۵)، نشر طراح.
13. G. B. Raymond, *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*, 2nd Edition, Marcel Dekker Inc., USA, (2004).
14. ASM Handbook, 10th, Vol. 9, *Metallography and Microstructures, Austenitic Manganese Steel Castings*, (2004).
15. D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, Third Edition, John Wiley & Sons, New York, (2000).
16. S. Bhattacharyya, *A friction and wear study of Hadfield manganese steel*, Wear, 9 (6) (1966) 451-461.
17. G. W. Stachowiak and A. W. Batchelor, *Engineering Tribology*, Chapter 10, Butterworth Heinemann, (2000).
18. D. Canadinc, H. Sehitoglu, H. J. Maier and Y. I. Chumlyakov, *Strain hardening behavior of aluminum alloyed Hadfield steel single crystals*, Acta Materialia, 53 (2005) 1831–1842.
19. A. Y. Mosbah, D. Wexler and A. Calka, *Abrasive wear of WC–FeAl composites*, Wear, 258 (2005) 1337–1341.