

ارزیابی خواص سختی و سایشی تیغه‌های آسیاب غلات

حسن غفوری ورزنه^{۱*} و سید علی خدارحمی^۲

چکیده

دستگاه آسیاب یکی از تجهیزات است که در فراوری محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آسیاب‌های ضربه‌ای یا چکشی به دلیل سادگی و سهولت کار برای خردکردن دانه غلات، خردکردن غذای طیور و ادویه‌جات کاربرد دارند. در این آسیاب‌ها، عمل خردکردن توسط ضرباتی که از طریق تیغه‌ها به دانه‌ها وارد می‌گردد صورت می‌پذیرد. حرکت تیغه در دانه غلات پس از مدت زمان نسبتاً کوتاهی منجر به سایش و فرسودگی لبه ضربه زننده تیغه می‌شود. دفعات تعویض و جایگزین نمودن تیغه‌ها، مستلزم صرف هزینه و زماناست که به کاهش کارایی دستگاه و افزایش هزینه تمام شده محصول می‌انجامد. لذا در این تحقیق، بررسی خواص مکانیکی فولادها با آلیاژهای مختلف به عنوان جایگزین مناسب برای تیغه‌های آسیاب چکشی موجود مدنظر است. برای این منظور اثر جنس تیغه در چهار سطح و اثر عملیات حرارتی در دو دوره متفاوت برای هر فولاد، بر روی شاخص‌های سختی و مقاومت به سایش، بصورت آزمون آزمایشگاهی و آزمون عملی بررسی گردید. عملیات سختی سنجی با استفاده از دستگاه آزمون سختی و آزمون سایش به روش پین به روی دیسک در آزمایشگاه متالوگرافی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی انجام شد. آزمون عملی تیغه‌ها با نصب تیغه‌ها بر روی روتور دستگاه آسیاب و اندازه‌گیری مقدار سایش آنها بر حسب تلفات جرم پس از آسیاب نمودن مقدار ۱۸۰۰ تن غله انجام شد. نتایج نشان داد که فولاد DIN X 210Cr12 با نام تجاری SPK پس از انجام دوره عملیات حرارتی کونچ در روغن، دارای سختی بیشتر و مقاومت سایشی بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها بود. بررسی شکل ظاهری تیغه‌ها در آزمون عملی نشان داد که تیغه فولادی DIN X 210Cr12 با دوره عملیات حرارتی مختلف دارای کمترین فرسایش در لبه ضربه زننده تیغه می‌باشند و به عنوان جایگزین مناسب برای تیغه‌های فعلی توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آسیاب، تیغه، فولاد، عملیات حرارتی، غلات.

ارجاع: غفوری ورزنه ح. و خدارحمی س.ع. ۱۴۰۰. ارزیابی خواص سختی و سایشی تیغه‌های آسیاب غلات. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۱۹: ۶۷-۷۴.

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲- مربی گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

* نویسنده مسئول: hasangh28@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵

مقدمه

در بخش کشاورزی و صنایع غذایی، آسیاب‌های چکشی برای خرد کردن و فراوری غلات و محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱).



شکل ۱- نمای داخلی آسیاب چکشی

بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی تیغه‌های آسیاب چکشی مرسوم در بازار ایران نشان داد که وجود بعضی محدودیت‌ها در تهیه تیغه‌های آسیاب چکشی از خارج کشور، باعث شده است تا سازندگان ماشین‌های کشاورزی از یک نوع تیغه مرسوم به جای نمونه اصلی استفاده کنند. بازدیدهای میدانی از صنایع فراوری محصولات کشاورزی نشان داد که تیغه‌های مرسوم در یک دوره یک ماهه، دچار سایش و فرسودگی می‌گردد و نیاز به تعویض دارند (شکل ۲).



شکل ۲- تیغه‌های مرسوم آسیاب چکشی پس از استفاده در یک دوره یک ماهه

لذا بررسی خواص سختی و سایشی تیغه‌های آسیاب چکشی مرسوم در بازار ایران و گزینه‌های جایگزین مناسب برای بهینه‌سازی تیغه‌ها و به حداقل رساندن هزینه‌های اجرایی ضروری به نظر می‌رسد که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود.

سایش یکی از مخرب‌ترین پدیده‌ها در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی، حمل و نقل، کشاورزی و غیره است

(Neale and Gee 2000). در این آسیاب‌های چکشی، سایش در اثر کنش متقابل بین دانه و لبه ضربه زننده تیغه بوجود می‌آید و به عوامل مختلف، مانند مقدار کار، سرعت، درجه حرارت، سختی، وجود مواد خارجی و شرایط محیط بستگی دارد (Dabbour *et al.*, 2015). آسیاب‌های ضربه‌ای باید ویژگی مقاومت به سایش داشته باشد و در برابر ضربه نیز مقاومت کند و هرچه ماده تحت سایش سخت‌تر باشد مقدار سایش آن کمتر خواهد بود (Rabinowicz, 1995). مواد با سختی بالا و مقاومت سایشی زیاد، چقرمگی کمی دارند (Chandler, 1998). از خواص اولیه تیغه‌ها، مقاومت سایشی بالا است. جنس تیغه‌های به کار رفته در آسیاب‌های ضربه‌ای غلات از فولاد است و عمر آنها اساساً به سایشی که در اثر حرکت تیغه در دانه غلات ایجاد می‌شود مرتبط است و سایش تیغه‌ها روی کیفیت نهایی آسیاب کردن تأثیر مستقیم دارد (Ismail *et al.*, 2017). فولادهای کم‌آلیاژ با قیمت مناسب و امکان تهیه آسان برای برخی مصارف سایشی انتخاب می‌شود و تا درجه حرارت ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس مورد استفاده قرار می‌گیرند. با انتخاب فولاد آلیاژی و انجام عملیات حرارتی مناسب می‌توان سختی و مقاومت سایشی مدنظر را به دست آورد (Yancey *et al.*, 2013). انتخاب فولاد مناسب باید بر اساس سختی نهایی، ریزساختارها، ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت سایشی آن باشد. روش‌های مختلفی برای سخت کردن وجود دارد که شامل کربوره کردن، نیتتریده کردن، سخت کردن سطحی، سخت کردن حجمی و سخت کردن القایی است که بر اساس خواص مورد انتظار از فولاد نهایی انتخاب می‌شود.

مشخصات مقاومت به سایش تیغه برش دستگاه چمن‌زن از جنس فولاد AISI 1090 با کربن بالا تحت عملیات حرارتی متفاوت، نشان داد که این فولاد قابلیت سخت‌کاری مناسب را دارد (Lau *et al.*, 1999).

پوشش‌دهی سطحی برای سخت کردن تیغه‌های برش ماشین‌های برداشت علوفه و محصولات زراعی مورد بررسی نشان داد که این فرایند، انعطاف‌پذیری فولاد را جهت افزایش سختی در کاربردهای مختلف افزایش می‌دهد (Enculescu & Paraschiv, 2010).

بررسی دوام فولاد کربنی با استفاده از جریان الکتریکی با فرکانس بالا برای دو ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس نشان داد که سخت شدن حدود یک میلی‌متر از

جدول ۱- خواص سایشی و سختی تیغه مرسوم		
خواص سختی (راکول C)	سایش پین روی دیسک (میلی‌گرم بر ۱۰۰۰ متر)	مقادیر
۴۹-۴۷	۶۲-۵۹	

جدول ۲- درصد عناصر مختلف فولادهای آلیاژی				
عناصر	نوع فولاد آلیاژی در استاندارد DIN			
	CK45 (تیمار شاهد)	16 MnCr5	42 CrMo4	X 210Cr12
C	۰/۴۲-۰/۵۰	۰/۱۴-۰/۱۹	۰/۳۸-۰/۴۵	۱/۹۰-۲/۲۰
Si	۰/۴۰	≤۰/۴۰	≤۰/۴۰	۰/۱۰-۰/۴۰
Mn	۰/۵۰-۰/۸۰	۱/۰۰-۱/۳۰	۰/۶۰-۰/۹۰	۰/۱۵-۰/۴۵
P	۰/۰۳۵	≤۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	≤۰/۰۳۰
S	۰/۰۳۰	≤۰/۰۳۵	۰/۰۳۰	≤۰/۰۳۰
Cr	-	۰/۸۰-۱/۱۰	۰/۹۰-۱/۲۰	۱۱/۰۰-۲/۰۰
MO	-	-	۰/۱۵-۰/۳۰	-



شکل ۳- طرح تیغه‌های تهیه شده در این پژوهش

با توجه به اینکه عناصر تشکیل دهنده هر یک از فولادهای انتخابی متفاوت است، دامنه درجه حرارت مناسب و زمان لازم برای رسیدن به فاز آستنیت و سپس کوئینچ و تمپر شدن نیز متفاوت است. به همین دلیل دوره‌های عملیات حرارتی مورد نیاز برای دستیابی به سختی مورد نظر در هر فولاد با کد مشخص، توسط شرکت سازنده پیشنهاد می‌گردد که در این تحقیق نیز از دوره‌های حرارتی پیشنهادی استفاده شد.

دوره‌های عملیات حرارتی برای فولاد DIN X 210Cr12، سخت کاری حجمی با دو نرخ متفاوت سرد کردن (شکل ۴)، برای فولاد DIN 42 CrMo4، سخت کاری حجمی و سخت کاری سطحی به روش القایی (شکل ۵)، برای فولاد DIN 16 MnCr5، سخت کاری سطحی به دو روش کربن‌دهی جامد و مایع (شکل ۶) و برای فولاد DIN CK45، که جنس تیمار شاهد نیز از این نوع فولاد است، یک دوره عملیات حرارتی بهینه نسبت به تیمار شاهد انتخاب شد (شکل ۷).

سطح نمونه‌ها تا حد زیادی قدرت خستگی و دوام نمونه‌ها را افزایش می‌دهد (Ciuplys & Kvedaras, 2010). تأثیر سخت شدن القایی بر روی فولادهای فورج شده با کربن بالا (۰/۷۳ درصد کربن)، نشان داد که مقدار سختی سطح نسبت به روش‌های مشابه، بیشتر بوده و ضمن ایجاد ساختار نیمه مارتنزیتی^۱، عمر خستگی فولاد را بهبود بخشیده است. همچنین با کاهش سختی سطحی و افزایش عمق نفوذ سختی، میزان آستنیت^۲ باقیمانده کاهش و عمر خستگی افزایش یافته است (Danda, 2011).

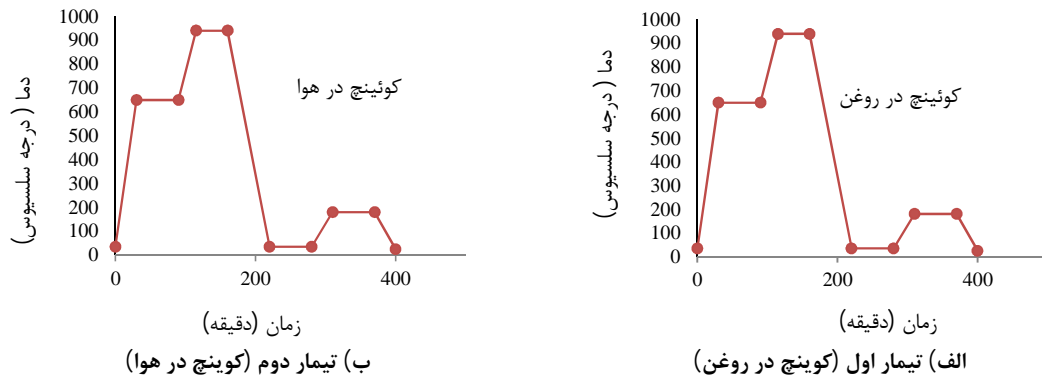
بررسی منابع نشان داد که فولادهای آلیاژی با کربن بالا، به دلیل قابلیت سخت کاری و افزایش مقاومت سایشی، گزینه مناسبی برای تیغه‌های ضربه‌زننده و تیغه‌های برشی ادوات و ماشین‌های کشاورزی است، همچنین میزان سختی و مقاومت به سایش فولادهای آلیاژی، تحت تأثیر دوره‌دوره عملیات حرارتی و روش سخت کاری است. لذا در این تحقیق، چندین فولاد آلیاژی موجود در بازار کشور به عنوان جایگزین انتخاب و عملیات سخت کاری بر اساس دوره حرارتی توصیه شده توسط شرکت‌های سازنده انجام شد.

مواد و روش‌ها

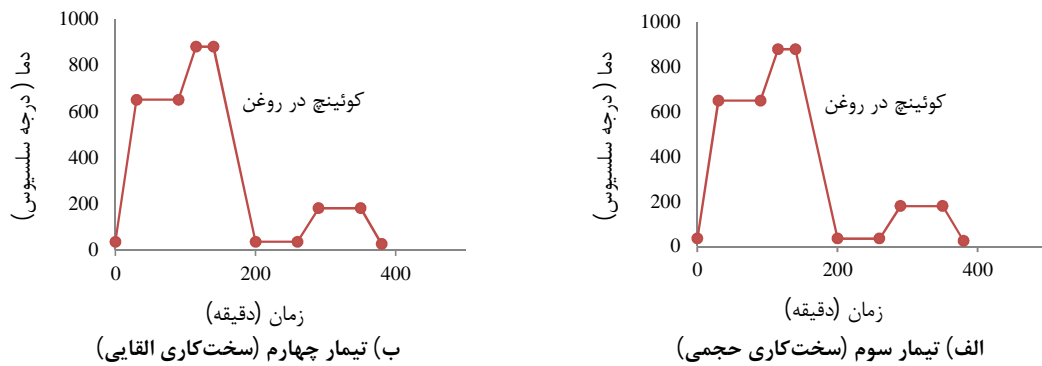
در ابتدای پژوهش ترکیب شیمیایی و خواص سایشی فولاد مرسوم در آزمایشگاه متالوگرافی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۱ و ۲). نمونه فعلی (DIN CK45) به عنوان تیمار شاهد برای مقایسه با سایر فولادها استفاده شد. در این پژوهش از چهار نوع فولاد با قابلیت سخت کاری با شماره‌های استاندارد DIN 16، DIN 42 CrMo4، DIN X 210Cr12، و DIN 16 MnCr5 استفاده گردید. عناصر تشکیل دهنده فولادهای مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

تیغه‌های آسیاب با طول ۵۰۰ میلی‌متر، عرض ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر مطابق با شکل ۳ تهیه شدند و برای ارزیابی سختی و مقاومت سایشی تیغه‌های ساخته شده در شرایط آزمایشگاهی و شرایط کارکرد واقعی، از طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار استفاده شد.

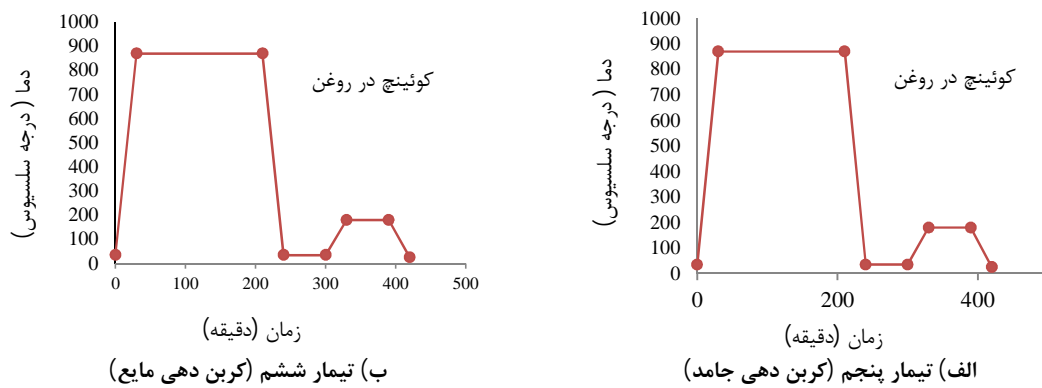
1- Martensite
2- Austenite



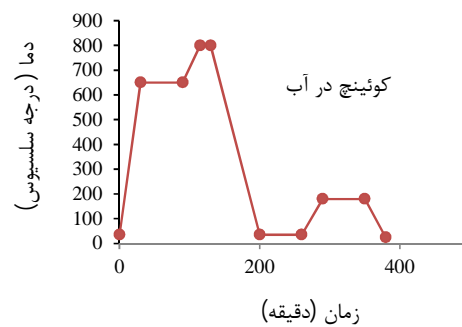
شکل ۴- دوره‌های عملیات حرارتی فولاد DIN X 210Cr12



شکل ۵- دوره عملیات حرارتی فولاد DIN 42 CrMo4



شکل ۶- دوره‌های عملیات حرارتی فولاد DIN 16 MnCr5



شکل ۷- دوره عملیات حرارتی فولاد DIN CK45 (تیمار هفتم)

نتایج نشان می‌دهد که تیمار شماره ۱ (فولاد DIN X 210Cr12 با عملیات حرارتی دوره اول) در آزمون سختی سنجی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری در مقایسه با بقیه داشته است و مقدار سختی آن نسبت به نمونه فعلی، ۱۱ راکول C بیشتر است، این تفاوت به دلیل درصد بالای کروم (۱۲ درصد) و وجود بسته‌های مارتنزیت و کاربید ریزتر است. مقدار سختی در این نوع فولاد نسبت به نمونه مشابه کوئنچ شده در هوا بیشتر است. به عبارت دیگر به دلیل افزایش نرخ سرد کردن، بسته‌های مارتنزیت و کاربید ریزتر شده است و توانسته است بر مقدار سختی فولاد، نسبت به نوع مشابه مؤثر باشد. تیمار ۲ (فولاد DIN X 210Cr12 با دوره عملیات حرارتی دوم) به دلیل بالا بودن درصد کروم و وجود مارتنزیت و کاربیدهای درشت تر و تیمار ۵ (فولاد DIN 16 MnCr5 با دوره عملیات حرارتی سخت‌کاری سطحی به روش کربن دهی جامد) به دلیل کربوره شدن سطح نمونه از نظر سختی، تفاوت معنی‌داری با هم نداشته ولی بقیه تیمارها با هم اختلاف معنی‌داری دارند.

بررسی اثر عملیات حرارتی بر سایش تیغه‌ها

سایش تیغه‌ها بر اساس میزان کاهش جرم تیغه‌ها بر حسب میلی‌گرم در مسافت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ متر طی شده در ۴ نوع فولاد مذکور اندازه‌گیری شد. جدول تجزیه واریانس سایش تیغه‌های مختلف تحت دوره‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. به احتمال ۹۹٪ ($P < 0.01$) در شرایط این آزمایش، بین تیمارها تفاوت معنی‌دار آماری وجود دارد. لذا به منظور بررسی اختلاف بین تیمارها، مقایسه میانگین‌های آزمون سایش برخی تیغه‌ها در دوره‌های حرارتی مختلف به روش دانکن در جدول ۶ نشان داده شده است.

از مقایسه تیمارها می‌توان دریافت که دستیابی به مقاومت به سایش بالا با انتخاب تیمار شماره ۱ یعنی فولاد DIN X 210Cr12 با دوره عملیات حرارتی کوئنچ در روغن امکان پذیر است. علت بالا بودن مقاومت به سایش در فولاد DIN X 210Cr12 با دوره عملیات حرارتی کوئنچ در روغن، میزان سختی بالا به واسطه درصد بالای کروم و ریزساختار مارتنزیت به همراه ذرات کاربید در اثر عملیات حرارتی مناسب است. در آزمون سایش آزمایشگاهی با افزایش

پس از ساخت تیغه‌ها و انجام عملیات حرارتی روی آنها، عملیات سختی سنجی با استفاده از دستگاه آزمون سنجی سختی EMCo Test مدل M4U 750 بر روی نمونه‌های پالیش شده در واحد راکول^۱ با نیروی اولیه ۱۰ کیلوگرم و نیروی نهایی ۱۵۰ کیلوگرم صورت گرفت. همچنین آزمون سایش به روش پین بر روی دیسک بر روی نمونه‌های آزمون سایش که به شکل دیسک‌هایی به قطر ۵ سانتی‌متر با پین از جنس فولاد ۵۲۱۰۰ و سختی (64RC) و دیسک متحرک در نیروی ۱۶۰ نیوتن و در سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه و مطابق با استاندارد ASTM G99 انجام شد. در مراحل آزمایش، کاهش وزن نمونه توسط ترازوی دیجیتال و با دقت ده هزارم گرم محاسبه گردید. آزمون سایش در مسافت ۱۰۰۰ متر در رطوبت $30 \pm 5\%$ و دمای $25 \pm 5^\circ\text{C}$ انجام شد. بعد از هر ۱۰۰ متر مسافت، نمونه‌ها از دستگاه خارج شده و کاهش وزن آنها محاسبه گردید.

به منظور آزمون تیغه‌ها در شرایط کارکرد واقعی، تیغه‌ها بر روی روتور دستگاه آسیاب چکشی مدل CPM نصب گردید. پس از مدت زمان ۳ ماه از کارکرد دستگاه و آسیاب نمودن مقدار ۱۸۰۰ تن غله، تیغه‌ها از روی دستگاه باز شد و مقدار سایش آنها بر حسب تلفات جرم، اندازه‌گیری شد. همچنین میزان تغییر شکل تیغه‌ها از نظر شکل ظاهری بررسی و مقایسه گردید.

نتایج و بحث

بررسی اثر عملیات حرارتی بر سختی تیغه‌ها

جدول تجزیه واریانس سختی سنجی تیغه‌های مختلف تحت دوره‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، به احتمال ۹۹٪ ($P < 0.01$) در شرایط این آزمایش، بین تیمارها تفاوت معنی‌دار آماری وجود دارد. به عبارت دیگر، دوره‌های مختلف عملیات حرارتی اعمال شده بر روی تیغه‌ها از جنس‌های متفاوت توانسته است باعث ایجاد سختی متفاوت، متناسب با دوره عملیات حرارتی و جنس تیغه گردد. لذا به منظور بررسی اختلاف بین تیمارها، مقایسه میانگین‌های آزمون سختی سنجی تیغه‌ها در دوره‌های حرارتی مختلف به روش دانکن در جدول ۴ نشان داده شده است.

افزایش می‌یابد. در ابتدای آزمون سایش، کاهش وزن با سرعت بیشتری نسبت به مراحل پایانی آزمون انجام می‌شود، که دلیل آن، اکسید شدن سطح نمونه‌های سایش پس از عملیات حرارتی بود و با سایش سطح اولیه لایه اکسیدی از بین رفته و نمونه به حالت پایدار می‌رسد، در نتیجه سرعت کاهش وزن در مسافت‌های طی شده پایانی آزمایش کمتر است.

مسافت، مقدار سایش بیشتر شده ولی در مسافت‌های یکسان، بین تیمارها اختلاف معنی‌دار وجود دارد. نتیجه این که در مسافت‌های یکسان، فولاد DIN CK45 نسبت به فولاد DIN X 210Cr12 مقدار ۱۲ میلی‌گرم سایش بیشتری داشته است. تیمار شماره ۱ یعنی فولاد DIN X 210Cr12 با دوره عملیات حرارتی کوئنچ در روغن مقدار سایش کمتری داشته است و می‌تواند توصیه گردد. در همه فولادها با افزایش مسافت طی شده کاهش وزن

جدول ۳- تجزیه واریانس سختی سنجی تیغه‌های مختلف تحت دوره‌های مختلف عملیات حرارتی

P	F	MS	SS	df	SOV
ns	۰/۱۴۹	۰/۱۲۵	۰/۲۵۰	۲	تکرار (R)
۰/۰۱	۱۱۵/۸۹۰	۹۷/۲۳۲	۶۸۰/۶۲۵	۷	تیمار (t)
--	--	--/۸۳۹	۱۱/۷۵۰	۱۴	خطای آزمایش (E)
			۶۹۲/۶۲۵	۲۳	کل (T)

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های آزمون سختی سنجی تیغه‌ها در دوره‌های حرارتی مختلف به روش دانکن

شماره تیمار	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
میانگین تیمار	۶۱/۶۶۶ ^g	۵۶/۸۳۳ ^e	۴۶ ^a	۴۸/۳۳۳ ^b	۵۶/۶۶۶ ^e	۵۹ ^f	۵۲/۳۳۳ ^d	۴۹/۸۳۳ ^c

جدول ۵- تجزیه واریانس سایش تیغه‌ها در مسافت‌ها و دوره‌های مختلف حرارتی

P	F	MS	SS	df	SOV
ns	۵/۵۷۱	۰/۰۳۹	۰/۰۷۷	۲	تکرار (R)
۰/۰۱	۲۰۸۷۲/۱۴	۱۴۶/۱۰۵	۴۵۲۹/۲۶۵	۳۱	تیمار (t)
-	-	۰/۰۰۷	۰/۴۶۲	۶۲	خطای آزمایش (E)
-	-	-	۶۹۲/۶۲۵	۹۵	کل (T)

جدول ۶- نتیجه مقایسه میانگین‌های سایش تیغه‌ها در دوره‌های حرارتی مختلف و مسافت‌های مختلف به روش دانکن

شماره تیمار	مسافت							
	۵۰ متر	۱۰۰ متر	۲۰۰ متر	۳۰۰ متر	۴۰۰ متر	۶۰۰ متر	۸۰۰ متر	۱۰۰۰ متر
۱	۲۵/۲ ^a	۲۷/۳۸ ^b	۲۹/۷۱ ^d	۳۱/۵۸ ^f	۳۴/۱۸ ⁱ	۳۷/۳۶ ^l	۳۹/۰۶ ^m	۴۲/۲۶ ^f
۳	۲۹/۱۱ ^c	۳۱/۳۱ ^e	۳۲/۹۰ ^g	۳۴/۴۸ ⁱ	۳۶/۷۱ ^k	۳۹/۶۸ ⁿ	۴۲ ^q	۴۴/۸۱ ^t
۶	۳۱/۵۶ ^f	۳۳/۸۶ ^h	۳۵/۸۶ ^j	۳۷/۳۷ ^l	۳۹/۸۶ ^o	۴۱/۱۶ ^p	۴۴/۶۶ ^t	۴۷/۰۶ ^v
۷	۳۷/۳۸ ^l	۳۹/۸۰ ^{no}	۴۱/۱۱ ^p	۴۳/۱۸ ^s	۴۶/۱۱ ^u	۴۹ ^w	۵۱/۲۱ ^x	۵۴/۱۸ ^y

مقایسه نتایج سختی و سایش

با افزایش سختی، مقدار مقاومت به سایش افزایش می‌یابد ولی در نمونه‌های با سخت‌کاری سطحی، چون عمق لایه سخت شده حداکثر تا ۰/۵ میلی‌متر است، ممکن است در ابتدا دارای سختی بالاتر و مقاومت به سایش بیشتر باشند، اما با از بین رفتن لایه سخت شده مقدار مقاومت به سایش نیز کم می‌شود. در این راستا تیمار شماره ۶ (فولاد DIN 16 MnCr5) که سخت‌کاری سطحی به روش کربن‌دهی مایع شده، پس از تیمار شماره ۱ دارای

بیشترین سختی است ولی با از بین رفتن لایه سخت شده، مقدار مقاومت به سایش آن از تیمار شماره ۳ (فولاد DIN 42 CrMo4 با دوره سخت‌کاری حجمی) کمتر است. تیمار شماره ۴ (فولاد DIN 42 CrMo4 با سخت‌کاری سطحی به روش القایی) در ابتدا سختی بیشتری نسبت به نمونه مشابه خود با دوره سخت‌کاری حجمی داشته است ولی با از بین رفتن لایه سخت شده به همراه تیمار شماره ۸ (فولاد DIN CK45- تیمار شاهد) دارای کمترین مقاومت سایشی است.

نتایج آزمون عملی

یعنی دوره عملیات حرارتی حجمی بر روی فولاد DIN 42 CrMo4 و سخت‌کاری سطحی به روش کربوره کردن مایع بر روی فولاد DIN 16 MnCr5 به یک مقدار توانسته مقاومت سایشی ایجاد نماید و بعد از تیمارهای ۱ و ۲ بیشترین مقاومت سایشی را دارد. تیمارهای ۴ و ۸ نیز مقدار سایش مشابهی داشته‌اند، یعنی سخت‌کاری سطحی به روش القایی بر روی فولاد DIN 16 MnCr5 نتوانسته است مقدار مقاومت سایشی قابل قبولی ایجاد نماید و به همراه فولاد DIN CK45 (نمونه فعلی) کمترین مقاومت سایشی را داشته‌اند. بقیه تیغه‌ها سایش متفاوتی داشته‌اند. مقدار سایش در دو تیمار مربوط به فولاد ۱/۲۰۸۰ به مقدار ۲ درصد وزنی و در نمونه فعلی ۴/۵ درصد وزنی تیغه‌ها بود. علت بالا بودن مقاومت به سایش در فولاد کاربرد در اثر عملیات حرارتی مناسب است.

جدول ۷ و ۸ نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌های سایش تیغه‌های مختلف تحت دوره‌های مختلف در آزمون عملی را نشان می‌دهد. به احتمال ۹۹٪ ($P < 0.01$) در شرایط این آزمایش، بین تیمارها تفاوت معنی‌دار آماری وجود دارد. تیمارهای شماره ۱ و ۲ (فولاد DIN X 210Cr12 با دوره عملیات حرارتی متفاوت) در آزمون سایش از نظر آماری تفاوت معنی‌داری در مقایسه با بقیه داشته‌اند ولی بین این دو تیمار، تفاوت معنی‌دار آماری وجود ندارد، به عبارت دیگر دوره‌های متفاوت عملیات حرارتی بر روی این فولاد نتوانسته است مقدار سایش متفاوتی ایجاد نماید، علی‌رغم اینکه میانگین سختی بین این دو تیمار معنی‌دار بود و دلیل آن ناهمگن بودن ریزساختار به وجود آمده در اثر عملیات حرارتی است. بین تیمارهای ۳ و ۶ نیز تفاوت مقدار سایش معنی‌دار نبوده.

جدول ۷- تجزیه واریانس سایش تیغه‌های مختلف در آزمون عملی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی

P	F	MS	SS	df	SOV
ns	۱/۸۶۷	۰/۲۸۲	۰/۵۶۴	۲	تکرار (R)
۰/۰۰۱	۳۱۶/۴۹۶	۴۷/۷۹۱	۳۳۴/۵۳۹	۷	تیمار (t)
-	-	۰/۱۵۱	۲/۱۱۰	۱۴	خطای آزمایش (E)
-	-	-	۶۹۲/۶۲۵	۲۳	کل (T)

جدول ۸- نتیجه مقایسه میانگین‌های سایش تیغه‌ها در دوره‌های حرارتی مختلف در آزمون عملی به روش دانکن

شماره تیمار	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
میانگین تیمار	۶/۷ ^a	۶/۹۱ ^a	۱۰/۹۸۶ ^c	۱۶/۸۱۱ ^f	۱۲/۱۴۱ ^d	۱۱/۳۸۸ ^c	۱۴/۳۲۶ ^e	۱۶/۹۴۰ ^f

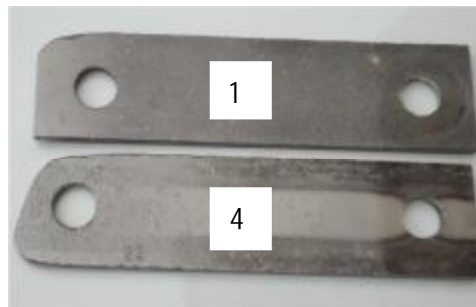
تیغه شماره ۶ (فولاد DIN 16 MnCr5) با سخت‌کاری سطحی به روش کربن‌دهی مایع (دچار سائیدگی بیشتری شده است و دلیل آن، شرایط بهتر محیط کربوره کردن در روش مایع است، تیغه شماره ۳ (فولاد DIN 16 MnCr5) دوره سخت‌کاری حجمی) پس از فولاد DIN X 210Cr12 دارای کمترین سایش است. سائیدگی در تیغه‌های شماره ۱ و ۲ برابر با ۲ درصد وزنی و در تیغه‌های شماره ۴ برابر با ۴/۷ درصد وزنی و در تیغه شماره ۸ برابر با ۴/۵ درصد وزنی است. نتایج آزمون عملی با نتایج آزمون سایش آزمایشگاهی تطابق دارد.

بررسی شکل ظاهری تیغه‌ها پس از گذشت ۳ ماه از کارکرد آنها نشان داد که تیغه شماره ۱ (فولاد DIN X 210Cr12) با دوره عملیات حرارتی کوئنچ در روغن) دارای کمترین فرسایش در لبه ضربه زننده تیغه است. تیغه شماره ۴ (فولاد DIN 42 CrMo4 با سخت‌کاری سطحی القایی) و تیغه شماره ۸ (فولاد DIN CK45) که تیمار شاهد محسوب می‌شود دارای بیشترین فرسایش و تغییر شکل لبه کاربردی تیغه است (شکل‌های ۸ و ۹). دوره بهینه عملیات حرارتی در فولاد DIN CK45 (تیغه شماره ۷) نسبت به تیمار شاهد (تیغه شماره ۸) موثر بوده و سایش در تیغه شماره ۷ از تیغه شماره ۸ کمتر است. لبه کاربردی تیغه شماره ۵ (فولاد DIN 16 MnCr5) با سخت‌کاری سطحی به روش کربن‌دهی جامد) نسبت به

۵- به عنوان یک پیشنهاد علمی و ترویجی، فولاد DIN X 210Cr12 با دوره عملیات حرارتی کوئنچ در روغن به عنوان جایگزین مناسب برای تیغه‌های فعلی توصیه می‌گردد.

منابع

1. Chandler, H. (1998). *Heat treaters guide: Practices and procedures for irons and steels*, 2nd Ed. (PP 27-111). ASM International. USA.
2. Ciuplys, V. & Kvedaras, V. (2010). Increasing of Carbon Steel durability by surface hardening. *Materials science*, 16(1): 24-28.
3. Dabbour, MI., Bahnasawy, A., Ali S. & El-Haddad, Z. (2015). Grinding Parameters and their Effects on the Quality of Corn for Feed Processing. *Journal of Food Processing & Technology*, 6(9): 7 pages.
4. Danda, S. (2011). Effect of induction hardening on high carbon steel forgings. *International journal of soft Computing and engineering*, 1: 15-18.
5. Enculescu, E., & Paraschiv, D. (2010). Research on the active parts of the blades hardening of grain harvesters, forage and industrial crops. *Journal of academic research*, 2(6): 9 pages.
6. Ismail, N., Fouda, O., Ahmad, M., & Mosa, M. (2017). Influence of Knives Wear Phenomena on Hammer Mill Productivity and Product Quality. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 8(7): 347-353.
7. Lau, K. H., Mei, D., Yeung, C. F., & Man, H. C. (1999). Wear characteristics and mechanical of a thin edge cutting blade. *Journal of Mechanical Processing*, 102: 203-207.
8. Neale, M. J., & Gee, M. (2000). *Guide to Wear Problems and Testing for Industry Technology* (Chap. 2 PP 3-32). New York, USA.
9. Rabinowicz, E. (1995). *Friction and wear of materials*, 2nd Ed. Willey, New York, USA.
10. Yancey, N., Wright, C. T., Westover, T. L. (2013). Optimizing hammer mill performance through screen selection and hammer design. *Biofuels*, 4(1): 85-94.



شکل ۸- مقایسه تیغه شماره ۱ (فولاد DIN X 210Cr12 کوئنچ در روغن) و تیغه شماره ۴ (فولاد DIN 42 CrMo4 با دوره سخت کاری القایی)



شکل ۹- مقایسه تیغه شماره ۱ (فولاد DIN X 210Cr12 کوئنچ در روغن) و تیغه شماره ۸ (فولاد DIN CK45 تیمار شاهد)

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، خواص مکانیکی ۴ نوع فولاد تحت تأثیر عملیات حرارتی مختلف، برای یافتن جایگزین مناسب برای تیغه‌های آسیاب چکشی غلات مورد بررسی قرار گرفت و نتایج ذیل به دست آمد.

۱- تیمار شماره ۱ (فولاد DIN X 210Cr12 با دوره عملیات حرارتی کوئنچ در روغن)، بیشترین سختی و مقاومت به سایش را داشته است.

۲- تیمار شماره ۴ (فولاد DIN 42 CrMo4 با دوره عملیات حرارتی سخت کاری سطحی به روش القایی) و تیمار شماره ۸ (فولاد DIN CK45) مقدار مقاومت به سایش مشابهی داشته و دارای کمترین مقاومت به سایش بوده‌اند.

۳- بررسی شکل ظاهری تیغه‌ها در آزمون عملی نشان داد که تیغه شماره ۱ و ۲ (فولاد DIN X 210Cr12 با دوره عملیات حرارتی مختلف) دارای کمترین فرسایش در لبه ضربه زننده تیغه بود.

۴- نتایج آزمون آزمایشگاهی و آزمون عملی تطابق خوبی با هم داشته و نتایج یکدیگر را تایید می‌نمایند.