

پیش بینی و مقایسه سایش سه فولاد مورد مصرف در ابزار کشاورزی (۲۲۲)

مهدی کسرائی^۱

چکیده

نیاز مکانیکی ماده مورد مصرف در هر ابزار کشاورزی، ترکیب مطلوب ویژگی های سختی و مقاومت به سایش خراشان است. عملیات حرارتی نقش مهمی برای ایجاد این ویژگی ها ایفا می نماید. هدف این پژوهش مقایسه و پیش بینی عملکرد سایشی سه فولاد توصیه شده برای ابزار کشاورزی بوده است. به طور معمول فولاد پر کربن ($C \sim 0/70\%$) که به واسطه کوانچ شدن در روغن یا نفت به سختی حدود 38-45 HRC برسد، مورد استفاده خوبی برای ابزار کشاورزی دارد اما در زمین های خیلی سفت و دارای سنگ و سنگ ریزه به سختی بیشتر حدود 45-52 HRC نیاز است تا ابزار مقاومت به سایش خوبی داشته باشد؛ برای این گونه کاربردها، استفاده از فولاد با کربن متوسط (حدود $C \sim 0/30\%$) با مقادیر کم عناصر کروم یا بور توصیه شده است. در این پژوهش مقاومت سایشی این سه فولاد به دو روش مختلف آزمایش سایش با یکدیگر مقایسه شد. ریز ساختارهای مناسب تعیین گردید و تأثیر سختی سطحی و دیگر ویژگی های مکانیکی آن ها، برای ابزار کشاورزی مثل دیسک ها، چپزل ها و سایر اجزای در گیر با خاک مورد ملاحظه قرار گرفت؛ برای هر فولاد، کاهش جرم در اثر سایش تدریجی پیش بینی و با مقدار حقیقی آن که از طریق آزمایش تعیین شد مقایسه گردید. نتایج نشان داد که ریز ساختار مناسب برای ابزار کشاورزی باید مارتنزیت یا مخلوط مناسبی از مارتنزیت و کاربید باشد تا سختی و مقاومت به سایش لازم را داشته باشند؛ هر دو فولاد بوردار و کروم دار نسبت به فولاد پر کربن در ویژگی های سختی و مقاومت به سایش، عملکرد بهتری داشتند؛ الگوی ریاضی ارائه شده برای تخمین مقاومت سایشی فولادهای مورد آزمایش، توانایی تخمین کاهش جرم را برای هر فاصله خطی خواهد داشت؛ الگوی ارائه شده سایش را مقداری بیش از مقادیر اندازه گیری شده نشان داد ولی چون حالت اطمینان دارتر را پیش بینی نمود استفاده از آن قابل توصیه می باشد.

کلید واژه: سایش خراشان، فولاد پر کربن، فولاد بور دار، فولاد کروم دار، سختی

^۱- استادیار، دانشگاه شیراز، پست الکترونیک: kasraei@shirazu.ac.ir

مقدمه

عمر ابزار کشاورزی اساساً به سایشی که در اثر حرکت ابزار در خاک ایجاد می شود مرتبط می باشد. سایش در اثر کنش متقابل بین خاک و سطح ابزار بوجود می آید، سایش یک ویژگی ذاتی ماده نمی باشد و به عوامل مختلف مانند مقدار کار، سرعت، درجه حرارت، سختی، وجود مواد خارجی و شرایط محیط بستگی دارد [۶]. انتخاب ماده مناسب باید بر اساس سختی نهایی، ریزساختارها، ویژگی های مکانیکی و مقاومت سایشی آن باشد. به طور مثال: دیسک کشاورزی، چنانچه از فولاد با پرکربن ($C \sim 0/70\%$) تهیه و پس از عملیات حرارتی، در روغن یا نفت سریع سرد شود به طوری که سختی HRC 38-45 را داشته باشد برای خاک معمول کشاورزی مناسب می باشد ولی همین فولاد برای استفاده در شرایط محیطی خاک های خیلی سفت و ساینده، که سختی (حدود 52-45 HRC) و مقاومت به سایش بیشتر نیاز است مناسب نمی باشد؛ در این موارد، می توان از فولاد متوسط کربن که به آن عناصر آلیاژی کروم یا بور افزوده شده باشد استفاده کرد و با عملیات حرارتی ویژگی های مطلوب مکانیکی و مقاومت به سایش مناسب را در آن ها ایجاد کرد. ویژگی های مطلوب در فولاد کروم دار یا بوردار برای استفاده در ابزار کشاورزی مانند دیسک، چیزل و سایر اجزای مرتبط با گیاه و خاک در اثر عملیات حرارتی مناسب که از طریق کوانچ کردن در آب به جای روغن یا نفت حاصل می شود ایجاد خواهد شد [۱].

سایشی که خاک در سطح ابزار ایجاد می کند سایش خراشان است [۱۲]. سایش خراشان در اثر حرکت نسبی سطح یا سطوح همراه با ذرات ساینده ایجاد می شود و بر حسب عدم حضور یا حضور ذرات ساینده آزاد در بین سطوح به ترتیب به دو نوع سایش دو جسمی^۱ و سه جسمی^۲ تقسیم شده است. سایش دو جسمی در اثر وجود برآمدگی های سخت بر روی یک یا دو سطح در تماس، ایجاد می گردد و در سایش سه جسمی ذرات سخت ساینده به طور آزاد بین سطوح در تماس، حرکت لغزشی یا دورانی دارند [۵]. وقتی بر روی ابزار خاک ورز خاک رسی مرطوب حرکت می کند سایش دو جسمی و زمانی که خاک شنی حرکت می نماید سایش سه جسمی می باشد؛ در حالت کلی چون حرکت خاک بر روی ابزار خاک ورز هم دو و هم سه جسمی است فولاد های مورد آزمایش در این پژوهش در هر دو نوع سایش خراشان مورد بررسی قرار گرفته اند.

مواد و روش ها

در این پژوهش، سه فولاد که استفاده از آن ها برای ابزار کشاورزی توصیه شده است [۱] انتخاب و ترکیب آن ها با کوانتومتری مشخص شد. این فولادها عبارت بودند از: فولاد با ۰/۷ درصد کربن، فولاد با ۰/۳ درصد کربن و ۰/۰۳ درصد بور و فولاد با ۰/۳ درصد کربن و حدود ۰/۴۰ درصد کروم بودند؛ همچنین به منظور مقایسه اثر وجود عناصر آلیاژی، یک فولاد ساده متوسط (۰/۳ درصد کربن) نیز مورد آزمایش قرار گرفت. فولادهای بور و کروم دار طبق اظهار نظر فروشنده در کوره های القایی آزمایشگاهی تولید شده بودند. ریز آلیاژهای بور و کروم به دیگ های گدازه ای ۲۵ کیلو گرمی اضافه می شود تا شمش تهیه گردد سپس روی شمش ها عملیات نورد گرم^۳ انجام می شود. نمونه های آزمایش از شمش ها تهیه شدند. نمونه ها در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد آستنیت^۴ شدند و برای حذف فشارهای باقی مانده و ایجاد ریز ساختار مارتنزیت باز پخت شده^۵، باز پخت گردیدند. به منظور ایجاد ریز ساختار مناسب در فولاد پر کربن عملیات بازپخت پس از کوانچ در روغن و در دو فولاد بور دار و کروم دار سپس از کوانچ در آب انجام شد [۲]. هدف از عملیات حرارتی ایجاد ریز ساختار مارتنزیت باز پخت شده و رسیدن به سختی سطحی (HRC 45-52) در فولاد کروم دار و فولاد بوردار و در فولاد پر کربن (HRC 38-45) بود. درصد حجمی فازهای حاصل به ترکیب شیمیایی، درجه حرارت ماده سرد کننده و سرعت سرد کردن بستگی دارد [۹]. برای بررسی ریز ساختار هر فولاد، نمونه ها طبق استاندارد ASTM E3-1995 آماده شدند و در محلول نیتال^۶ ۲٪، اچ^۷ شدند. آزمایش های مقاومت به سایش سه جسمی طبق استاندارد ASTM G105-1989 در دستگاه چرخ لاستیکی و خاک مرطوب [۱۰] و آزمایش های مقاومت به سایش دو

¹ Two Body Abrasive Wear

² Three Body Abrasive Wear

³ Hot Roll

⁴ Austenite

⁵ Tempered Martensite

⁶ Nital

⁷ Etch

جسمی طبق استاندارد ASTM G132-1996 در دستگاه میله روی دیسک^۱ [۱۱] انجام شد. برای مقایسه مقاومت سایشی، سایش نسبی که عبارت از نسبت کاهش جرم فولاد های ساده کربنی به کاهش جرم در هر یک از فولاد های مورد آزمایش بود محاسبه شد.

نتایج و بحث

الف: ویژگی های مکانیکی و ریز ساختاری

ویژگی های مکانیکی هر فولاد شامل سختی سطح، مقاومت تسلیم^۲، مقاومت کششی نهایی^۳، درصد کشیدگی^۴ و مقاومت به ضربه^۵ به روش شارپی^۶ تعیین در جدول ۱ نشان داده شده است؛ همچنین در این جدول مقادیر مطلوب هر ویژگی برای ابزار کشاورزی آورده شده است [۱۲].

جدول ۱: ویژگی های مکانیکی مطلوب برای ابزار خاک ورزی و فولاد های مورد آزمایش

ویژگی مکانیکی	مقادیر مطلوب	فولاد متوسط کربن	فولاد پر کربن	فولاد بور دار	فولاد کروم دار
سختی نهایی (HRC)	۴۵-۵۲	۴۱/۰	۴۴/۸	۴۷/۶	۴۹/۰
مقاومت کششی نهایی (Mpa)	۱۳۷۰-۱۵۷۰	۱۳۵۵	۱۵۳۷	۱۴۹۰	۱۵۴۳
مقاومت تسلیم (Mpa)	۱۱۷۰-۱۳۷۰	۱۱۷۲	۱۳۹۷	۱۲۹۲	۱۲۴۹
درصد ازدیاد طول (50mmGL)	۳-۷	۶/۰۸	۳/۷۰	۵/۱۰	۳/۹۱
مقاومت به ضربه (در دمای اتاق) (Nm)	۹/۸۱	۱۹/۴۲	۵/۲۰	۳۴/۸۱	۱۱/۲۸

با مقایسه مقادیر اندازه گیری شده با مقادیر مطلوب می توان نتیجه گرفت که: فولاد متوسط کربن به دلیل سختی و مقاومت کششی کم برای استفاده ابزار خاک ورز مناسب نیست؛ فولاد پر کربن، سختی سطح، بیشینه مقاومت کششی، مقاومت تسلیم در صد کشیدگی، در حد مورد نیاز دارد ولی مقاومت به ضربه این فولاد کم است و فولادهای بوردار و کروم دار ویژگی های لازم را دارا می باشند.

بیشتر بودن سختی فولادهای بوردار و کروم دار، به دلیل افزایش سختی پذیری این فولاد ها بر اثر وجود عناصر آلیاژی بور و کروم [۲] و آهنگ سرد شدن سریع تر بر اثر کوانچ در آب بود. سختی حاصل در اثر سرد کردن سریع در آب برای فولاد متوسط کربن، فولاد پر کربن، فولاد بور دار و فولاد کروم دار به ترتیب HRC ۴۵/۳، ۴۸/۴، ۵۰/۲ و ۵۱/۰ بود. ریز ساختار فولاد که معمولاً در شرایط کوانچ در آب حاصل می شود مارتنزیت می باشد؛ اغلب ویژگی های مارتنزیت به مقدار کربن فولاد بستگی دارد و خصوصیات نهایی مارتنزیت را می توان از طریق ترکیب بهینه چرخه عملیات حرارتی و ترکیب شیمیایی فولاد،

¹ Pin on Disc Machine

² Yield Strength

³ Ultimate Tensile Strength

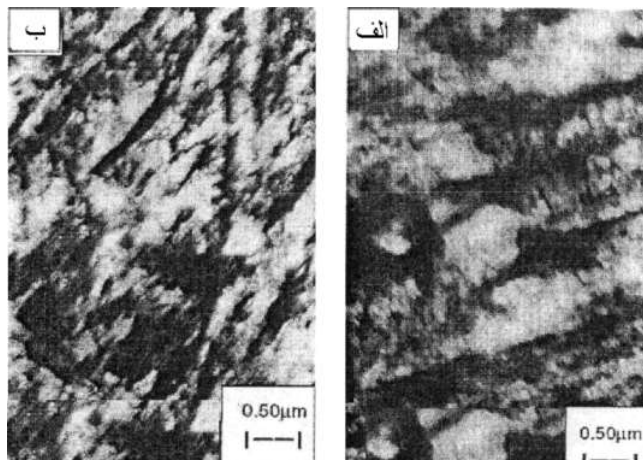
⁴ Elongation

⁵ Impact Strength

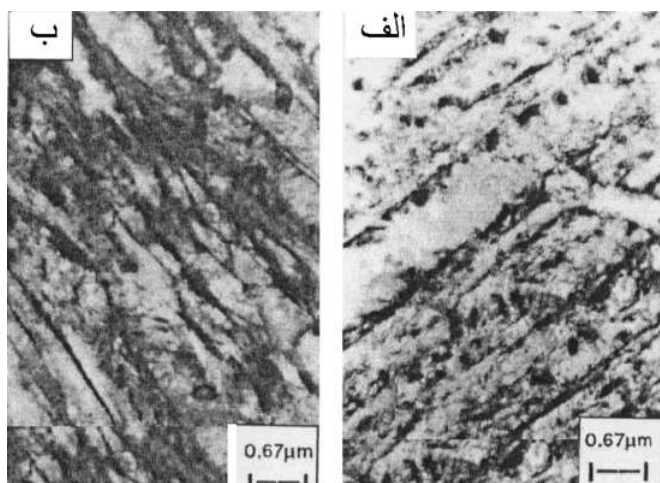
⁶ Charpy

تعیین نمود^[۲]. به منظور از بین بردن و یا کاهش تنش های باقی مانده^۱ و افزایش چقرمگی نیاز به عملیات بازپخت^۲ در فولاد مارتنزیت شده است^[۵]. در اثر عملیات بازپخت: سختی، استحکام و مقاومت به سایش کاهش می یابد ولی انجام آن ضروری است. سختی که پس از عملیات بازپخت در فولاد حاصل می شود، تنها روش عملیات حرارتی است که برای بهبود محدوده الاستیکی فولاد و به منظور دستیابی به سختی مطلق تا حداقل عمق مطلوب، مناسب می اشد^[۹]. در شکل ۱ ریز ساختار فولاد پر کربن و متوسط کربن با بزرگ نمایی ۲۰ هزار نشان داده شده است. شکل ۱ الف نشان می دهد که تجزیه کامل مارتنزیت انجام نشده و در شکل، فریت تجمعی به صورت فاز سفید رنگ ملاحظه می شود و در شکل ۱ ب فازهای مارتنزیت بازپخت شده مشخص می باشد. فولاد متوسط کربن بعد از کوانچ در آب، ریز ساختار فریت و مارتنزیت داشت. اضافه کردن ریز آلیاژهای بور و کروم، ریز ساختارها را به کاربید و مارتنزیت، تغییر داده بودند. اضافه کردن بور به مقدار کم به فولاد، سبب شده بود که بعد از عملیات کوانچ، ریز ساختار مارتنزیتی به عنوان ریز ساختار غالب پیدا کند و در عملیات بازپخت مقداری از مارتنزیت به فریت و کاربید تبدیل گردد(شکل ۲ الف). در فولاد کروم دار، وجود صفحات نازکی از کاربید آهن در میان فاز مارتنزیت مشاهده شد(شکل ۲ ب). نواحی تیره نشان دهنده نابجایی با چگالی زیاد می باشد که وجود آن ها در نمونه های کوانچ و بازپخت شده انتظار می رود.

¹ Residual Stress
² Tempering



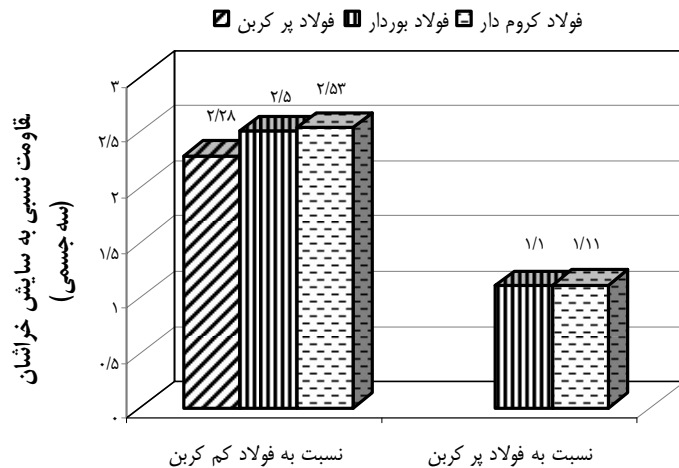
شکل ۱: ریز ساختار فولاد کوانچ و بازپخت شده با بزرگمایی ۲۰ هزار. الف: فولاد ۰/۳ در صد کربن؛ ریز ساختار مارتنزیت بازپخت شده و فریت. ب: فولاد ۰/۷ در صد کربن؛ ریز ساختار مارتنزیت بازپخت شده.



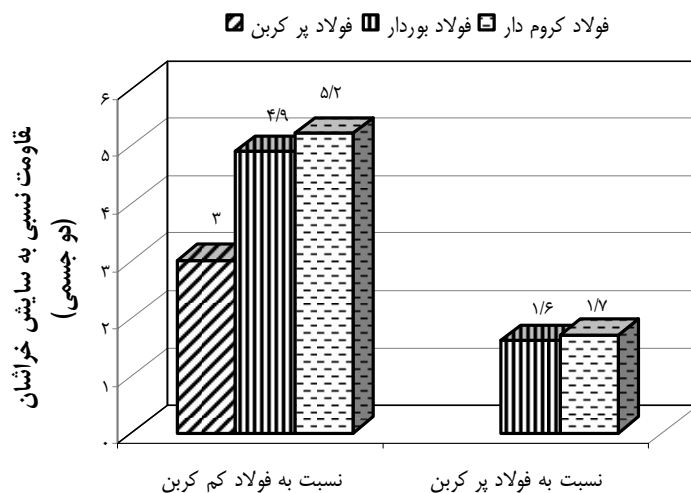
شکل ۲: ریز ساختار فولاد کوانچ و بازپخت شده با بزرگمایی ۱۵ هزار. الف: فولاد بور دار؛ ریز ساختار مارتنزیت بازپخت شده و کاربید ریز (حلقوی). ب: فولاد کروم دار؛ ریز ساختار سمانتیت نازک صفحه ای و مارتنزیت بازپخت شده.

ب: ویژگی های مقاومت به سایش و پیش بینی آن

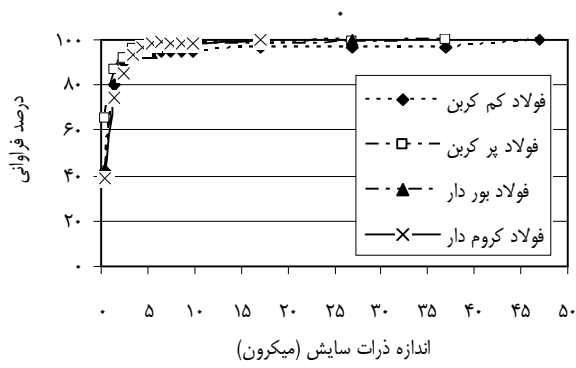
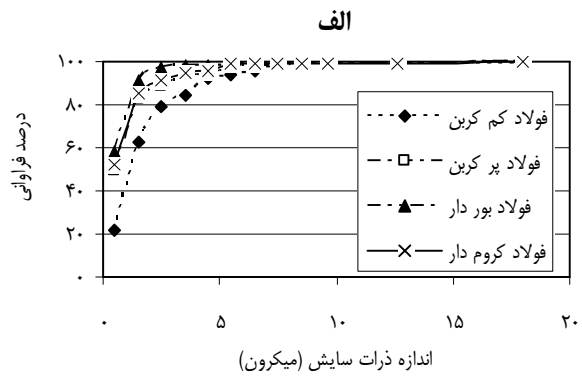
بررسی های مقایسه ای آشکار نمود که هم فولاد بو دار و هم فولاد کروم دار ویژگی مقاومت به سایش بهتری نسبت به فولادهای ساده کربنی نشان می دهند. در آزمایش سایش خراشان سه جسمی (استاندارد ASTM-G105) مقاومت به سایش برای فولاد بوردار و کروم دار نسبت به فولاد متوسط کربن به ترتیب ۲/۵ و ۲/۵۳ برابر و نسبت به فولاد پر کربن به ترتیب ۱/۱۰ و ۱/۱۱ ابر بود (شکل ۳). همچنین مقاومت به سایش فولاد پر کربن، ۲/۲۸ برابر بیشتر از فولاد متوسط کربن بود.



شکل ۳: مقایسه مقاومت به سایش خراشان سه جسمی فولاد های مورد آزمایش نسبت به فولاد کم کربن و پر کربن. در آزمایش سایش خراشان دو جسمی (استاندارد ASTM-G99) نیز به طور مشخص مقاومت به سایش برای فولاد بوردار و کروم دار نسبت به فولاد پر کربن و متوسط کربن بیشتر بود. در شکل ۴ مقاومت به سایش نسبی فولادها نشان داده شده است. در این آزمایش مقاومت به سایش فولاد بوردار و کروم دار نسبت به فولاد متوسط کربن به ترتیب $4/9$ و $5/2$ بر و نسبت به فولاد با کربن زیاد به ترتیب $1/6$ و $1/7$ برابر و مقاومت به سایش فولاد پر کربن، ۳ برابر بیشتر از فولاد متوسط کربن بود.



شکل ۴: مقایسه مقاومت به سایش خراشان دو جسمی فولاد های مورد آزمایش نسبت به فولاد کم کربن و پر کربن. در آزمایش سایش دو جسمی که امکان جمع آوری ذرات ساییده شده بود؛ در فواصل خطی مختلف، ذرات ساییده شده ۱۰ و از نظر اندازه مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۵ توزیع اندازه ذرات ساییده شده هر چهار فولاد بر حسب در صد فراوانی آن ها در دو فاصله خطی متفاوت ملاحظه می شود. چنانچه در شکل ۵ الف نشان داده شده است در فاصله خطی $1/25$ km بیشترین قطر ذرات سایشی برای هر چهار نمونه فولاد مورد آزمایش 2000 m بود؛ ولی در فاصله خطی 5 km بیشترین قطر ذرات سایشی برای فولاد کروم دار 20 m، بور دار 30 m، فولاد پر کربن 40 m و فولاد متوسط کربن 50 m بود (شکل ۵ ب).



شکل ۵: درصد فراوانی اندازه ذرات ساییده شده در فولادهای مورد آزمایش. الف: در فاصله خطی ۱/۲۵km. ب: در فاصله خطی ۰.۵km.

در جدول ۲ سختی اندازه گیری شده سطح ساییده شده در فواصل ۱/۲۵، ۲/۵، ۳/۷۵ و ۵ برای هر چهار فولاد مورد آزمایش گزارش شده است.

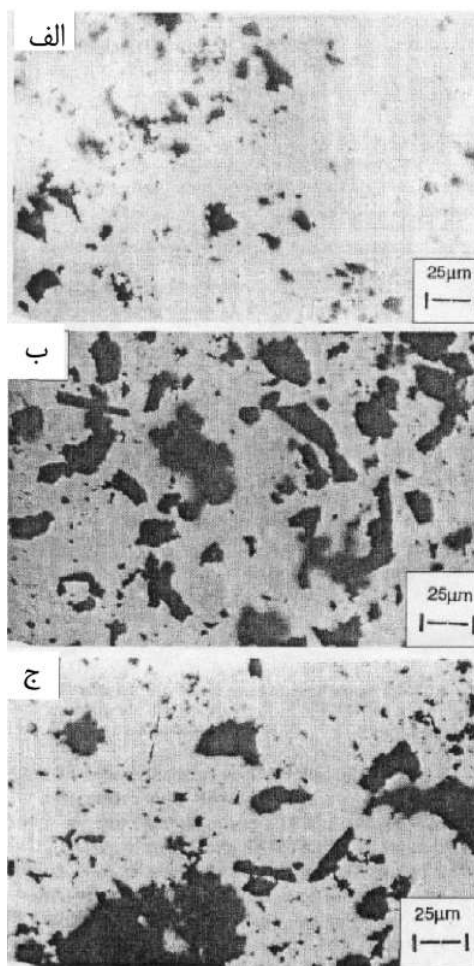
جدول ۲: سختی سطح فولادهای مورد آزمایش در طول آزمایش در چهار مسافت خطی متفاوت

سختی (HRC)				مسافت طی شده (km)
فولاد کروم دار	فولاد بور دار	فولاد پر کربن	فولاد متوسط کربن	
۴۷/۶۷	۴۶/۹۷	۴۲/۷۵	۳۹/۳۹	۱/۲۵
۵۱/۶۹	۴۸/۹۵	۴۵/۸۱	۴۱/۹۸	۲/۵۰
۵۴/۶۷	۵۲/۸۱	۴۸/۰۳	۴۳/۰۲	۳/۷۵
۵۳/۹۶	۵۲/۱۰	۴۴/۹۸	۳۸/۹۸	۵/۰۰

با توجه به جدول ملاحظه می شود که در هر چهار فولاد ابتدا سختی افزایش و سپس کاهش یافته است. دلیل افزایش اولیه سختی، به دلیل تأثیر کار سختی^۱ می باشد [۸] که در اثر برخورد مداوم فولاد مورد آزمایش با مواد سخت تر، حاصل می گردد. دلیل کاهش سختی پس از افزایش اولیه می تواند تشکیل ذرات بزرگتر در فاصله خطی جابجا شده بیشتر که سبب کاهش انرژی لایه ای می شود باشد. این موضوع نشان می دهد که تا یک فاصله خطی معین ابتدا سایش کم اتفاق افتاده است و در فولاد های کروم دار و بوردار ذرات سایش یافته شامل ذرات کوچک اکسیده شده تا اندازه $10 \mu\text{m}$ می باشد و در فاصله خطی 5 km این ذرات سایشی شامل ذرات بزرگ فلزی در محدوده اندازه $10 \mu\text{m}$ تا $30 \mu\text{m}$ با ذرات اکسید شده می باشد. کاهش متوالی در مقدار سختی، ممکن است در اثر شکسته شدن لایه های نازک اکسید شده که در مراحل اولیه و در مرحله تشکیل ذرات فلزی بزرگ که سبب سایش شدید می گردند باشد [۸].

در شکل ۶ تصویر اندازه ذرات فولاد متوسط کربن به ترتیب در فاصله خطی $1/25 \text{ km}$ ، $2/5$ و 5 نشان داده شده است. در شکل ۶ الف ذرات سایشی کوچک تر و به شکل تقریباً گرد و یا کشیده هستند که ذرات اکسیدی (که در لایه سطحی فلز وجود دارد) می باشند؛ در شکل ۶ ب ذرات سایشی کوچک، ذرات اکسید و ذرات بزرگ تر ذرات فلزی می باشند؛ در شکل ۶ ج ذرات سایشی حالت تجمعی دارند و فقط ذرات فلز می باشند.

¹ Work Hardening



شکل ۶: اندازه ذرات سایشی فولاد متوسط کربن در فواصل خطی مختلف الف: در فاصله ۱/۲۵ کیلومتر. ب: در فاصله ۲/۵ کیلومتر. ج: در فاصله ۵ کیلومتر.

بر اساس فرمول تجربی که مورد تأیید محققین مختلف مانند زوم گاهر^۱ بوده است [۱۳] بین سختی سطح و مسافت طی شده در آزمایش سایش خراشان دو جسمی روابط ریاضی زیر تعیین شد. رابطه تجربی به قرار زیر است:

$$Q = \frac{KWdS}{H} \quad (۱)$$

در رابطه فوق: Q بر حسب گرم، جرم کاهش یافته در اثر سایش، W بر حسب نیوتن، مقدار وزن وارد شده بر روی نمونه مورد آزمایش، d بر حسب میلی متر، قطر، S بر حسب کیلومتر، فاصله خطی طی شده، H سختی بر حسب ویکرز^۲ و K ضریب ثابت است که در بیشتر موارد مقدار آن کم تر از ۰/۸ می اشد [۸]. مقدار K در این پژوهش برابر $2/33 \times 10^{-3}$ محاسبه شد. مقدار سختی سطح ساییده شده (H) پس از طی مسافت مشخص (S) از روابط زیر تخمین زده شد.

$$H = -0/12S^4 + 0/9417S^3 - 2/295S^2 + 4/4433S + 37/43$$

الف: فولاد پر کربن

^۱Zumgahr
^۲Vickers

$$H = 0/001S^4 - 0/345S^3 + 0/19896S^2 + 1/7228S + 39/274$$

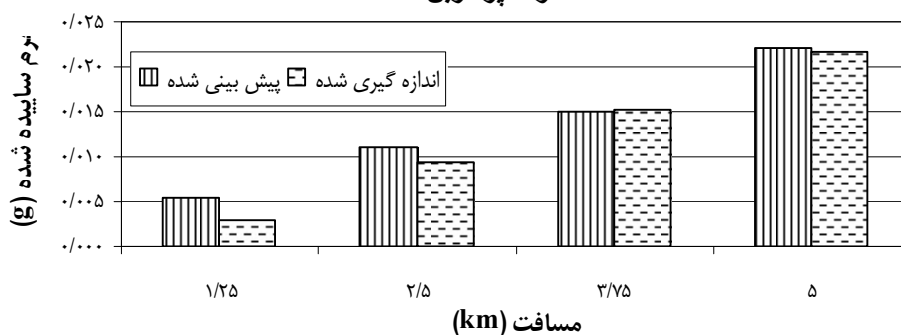
ب: فولاد بور دار

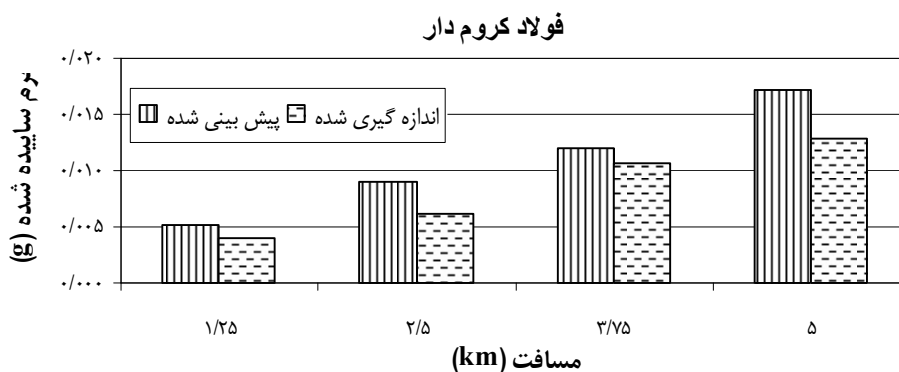
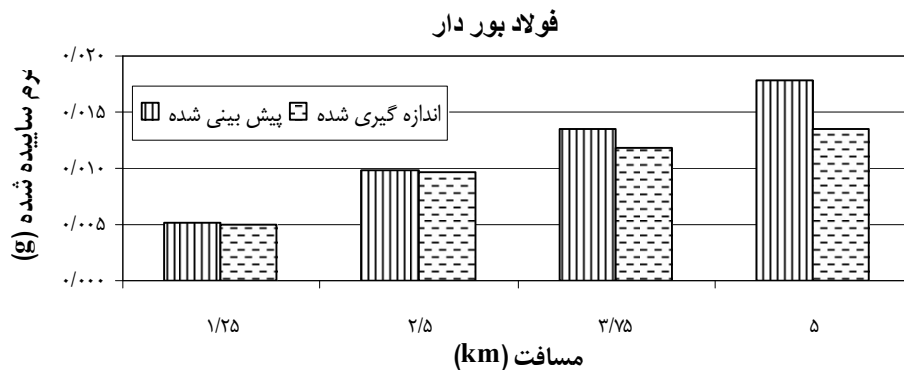
$$H = 0/0065S^4 - 0/1749S^3 + 1/3788S^2 - 1/7376S + 42/733$$

ج: فولاد کروم دار

در شکل ۷ مقادیر تخمینی توسط روابط فوق با مقادیری که به طور مستقیم با دستگاه آزمایش سختی اندازه گیری شد مقایسه گردیده است. برای فولاد متوسط کربن پیش‌بینی مقدار سایش بر اساس فرمول فوق به دلیل سایش زیاد اولیه، ممکن شد. اختلاف بین کاهش جرمی پیش‌بینی شده با نتایج تجربی برای فاصله خطی ۵ تا ۲/۵ کیلومتر در شکل ۷ نشان داده شده است؛ این اختلاف برای فولاد پر کربن ۱ تا ۱۳ درصد، برای فولاد بوردار ۲۸-۱/۵ درصد و برای فولاد کروم دار ۴۰-۱۰ درصد بود. فرمول های تخمینی در فولاد پر کربن و فولاد بور دار نسبت به فولاد کروم دار با مقادیر اندازه گیری شده اختلاف کمتری داشتند. فولاد بور دار برای فاصله خطی بیش از ۳/۷۵ کیلومتر ۱/۵ تا ۸/۶ درصد و فولاد کروم دار در این فاصله خطی ۱۰ تا ۴۰ درصد با مقادیر اندازه گیری شده اختلاف نشان داشتند. این اختلاف به دلیل سختی بیشتری است که در فولاد کروم دار در مقایسه با فولاد بوردار در هر فاصله خطی مشاهده شد. همچنین ملاحظه شد که در فاصله خطی ۵ کیلومتر، تفاوت بین کاهش جرمی اندازه گیری شده و پیش‌بینی شده در فولاد بوردار و فولاد کروم دار به ترتیب ۲۴-۲۸ و ۲۷-۲۵ درصد بود. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش برای کاربرد ابزار کشاورزی، هر سه فولاد پر کربن، بور دار و کروم دار مناسب می باشند. برای خاک های معمول کشاورزی، فولاد ۰/۷ درصد کربن، به دلیل نداشتن عناصر آلیاژی و فراوانی در بازار مناسب تر است ولی برای شرایط سایشی که در خاک سفت و سنگی وجود دارد استفاده از فولاد های متوسط کربن کروم دار و یا بوردار، پیشنهاد می شود.

فولاد پر کربن





شکل ۷: مقایسه نتایج تجربی با مقادیر تخمینی از روابط ریاضی در فولادهای پر کربن، بور دار و کروم دار.

نتایج و پیشنهادات:

۱. ریز ساختارهای ترجیحی فولاد پر کربن، فولاد بوردار و فولاد کروم دار بعد از کوانچ کردن و باز پخت باید مارتنزیت یا ترکیبی مناسبی از مارتنزیت و کاربید باشد تا سختی مناسب را برای ابزار کشاورزی داشته باشند.
۲. اضافه نمودن کروم یا بور به فولاد متوسط کربن ($0/30C$) موجب افزایش سخت پذیری فولاد می گردد. سختی اضافی به دلیل امکان کوانچ کردن این فولادها در آب سرد می باشد.
۳. فولاد پر کربن به دلیل داشتن کربن زیاد اگر در آب کوانچ شود سریع ترک خواهد خورد بنابر این باید آن را در روغن کوانچ نمود؛ کوانچ در روغن نسبت به کوانچ در آب هزینه بیشتری خواهد داشت و برای محیط زیست مضراتی خواهد داشت.
۴. مقاومت به سایش به طور نسبی تعیین شد به طوری که مقاومت نسبی فولاد کروم دار، بوردار، پرکربن و ساده متوسط کربن در سایش دو جسمی به ترتیب $5/2$ ، $4/9$ ، $3/0$ و 1 و در سایش سه جسمی به ترتیب $2/53$ ، $2/50$ ، $2/28$ و 1 بود. لذا نتیجه گرفته شد که فولاد کروم دار و بوردار ویژگی های بهتری هم در سایش دو جسمی و هم در سایش سه جسمی دارند به همین دلیل می توان استفاده از آن ها را برای کار در شرایط خاک های سخت تر توصیه نمود.
۵. بر اساس نتایج تجربی، در فولادهای مورد آزمایش، برای تخمین مقاومت سایشی بر مبنای کاهش حجم، یک الگوی ریاضی ارائه شد. این الگو توانایی تخمین کاهش حجم را برای هر فاصله خطی خواهد داشت. اگر چه مقایسه نتایج تجربی



با مقادیر تخمینی نشان داد که مقادیر تخمینی تا حدودی سایش بیشتری را پیش بینی می نمایند ولی به دلیل آن که مقادیر کم تر از مقادیر اندازه گیری شده نمی باشند می توان از این روابط با اطمینان برای تخمین مقدار سایش استفاده نمود. ع از فولادهای کروم دار و بورداری که در این پژوهش مورد آزمایش قرار گرفتند می توان در کاربردهای مشابه نظیر بیل مکانیکی، تیغه ها، اسکنرها، دستگاه های برش و دیگر ابزارهای در گیر با یاه و خاک که نیاز به مقاومت سایشی زیاد دارند استفاده کرد.

منابع:

۱. Bhushan, B. and Gupta, B. K. 1991. Handbook of tribology, pp:3.1-3.25. New York: McGraw-Hill, U.S.A.
۲. Brooks, C.R. 1996. Principles of the heat treatment of plain carbon and low alloy steels. ASM International, Materials Park, OH, 127-204.
۳. Davis, J. R. 2001. Surface engineering for corrosion and wear resistance. 2nd ed. Ohio: ASM International, U.S.A.
۴. Ebrahimi, Z. and Krauss, G. 1984. Mechanisms of tempered martensite embrittlement in medium carbon steels. Acta Metall. 32(10): 1767-1777.
۵. Hutchings, I. M. 1992. Tribology: Friction and wear of engineering materials, 1st edn. London: Edward Arnold, U.K.
۶. Kato, K. 1992. Micro-mechanisms of Wear. Wear 153: 227-295.
۷. Rabinowicz, E. 1995. Friction and wear of materials, 2nd edn. John Wiley and Sons, U.S.A.
۸. Rigney, D. A. and Glueser, W. A. 1978. Source book on wear control technology. Vols. 120-125. ASM International, Materials Park, OH, 147-169.
۹. Speich, G. R. and Leslie, W. C. 1972. Tempering of steel, Metall. Trans. 3: 1043-1054.
۱۰. Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests, G105-89, Annual book of ASTM standards, 2002, Philadelphia, Vol 3.02. pp. 443-451. U.S.A.
۱۱. Standard Test Method for Pin Abrasion Testing, G132-96, Annual book of ASTM standards. 2002, Philadelphia, Vol 3.02. pp. 550-557. U.S.A.
۱۲. Swanson, P. A. 1993. Comparison of laboratory abrasion tests and field tests of materials used in tillage equipment. In: Tribology: Wear test selection for design and application, ASTM, 1199edn. Ruff, I., and Bayer, R. G. pp. 80-98. U.S.A
۱۳. Zumgahr, K. H. 1998. Wear by hard particles, Tribology International. 31: 587-596.