

# Investigation of the effects of blade geometry, material, and hardening method on the wear resistance of sugarcane harvester cutting blades

## ABSTRACT

One of the problems associated with sugarcane harvesting machines is wear of cutting blades, which leads to reduced cutting quality, increased machine downtime, and higher operating costs. Optimal and wear-resistant blade design can improve operational safety. Evaluating blade materials in combination with blade geometry and hardening methods is essential for designing blades with long service life and performance. Previous studies investigated these factors independently. The objective of this study was to evaluate the simultaneous effects of blade material, geometry, and hardening method on the wear resistance of cutting blades used in sugarcane harvesting machines and to identify suitable combination under the conditions investigated. The innovation of this study lies in adopting an integrated approach to evaluate the combined effects of blade material, geometry, and hardening method on wear performance, providing a practical basis for selecting suitable blade configuration for sugarcane harvesting applications. Wear was evaluated by measuring the difference in specimen weight before and after 24 h of harvesting operation using a digital balance with an accuracy of 0.01 g. A linear regression relationship was established between blade hardness and wear resistance, with a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.93. The results showed that the lowest wear after 24 h of operation was observed for 100Cr6 steel, with a wear value of 67.35 g. Among blade geometries, the reinforced geometry exhibited the lowest wear, with a value of 68.15 g. Furthermore, the combination of 100Cr6 steel and induction hardening resulted in the lowest wear, with a value of 64.41 g.

**Keywords:** *Blade geometry, blade material, induction hardening, thermal hardening, wear*

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Sugarcane harvester cutting blades are exposed to severe wear due to continuous contact with stalks, soil, sand, and other abrasive particles. Blade wear reduces cutting quality, increases cutting force and fuel consumption, prolongs machine downtime for blade replacement, and ultimately increases operating costs. Optimal, wear-resistant blade design can refine the blade geometry, eliminate weaknesses, and enhance operational safety. Therefore, evaluating and comparing different blade materials, particularly in combination with blade geometry and hardening methods, is essential for designing blades with a long service life and optimal performance. Many studies have investigated these factors independently, whereas actual blade performance results from the simultaneous interaction of blade geometry, the mechanical properties of the material, and the microstructure produced by hardening method. The main objective of this study was to simultaneously determine the optimal blade geometry, material, and hardening method for designing blades with greater wear resistance. Rather than treating blade material, geometry, and hardening method as independent design parameters, the innovation of this study is the integrated assessment of these factors within a single experimental framework, with particular emphasis on their combined effects on blade wear behavior. This approach helps clarify the extent to which the wear performance of sugarcane harvester cutting blades depends on the interaction among material, geometry, and hardening conditions, providing a more reliable basis for blade design and selection.

### Method

In this study, blades were manufactured from three steel grades (100Cr6, 16MnCr5, and Ck60), in three geometrical shapes (triangular, reinforced, and crescent-shaped), and

hardened by two methods: induction and thermal hardening. After preparing all specimens and before conducting the field experiment, their hardness was measured under laboratory conditions using a hardness tester as an indicator of wear resistance. The blades were then installed on the harvesting machine. After 4 h and subsequently every 2 h until 24 h of operation, wear was evaluated by measuring the difference in specimen weight before and after harvesting operations using a digital balance with an accuracy of 0.01 g. The experiment was conducted as a factorial experiment within a randomized complete block design over a period of 20 days at Mirza Kuchak Khan Agro-Industrial Complex (Khuzestan, Iran). The three blade materials, three geometrical designs, and two hardening methods were considered the independent experimental variables, while blade wear was the measured dependent variable.

### Results

The laboratory test results showed a positive correlation between blade hardness and wear resistance. Analysis of variance of the field experiment showed that the effects of hardening method, blade material, blade geometry, and the interaction between hardening method and blade material on wear were significant at the 1% probability level. Among the blade materials, the lowest wear was observed for 100Cr6, with a wear loss of 67.35 g after 24 h of blade operation. Compared with Ck60 and 16MnCr5, it exhibited 5.2% and 2.5% lower wear, respectively. Regarding blade geometry, the reinforced blade had the lowest wear, with a wear loss of 68.15 g after 24 h of operation, which was 1.3% and 2.8% lower than that of the crescent-shaped and triangular designs, respectively. The results showed that the combination of 100Cr6 steel and induction hardening resulted in the lowest wear and highest hardness, with a wear loss of 64.41 g after 24 h of blade operation. According to the regression model, wear resistance increased with increasing hardness, with a coefficient of determination of 0.93. For all blades, wear showed an increasing trend over time and reached its maximum value at 16-18 h of operation. After 18 h, a relative decrease in wear was observed for all steels, which was probably due to the formation of oxide layers and compacted wear particles on the contact surface, a reduction in the roughness of the interacting surfaces, and the transition of the wear process toward a steady-state condition.

### Conclusions

The optimal combination for manufacturing sugarcane harvester cutting blades was the reinforced geometry, 100Cr6 steel, and induction hardening. A blade manufactured with these specifications can substantially mitigate the problem of cutting blade wear in sugarcane harvesting machines and is therefore recommended as the optimal blade manufacturing combination.

# بررسی تأثیر شکل هندسی، جنس تیغه و روش سخت کاری بر مقاومت به سایش تیغه‌های برش ماشین برداشت نیشکر

## چکیده

یکی از مشکلات اصلی کار با ماشین‌های برداشت نیشکر، سایش تیغه‌های برش ماشین برداشت نیشکر می‌باشد. سایش تیغه‌ها موجب کاهش کیفیت برش، افزایش زمان توقف ماشین و در نهایت بالا رفتن هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. طراحی بهینه و مقاوم به سایش تیغه برش، موجب بالا رفتن ضریب ایمنی می‌شود. ارزیابی و مقایسه جنس‌های مختلف، به‌ویژه در کنار هندسه تیغه و روش‌های سخت کاری، برای طراحی تیغه‌های با عمر طولانی و عملکرد بهینه ضروری است. بسیاری از مطالعات این عوامل را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند. هدف این پژوهش، ارزیابی تجربی اثر هم‌زمان جنس، هندسه تیغه و روش سخت کاری بر مقاومت به سایش تیغه‌های برش ماشین برداشت نیشکر و شناسایی ترکیب مناسب این عوامل در شرایط مورد مطالعه بود. نوآوری پژوهش حاضر، ارزیابی هم‌زمان سه عامل جنس، شکل هندسی و روش سخت کاری و بررسی اثرات متقابل آن‌ها بر مقاومت به سایش تیغه‌های برش ماشین برداشت نیشکر است. سایش از طریق اندازه‌گیری اختلاف وزن نمونه‌ها، قبل و بعد از ۲۴ ساعت عملیات برداشت با یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا گردید. بین سختی و مقاومت سایشی رابطه رگرسیون خطی برقرار بود که ضریب تبیین آن  $R^2 = 0.93$  بدست آمد. نتایج نشان داد کمترین میزان سایش در ۲۴ ساعت کاری تیغه‌ها مربوط به جنس 100Cr6 با ۶۷/۳۵ گرم بود. در بین شکل‌های مختلف، هندسه تقویتی با ۶۸/۱۵ گرم کمترین سایش را داشت. همچنین جنس 100Cr6 و روش سخت کاری القایی با ۶۴/۴۱ گرم، کمترین سایش را به خود اختصاص داد.

کلیدواژه‌ها: جنس تیغه، سایش، سخت کاری القایی، سخت کاری حرارتی، شکل هندسی

نشانده



## مقدمه

برداشت مکانیزه نیشکر یکی از مهم‌ترین مراحل تولید این محصول است و عملکرد مناسب ماشین‌های برداشت تأثیر مستقیمی بر بهره‌وری، کیفیت محصول، هزینه‌های تولید و مصرف انرژی دارد. همانند تمامی ماشین‌های مکانیزه‌ی برداشت محصولات کشاورزی، این ماشین‌ها همچنان دارای مشکلاتی در مسیر انجام بهینه عملیات برداشت و کاهش ضایعات می‌باشند. در این میان، تیغه‌های برش به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی ماشین برداشت، به دلیل تماس مداوم با ساقه نیشکر، خاک، ماسه و سایر ذرات ساینده، در معرض سایش شدید قرار دارند. سایش تیغه‌ها موجب کاهش کیفیت برش، افزایش نیروی برش و مصرف سوخت، افزایش زمان توقف ماشین برای تعویض تیغه و در نهایت بالا رفتن هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود؛ از این رو، یکی از مهم‌ترین چالش‌های طراحی و بهره‌برداری از ماشین‌های برداشت نیشکر، بهینه‌سازی و افزایش مقاومت به سایش تیغه‌های برش این ماشین است (Turapov et al., 2024; Bernache et al, 2020; Farag, 2020).

علاوه بر کاهش جرم قطعه، موجب اصلاح شکل، برطرف شدن نقاط ضعف و بالا رفتن ضریب ایمنی می‌شود.

جنس تیغه یکی از عوامل تعیین‌کننده مقاومت به سایش، دوام و عملکرد ابزارهای برش در ماشین‌های کشاورزی است. خواص مکانیکی و متالورژیکی ماده، از جمله سختی، چقرمگی، استحکام، ترکیب شیمیایی و ریزساختار، نوع و شدت مکانیزم‌های سایش تحت تأثیر جنس تیغه قرار دارند. در محیط‌های ساینده، مانند عملیات برداشت نیشکر که تیغه به‌طور هم‌زمان با ساقه گیاه، خاک و ذرات معدنی در تماس است، انتخاب جنس مناسب می‌تواند نرخ سایش را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و عمر مفید تیغه را افزایش دهد (Hutchings & Shipway, 2017; ASM International, 2017; Bhadeshia & Honeycombe, 2024; Totten, 2006).

شکل هندسی تیغه، نحوه تعامل تیغه با گیاه و خاک را تعیین می‌کند. پارامترهایی مربوط به هندسه تیغه بر نیروی برش، میزان نفوذ، کیفیت برش، مصرف انرژی و نرخ سایش تأثیر مستقیم دارند. بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند با کاهش تمرکز تنش و اصطکاک در ناحیه تماس، موجب کاهش مقاومت برشی، بهبود کیفیت عملیات و افزایش عمر مفید تیغه شود (Zhang et al., 2024; Qian et al., 2023; Zhou et al., 2024; Godwin, 2007; Liu et al., 2010; al., 2024). گرچه شکل هندسی تیغه‌های ماشین‌های برداشت ساده به نظر می‌رسد، اما از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد ابزارهای برش است که طراحی بهینه آن نیازمند بهره‌گیری از دانش فنی و طراحی خاص مهندسی بوده که باید کلیه مراحل تولید آن به دقت انجام شود (Pérez-Reyes et al., 2022).

عملیات سخت‌کاری یکی از مؤثرترین روش‌های مهندسی برای افزایش مقاومت به سایش و بهبود عملکرد تیغه‌های برش در ماشین‌های کشاورزی است. این فرآیند با تغییر ریزساختار فولاد و افزایش سختی سطح یا کل مقطع، مقاومت تیغه را در برابر سایش ساینده، خراشان و تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌دهد. روش‌های مختلف سخت‌کاری، بسته به نوع فولاد و شرایط کاری، می‌توانند عمر مفید تیغه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند (Singh et al., 2021; Hironaka & Shigemori, 2026).

از این رو، ارزیابی و مقایسه جنس‌های مختلف، به‌ویژه در کنار هندسه تیغه و روش‌های سخت‌کاری، برای طراحی تیغه‌های با عمر طولانی و عملکرد بهینه ضروری است. مطالعات قبلی این عوامل را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند، در حالی که عملکرد واقعی تیغه، حاصل برهم‌کنش هم‌زمان هندسه، خواص مکانیکی ماده و ریزساختار ایجادشده توسط عملیات حرارتی است.

هدف این پژوهش، معرفی فولاد جدید یا توسعه یک روش نوین متالورژیکی برای افزایش مقاومت به سایش نیست؛ زیرا تأثیر خواص مواد و عملیات سخت‌کاری بر سختی و مقاومت به سایش فولادها، به‌طور گسترده در مطالعات پیشین شناخته شده است. در عوض، هدف پژوهش حاضر، ارزیابی تجربی و هم‌زمان سه عامل جنس تیغه، هندسه تیغه و روش سخت‌کاری و مقایسه ترکیب‌های مختلف این عوامل در شرایط کاربردی ماشین برداشت نیشکر، به منظور طراحی بهینه تیغه‌هایی با مقاومت سایشی و دوام بیشتر است. از این رو، نوآوری اصلی پژوهش حاضر بر شناسایی ترکیب مناسب جنس، هندسه و روش سخت‌کاری و بررسی عملکرد سایشی آن‌ها در شرایط مورد مطالعه قرار گرفت.

## پیشینه پژوهش

هندسه مناسب ابزارهای خاک‌ورزی نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش نیروی کشش، بهبود عملکرد عملیاتی، کاهش نرخ سایش و افزایش دوام ابزار در شرایط کاری ساییده دارد (Liu et al., 2010; Godwin, 2007; Lau et al., 2000; Mo et al., 2022; Syafriandi et al., 2021). نتایج تحقیق کسرای و صبور روح‌ا قدم (۱۳۸۴) در خصوص سایش قسمت‌های مختلف هندسه خاک‌ورز برگردان‌دار نتایج نشان داد که بیشترین سایش تیغه‌ها مربوط به نوک تیغه می‌باشد و اگر در ۳۰ درصد ابتدای تیغه از روش‌های افزایش مقاومت به سایش استفاده شود در این صورت هم مقدار سایش کاهش می‌یابد و هم ابتدای تیغه یکنواخت‌تر ساییده خواهد شد.

در تحقیقی، تاثیر جنس‌های مختلف فولاد بر روی میزان سایش تیغه در خاک کشاورزی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر سایش با اضافه شدن میزان کربن فولادها به شکل معنی‌داری کاهش می‌یابد (Owsiak, 1997). در پژوهشی دیگر، میزان سایش تعدادی تیغه پنجه‌غازی مورد بررسی قرار گرفت؛ نتایج نشان داد که کمترین کاهش وزن (۱۸ g) در تیغه‌های En 19 و بیشترین کاهش وزن تیغه‌ها، در نمونه کنترل ساخته شده از فولاد نرم En 3 (۷۲ g) بود (Gupta et al., 2004). نتایج تحقیقات صورت گرفته پیرامون فولادهای به کار گرفته شده در ماشین‌های کشاورزی با هدف رسیدن به ترکیبی از سختی و مقاومت به سایش نشان داد که ریز ساختار فولاد پر کربن، فولاد با بور و فولاد با کرم بعد از انجام عملیات آب‌دهی و برگشت ایجاد ساختار مارتنزیت یا مارتنزیت و کاربید برای ابزار کشاورزی ارجحیت دارد (Singh et al., 2020; Luo et al., 2025; Bhakat et al., 2004).

شریف نسب (۱۳۷۵) از بین روش‌های مختلف سخت‌کاری، استفاده از کوره القایی را مناسب‌ترین روش معرفی کرد و یک کوره القایی مناسب برای سخت‌کاری تیغه‌های دروگر و کمپان طراحی کرد. در تحقیقی اثر سه روش سخت‌کاری شامل: آب‌دهی-برگشت، کربن‌دهی و سطح سختی به روش جوشکاری بر کاهش سایش تیغه خاک‌ورز برگردان‌دار مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر سه روش به طور معنی‌داری مقدار سختی سطح و مقاومت به سایش را افزایش دادند و روش پوشش‌دهی به کمک جوشکاری عملکرد بهتری داشت (اعلمی و همکاران، ۱۳۸۶). در مطالعه‌ای، اثر سطح سختی و سایش تیغه‌های خاک‌ورز چیزل مورد بررسی قرار گرفت؛ آزمایش با استفاده از سه الکتروود مختلف EH-350, EH-600, EH-14Mn بر روی یک فولاد با درصد آلیاژ پایین انجام شد. نتایج حاکی از این بود که الکتروودهای EH-350 و EH-600 بهتر بودند (Bayhan, 2006). در پژوهشی دیگر، محققان با پوشش لایه سخت روی تیغه‌های تیلرهای گردان در جاهایی که در معرض سایش بیشتر بودند موفق شدند عمر مفید تیغه‌ها را افزایش دهند (Karoonyboonyanan et al., 2007). محققان دیگری، نتیجه گرفتند که سایش تیغه‌های گاواهن برگردان‌دار بدون عملیات سخت‌کاری با اختلاف معنی‌داری بیشتر از تیغه‌های سخت‌کاری شده بود (Horvat et al., 2008). نتایج تحقیقات نشان داد که مهم‌ترین متغیر برای بهبود مقاومت سایشی، میکروساختار نمونه‌های سخت‌کاری شده است و ریز ساختار مارتنزیت برگشت شده به عنوان مناسب‌ترین ریز ساختار فلزی برای گاواهن برگردان‌دار معرفی شد (Corando et al., 2009). در مطالعه‌ای، ویژگی‌های سایش تیغه‌های پنجه‌غازی کولتورهای مختلف که لبه آن‌ها با ۵ نوع پوشش مختلف سخت‌کاری شده بود مورد بررسی قرار گرفت؛ نتایج نشان داد که سایش با فاصله از نوک تیغه‌ها متناسب است (Zhang and Kushwaha, 1995). در مطالعه‌ای که توسط کسرای و صبور روح‌ا قدم (۱۳۸۳) صورت گرفت؛ خصوصیات فولاد ساده کربنی Ck45 تحت یک سری عملیات حرارتی مختلف ارزیابی شد؛ نتایج نشان داد که با عملیات حرارتی متفاوت می‌توان ویژگی‌های متفاوتی از مقاومت سایشی و انرژی شکست در این فولاد ایجاد کرد و سختی معیار خوبی جهت مقایسه و پیش‌بینی عملکرد تیغه‌های برش و ابزارهای خاک‌ورزی است. نتایج تحقیقات دیگری نشان داد که افزایش سختی ماده و مقاومت به سایش معمولاً با کاهش چقرمگی همراه است و در صورت کاهش بیش از حد چقرمگی، احتمال ترک‌خوردگی و شکست لبه تیغه افزایش می‌یابد. بنابراین، عملکرد مطلوب تیغه مستلزم ایجاد تعادل مناسب بین سختی و چقرمگی است. از این رو، انتخاب روش سخت‌کاری و پارامترهای آن باید متناسب با جنس تیغه و شکل هندسی انجام شود (Zou et al., 2025; Xiao et al., 2025; Malvajerdi, 2023; Luo et al., 2025).

مطالعات انجام شده توسط محققان نشان داد که عوامل مختلفی بر رفتار سایشی و عمر مفید تیغه تأثیرگذارند. انتخاب شکل

هندسی مناسب، جنس و عملیات حرارتی صحیح می‌تواند با ایجاد ریزساختارهای مقاوم به سایش، عمر تیغه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد (Budinski, 2007). با وجود پژوهش‌های انجام‌شده، بیشتر مطالعات هر یک از این عوامل را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند و ارزیابی هم‌زمان اثر شکل هندسی، جنس تیغه و روش سخت‌کاری بر مقاومت به سایش تیغه‌های ماشین برداشت نیشکر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع موجب شده است که اطلاعات جامعی درباره اثر متقابل این عوامل و تعیین ترکیب بهینه آن‌ها برای افزایش عمر تیغه و مقاومت به سایش در دسترس نباشد. از این‌رو، انجام پژوهشی که به‌صورت جامع اثر هم‌زمان این سه عامل را بررسی کند، می‌تواند ضمن پر کردن این خلأ علمی، مبنای مناسبی برای طراحی تیغه‌های با دوام بیشتر، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، افزایش قابلیت اطمینان ماشین‌های برداشت و بهبود بهره‌وری عملیات برداشت نیشکر فراهم آورد. بنابراین، سهم اصلی این پژوهش در ارائه یک روش جدید متالورژیکی یا معرفی فولاد جدید نیست، بلکه در ارزیابی نظام‌مند و هم‌زمان جنس، هندسه و روش سخت‌کاری تیغه‌های برش ماشین برداشت نیشکر در یک چارچوب آزمایشی واحد است. این رویکرد امکان مقایسه عملکرد سایشی ترکیب‌های مختلف این عوامل و شناسایی ترکیب مناسب برای شرایط کاربردی مورد مطالعه را فراهم می‌کند. نتایج حاصل می‌تواند به‌عنوان اطلاعات کاربردی برای انتخاب و طراحی تیغه‌های مقاوم به سایش در ماشین‌های برداشت نیشکر مورد استفاده قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

### طراحی تیغه

از آنجایی که تیغه‌های طراحی شده جهت استفاده و آزمایش باید بر روی ماشین‌های برداشت نیشکر موجود در ایران، مدل ۷۰۰۰ شرکت استوفت<sup>۱</sup> بسته می‌شد، در گام اول طول و عرض آن‌ها، مطابق با تیغه‌های استاندارد این ماشین‌ها انتخاب شد. تیغه‌های موجود بر روی این ماشین‌ها دارای طول ۲۸ سانتی‌متر و عرض ۹ سانتی‌متر هستند (شکل ۱).



شکل ۱. طرح تیغه‌های برش کنونی ماشین برداشت نیشکر

گام دوم، طراحی شکل هندسی تیغه‌ها بود که برش را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تیغه‌ها در سه مدل مختلف طراحی، ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفتند. طرح اول تقریباً شبیه به طرح مرسوم تیغه‌ها بود که در کشت و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این تفاوت که با حذف سنگ‌زنی در ناحیه مرکزی، مورد تقویت قرار گرفتند. دلیل این تقویت شکسته شدن تیغه‌های قبلی از ناحیه مرکزی بود (شکل ۲).

<sup>۱</sup>-Aoustoft



شکل ۲. (الف) ناحیه شکست تیغه‌های مرسوم و (ب) طرح تیغه تقویت شده

در طرح دوم (تیغه‌های مثلی)، قسمت برنده تیغه‌ها به صورت شیب‌دار طراحی شد (شکل ۳). وجود شیب، سبب می‌شود تا ساقه نیشکر روی تیغه بلغزد و باعث بهبود عمل برش شود.



طرح سوم (تیغه‌های هلالی) شامل تیغه‌هایی با گوشه‌های هلالی بودند که دلیل این طراحی به بیشینه رساندن طول لبه تیز تیغه‌ها و در نتیجه زیاد شدن قسمت برنده آنها بود (شکل ۴).



### جنس تیغه‌ها

انتخاب جنس تیغه یکی از عوامل مهم مؤثر بر مقاومت سایشی و عمر کاری تیغه‌های ماشین‌های برداشت است. مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۲۸۰۸، تیغه‌های ماشین‌های برداشت باید از فولادهایی با قابلیت دستیابی به سختی و خواص مکانیکی مناسب ساخته شوند و سختی لبه برنده نیز در محدوده مشخصی قرار گیرد. با توجه به اهمیت سختی، قابلیت سخت کاری و مقاومت به سایش در عملکرد تیغه‌های برداشت، در پژوهش حاضر سه نوع فولاد 100Cr6، 16MnCr5 و Ck60 که از نظر ترکیب شیمیایی، قابلیت سخت کاری و پاسخ به عملیات حرارتی با یکدیگر تفاوت دارند، برای ساخت تیغه‌ها انتخاب شدند. این انتخاب امکان بررسی و مقایسه اثر جنس فولاد، در کنار هندسه تیغه و روش سخت کاری، بر مقاومت سایشی تیغه‌های مورد استفاده در ماشین برداشت نیشکر را فراهم کرد (سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۳۶۶).

برای تهیه تیغه‌ها، ابتدا ماده اولیه به صورت تسمه با ضخامت ۵ میلی‌متر از فولادهای نام‌برده خریداری شد که برای اطمینان از صحت جنس مواد خریداری شده، نمونه‌ای از هر کدام به شرکت فولادسنج پارسین واقع در بازار آهن غرب تهران برای انجام تحلیل به روش کوانتومتری ارسال گردید. روش کوانتومتری روشی مناسب و سریع برای تحلیل شیمیایی مواد می‌باشد در این روش پرتوی X به سطح تابانده می‌شود و با اندازه‌گیری فرکانس‌های باز تابانده شده نوع و میزان عناصر موجود در قطعه شناسایی می‌شود. گزارش آنالیز هر یک از نمونه‌ها در جداول (۱-۳) ارائه گردیده است.

جدول ۱. آنالیز نمونه فلز Ck 60

| Fe<br>% | C<br>%  | Si<br>% | Mn<br>% | P<br>%  | S<br>%  | Cr<br>% | Mo<br>% | Ni<br>% |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ۹۸      | ۰/۵۸۲   | ۰/۲۸۲   | ۰/۵۹۵   | ۰/۰۱۷۶  | ۰/۰۲۷   | ۰/۰۵۴   | ۰/۰۱۲   | ۰/۰۵۷   |         |
| V<br>%  | Al<br>% | Zr<br>% | As<br>% | Cd<br>% | Cu<br>% | Nb<br>% | Ti<br>% | W<br>%  | Pb<br>% |
| ۰/۰۱    | ۰/۰۰۹   | ۰/۰۱۳   | ۰/۰۱    | ۰/۰۳۶   | ۰/۰۳۳   | ۰/۰۳۷   | ۰/۰۰۵   | ۰/۰۱۵   | ۰/۰۲    |

جدول ۲. آنالیز نمونه فلز 100Cr6

| Fe<br>% | C<br>%  | Si<br>% | Mn<br>% | P<br>%  | S<br>% | Cr<br>% |
|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| ۹۶/۴۶   | ۰/۹۸۴   | ۰/۲۱۴   | ۰/۳۳۲   | ۰/۰۰۸   | ۰/۰۱۲  | ۱/۳۸۶   |
| Mo<br>% | Ni<br>% | Cu<br>% | Co<br>% | Ti<br>% | V<br>% | W<br>%  |
| ۰/۰۴۵   | ۰/۲۷۸   | ۰/۲۰۶   | ۰/۰۰۷   | ۰/۰۱    | ۰/۰۰۶  | ۰/۰۲    |

جدول ۳. آنالیز نمونه فلز 16MnCr5

| Fe<br>% | C<br>% | Mn<br>% | P<br>%  | S<br>%  | Si<br>% |
|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| ۹۷      | ۰/۱۸۶  | ۱/۲۲۶   | ۰/۰۱۴   | ۰/۰۱۸   | ۰/۱۸۴   |
| Cu<br>% |        | Ni<br>% | Cr<br>% | Mo<br>% | Al<br>% |
| ۰/۱۰۹   |        | ۰/۱۴    | ۰/۹۹۵   | ۰/۰۳۰   | ۰/۰۰۹   |

تمامی ۳ نمونه از نظر ترکیب شیمیایی و درصد عناصر اصلی و فرعی کاملاً منطبق بر استانداردهای جهانی (Deutsches Institut für Normung [DIN], 2006; American Iron and Steel Institute [AISI], 1998; European Committee for Standardization, 2019) بودند.

### ماشین کاری تیغه‌ها

نقشه دوبعدی تیغه‌ها توسط نرم‌افزار SolidWorks آماده شد. سپس برای تهیه نمونه اولیه تیغه‌ها، تسمه‌های خریداری شده توسط اره لنگ به تکه‌های ۲۸ سانتیمتری تقسیم شد. با استفاده از دستگاه فرز و مطابق نقشه، طرح‌های تیغه‌ها بر روی تکه‌های فلز ماشین‌کاری شد. محل نصب تیغه‌ها بر روی ماشین، توسط دریل میزی سوراخ‌کاری شد. لبه تیز تیغه‌ها نیز توسط سنگ تخت سنگ‌زنی گردید.

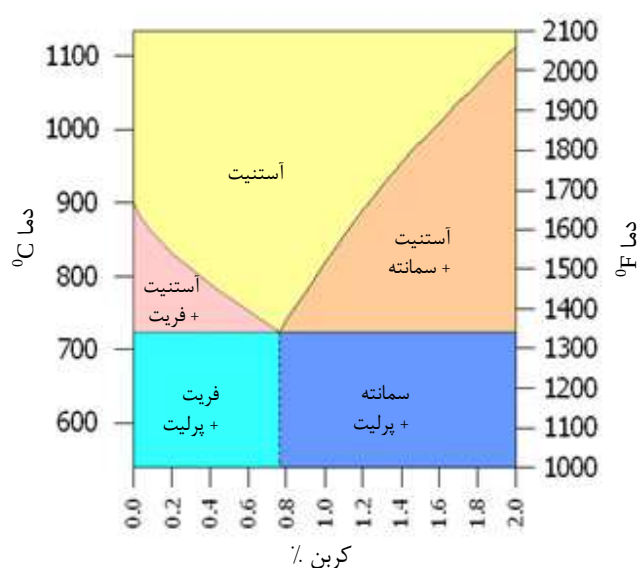
### سخت‌کاری تیغه‌ها

مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۲۸۰۸، در روش سخت‌کاری حرارتی، تیغه‌ها پس از آستنیت‌شدن نمونه‌ها در دمای ۸۷۰ درجه سانتی‌گراد، عملیات آب‌دهی (کوئنچ) انجام شد و سپس در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت، نمونه‌ها تحت عملیات برگشت (تمپر) قرار گرفتند. در روش سخت‌کاری القایی نیز پس از گرمایش القایی و سخت‌کاری، تیغه‌ها آب‌دهی شده و سپس

تحت عملیات برگشت قرار گرفتند. بدین ترتیب، در هر دو روش، عملیات برگشت پس از آب‌دهی، به‌منظور کاهش تنش‌های پسماند ناشی از آب‌دهی و دستیابی به شرایط پایدارتر سختی انجام شد. پس از تکمیل عملیات حرارتی، سختی تیغه‌ها با استفاده از مقیاس راکول HRC اندازه‌گیری شد (سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۳۶۶).

### روش سخت‌کاری حرارتی

در این روش می‌بایست نمونه‌ها، ریز ساختار مارتنزیتی می‌یافتند، به این منظور باید حرارت داده می‌شدند، آب‌دهی شده، سپس برای رفع تنش‌های باقیمانده برگشت می‌شدند. با توجه به جنس قطعات، درصد کربن به کار رفته و نمودار آهن-کربن، دمای آستنیت شدن نمونه‌ها تعیین گردید (شکل ۵).



شکل ۵. درصد کربن موجود در آهن و دما (گلدن، ۱۳۸۲)

همان‌طور که شکل (۵) نشان می‌دهد و با توجه به درصد کربن نمونه‌ها که بین ۰/۵۸ تا ۰/۹۸ درصد می‌باشد دمای قابل اطمینان برای آستینیت شدن همه نمونه‌ها دمای ۸۷۰ درجه سلسیوس می‌باشد و زمانی که نمونه‌ها در این دما قرار گیرند؛ وارد فاز آستنیتی شده و برای آب‌دهی کردن و رسیدن به ریز ساختار مارتنزیتی آماده می‌باشند. در مجموع ۵۴ تیغه در این پژوهش ساخته شد که بر اساس طرح فاکتوریل شامل ۲۷ تیغه تحت سخت‌کاری حرارتی و ۲۷ تیغه تحت سخت‌کاری القایی بودند. در روش سخت‌کاری حرارتی، با توجه به ظرفیت عملی کوره، تیغه‌ها در چند نوبت تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند و در هر نوبت حداکثر شش تیغه به‌صورت هم‌زمان در داخل کوره قرار داده شدند. کوره الکتریکی کاملاً کالیبره، دقیق و قبلاً برنامه‌ریزی دمایی شده بود. دما روی ۸۷۰ درجه تنظیم شد (برای جلوگیری از خطا و اطمینان از آستینیت شدن نمونه‌ها). مدتی طول کشید تا دمای کوره به ۸۷۰ درجه رسید؛ سپس به مدت ۳۰ دقیقه نمونه‌ها در این دما قرار گرفت (Rodriguez et al., 2020; paulo et al., 2023). از کوره آزمایشگاهی مدل FM20P (شکل ۶)، ساخت شرکت ایران خودساز واقع در آزمایشگاه بیوانرژی دانشگاه تربیت مدرس، دارای ۲۰ لیتر ظرفیت و توان ۸/۷ کیلووات؛ بیشینه درجه حرارت ۱۲۰۰ درجه سلسیوس در آزمایش‌های این تحقیق استفاده شد.



شکل ۶. کوره عملیات سخت کاری

پس از گذشت ۳۰ دقیقه از حضور نمونه‌ها در دمای ۸۷۰ درجه سلسیوس یک ظرف آب آماده شد و نمونه‌ها با استفاده از گیره از کوره خارج (شکل ۷) و سریعاً در آب سرد انداخته شد، دمای آب هم‌دمای محیط بود. این دما به این لحاظ انتخاب شد که اولاً ساختار مارتنزیتی ایجاد شده و از طرفی آب سردتر موجب ترک خوردن قطعات می‌شد (Rencis & Grandin., 2021).



شکل ۷. بیرون آوردن نمونه‌ها

به منظور دستیابی به ساختار مارتنزیتی مطلوب و در نتیجه تأمین سختی موردنظر در فولاد 100Cr6، پس از آستنیتی کردن نمونه‌ها، عملیات آب‌دهی انجام شد. عملیات آب‌دهی با سرد کردن سریع و یکنواخت نمونه در آب با دمای محیط اجرا شد. با توجه به شدت بالای سرد شدن در آب و احتمال ایجاد تنش‌های پسماند، نمونه‌ها تحت عملیات برگشت قرار گرفتند. برگشت بلافاصله پس از آب‌دهی انجام گرفت. بدین منظور، نمونه‌ها مجدداً در کوره قرار داده شده و به مدت ۲ ساعت در دمای ۸۷۰°C

۱۸۰ نگهداری شدند. این عملیات با هدف کاهش تنش‌های پسماند ناشی از آب‌دهی سریع، کاهش احتمال ترک‌خوردگی و بهبود چقرمگی نمونه‌ها انجام شد. پس از اتمام زمان برگشت، نمونه‌ها از کوره خارج شده و در هوای محیط تا رسیدن به دمای محیط سرد شدند. (Pérez-Reyes et al., 2018)

### سخت‌کاری القایی

قسمت دیگری از نمونه‌ها باید تحت فرآیند سخت‌کاری القایی قرار می‌گرفتند. عملیات سخت‌کاری القایی با استفاده از دستگاه سخت‌کاری القایی عمودی GH Induction TVK-S1000 انجام شد. دستگاه دارای تغذیه سه‌فاز ۳۸۰V، جریان نامی ۱۱۰ A و توان نامی ۷۰kW بود. برای گرمایش تیغه‌ها، از یک سیم‌پیچ القاگر مسی U شکل دو دور استفاده شد که با فاصله ۱۰ mm از سطح تیغه قرار گرفت. فرکانس کاری سیستم روی ۵۰kHz تنظیم شد. تیغه‌های ساخته‌شده از فولاد 100Cr6 با ضخامت ۵ mm تحت عملیات آسنیته کردن القایی در دمای ۸۷۰°C قرار گرفتند پس از رسیدن تیغه به دمای تنظیم شده، نمونه‌ها به مدت ۲۰ s در این دما نگهداری و سپس بلافاصله تحت عملیات آب‌دهی قرار گرفتند. بعد از آن فرآیند برگشت در دمای ۱۸۰°C به مدت ۲ h انجام شد. شرایط عملیاتی شامل فرکانس، فاصله القاگر از سطح تیغه، زمان گرمایش و دمای تنظیم‌شده، برای تمامی نمونه‌های تحت سخت‌کاری القایی یکسان نگهداشته شد (ASM International, 2017).

### نصب تیغه‌ها بر روی ماشین برداشت

برای انجام عملیات برداشت از یک ماشین برداشت ساخت کشور ایران (شرکت تجهیزات سنگین هپکو اراک تحت لیسانس شرکت استوف استرالیا) مدل HCH300، سال ساخت ۲۰۰۳ میلادی و دارای قدرت ۳۰۰ اسب بخار استفاده شد.

### سختی‌سنجی

پس از تهیه همه نمونه‌ها و پیش از آزمایش در محیط مزرعه و مقایسه وزنی میزان سایش در آن‌ها لازم بود سختی آن‌ها به عنوان شاخص مقاومت به سایش در محیط آزمایشگاهی اندازه‌گیری شود. برای این کار کلیه نمونه‌ها را ابتدا کاملاً تمیز نموده و سپس با استفاده از دستگاه سختی‌سنجی میزان سختی آن‌ها اندازه‌گیری شدند. دستگاه آزمون سختی‌سنجی مورد استفاده برای سختی‌سنجی مدل D1A Testor 722 ساخت شرکت اینسترون ولپرت از کشور انگلستان بود (شکل ۸).



شکل ۸. دستگاه سختی‌سنج

<sup>1</sup> - Instron Wolpert

## توزین نمونه‌ها

سایش نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری میزان کاهش وزن آن‌ها در ضمن عملیات برداشت در مزرعه انجام شد. بنابراین لازم بود نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات برداشت به دقت توزین شوند. برای این منظور از ترازوی دیجیتال ساخت کشور آلمان شرکت سارتوریوس<sup>۱</sup> مدل (TE3102S) و دقت ۰/۰۱ گرم استفاده شد. این عمل برای هر یک از نمونه‌ها و بعد از ۴ ساعت کار تیغه شروع شد و هر دو ساعت یک بار تا رسیدن به ۲۴ ساعت کار تیغه ادامه پیدا کرد.

## تست مزرعه

در این مرحله بایست تیغه‌های ساخته شده به محل مزرعه منتقل می‌شدند. برای انجام این کار تیغه‌های ساخته شده به شهرستان اهواز ارسال شد. پس از هماهنگی‌های لازم، شرکت کشت و صنعت میرزا کوچک‌خان واقع در ۷۵ کیلومتری جاده اهواز-خرمشهر در طول و عرض جغرافیایی (۳۱/۲۴، ۴۸/۴۹) به عنوان مزرعه برای آزمایش تیغه‌ها انتخاب شد. بر روی هر ماشین برداشت ۱۰ تیغه روی دو دیسک دایره‌ای با شعاع ۵۶ سانتی‌متر در قسمت پایین ماشین برداشت نصب می‌گردد که هر تیغه توسط دو پیچ بر روی دیسک نصب می‌شود.

## انتخاب طرح آزمایش

آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، شروع و به مدت ۲۰ روز در کشت و صنعت میرزا کوچک‌خان انجام گرفت. متغیرهای مستقل آزمایش شامل: سه جنس مختلف (16MnCr5 و 100Cr6، Ck60)، سه طرح تیغه (قدیمی تقویت شده، مثلثی و هلالی) و دو روش سخت‌کاری (حرارتی و القایی) بودند که در مجموع ۱۸ ترکیب تیماری را تشکیل دادند. برای هر ترکیب تیماری، ۳ تیغه به صورت یک واحد آزمایشی مستقل ساخته و مورد آزمون قرار گرفت که به عنوان تکرارهای مستقل آزمایش در تحلیل آماری لحاظ شدند. بنابراین تعداد کل تیغه‌های مورد استفاده برابر با ۵۴ عدد (۱۸ ترکیب تیماری × ۳ تیغه از هر تیمار به عنوان تکرار) بود. سایش تیغه‌ها، متغیر وابسته اندازه‌گیری بود که در ۲۴ ساعت کاری ماشین برداشت مورد ارزیابی قرار گرفت. هر یک از تیغه‌ها بعد از هر ۲ ساعت کار با ماشین برداشت توزین شد و کاهش وزن تیغه‌ها مبنای سایش آن‌ها بود.

## نتایج و بحث

### نتایج تست سایش تیغه‌ها در مزرعه

در جدول (۴)، نتایج تجزیه واریانس اثر اصلی تیمارهای مورد نظر و نیز اثر متقابل آن‌ها بر سایش تیغه‌های ماشین برداشت نیشکر نشان داده شده است. نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر روش سخت‌کاری، جنس تیغه، طرح تیغه و اثر متقابل روش سخت‌کاری و جنس تیغه بر روی سایش تیغه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار می‌باشند.

<sup>۱</sup> - Sartorius

جدول ۴. تجزیه واریانس داده‌های سایش تیغه‌ها تحت تیمارهای مختلف

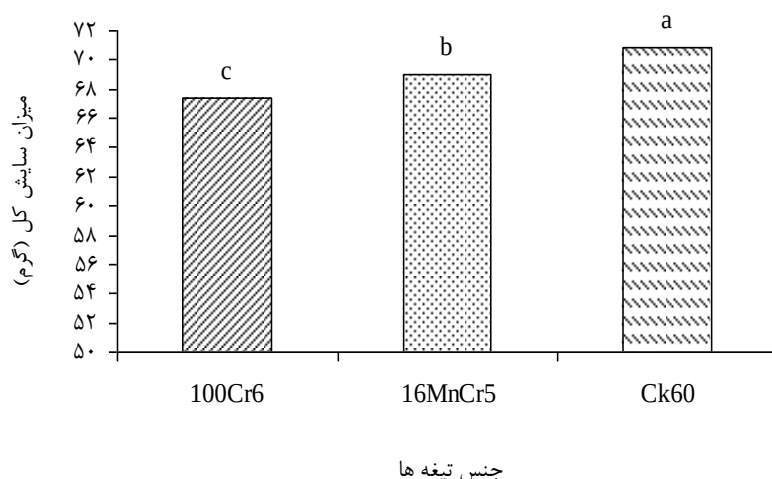
| منابع متغیر                    | درجه آزادی | مجموع مربعات | میانگین مربعات | آماره F            |
|--------------------------------|------------|--------------|----------------|--------------------|
| روش سخت‌کاری                   | ۱          | ۳۰۹/۷۰۰      | ۳۰۹/۷۰۰        | ۶۵۴**              |
| جنس تیغه                       | ۲          | ۱۱۰/۷۹۲      | ۵۵/۳۹۶         | ۱۱۷**              |
| طرح تیغه                       | ۲          | ۳۲/۷۷۲       | ۱۶/۳۸۶         | ۳۶/۶۰**            |
| روش سخت‌کاری×جنس تیغه          | ۲          | ۷/۹۶۷        | ۳/۹۸۳          | ۸/۴۱**             |
| روش سخت‌کاری×طرح تیغه          | ۲          | ۲/۸۶۵        | ۱/۴۳۲          | ۳/۰۲ <sup>NS</sup> |
| جنس تیغه×طرح تیغه              | ۴          | ۴/۷۰۳        | ۱/۱۷۶          | ۲/۴۸ <sup>NS</sup> |
| جنس تیغه×طرح تیغه×روش سخت‌کاری | ۴          | ۴/۸          | ۱/۲            | ۲/۵۳ <sup>NS</sup> |
| خطا                            | ۳۶         | ۱۷/۰۵۴       | ۰/۴۷۳          |                    |
| جمع                            | ۵۳         | ۴۹۰/۶۵۲      |                |                    |

NS و \*، \*\* به ترتیب معنی‌داری در سطح ۱٪، ۵٪ و عدم معنی‌داری

مطابق جدول (۴)، تمامی فاکتورهای اصلی شامل روش سخت‌کاری، جنس تیغه و طرح تیغه در سطح احتمال ۱ درصد ( $p < 0.01$ ) دارای اثر معنی‌داری بر میزان سایش تیغه می‌باشند. در این میان، روش سخت‌کاری با اختصاص بیشترین مجموع مربعات، بیشترین سهم را در تغییرات سایش تیغه‌ها به خود اختصاص داده است. از میان اثرات متقابل، تنها اثر متقابل “روش سخت‌کاری × جنس تیغه” در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار گردید ( $p < 0.01$ ). این موضوع بیانگر آن است که نرخ سایش تیغه‌ها تحت تأثیر رفتار متقابل نوع آلیاژ و عملیات حرارتی/سخت‌کاری قرار دارد و انتخاب بهترین جنس تیغه مستلزم توجه به روش سخت‌کاری اعمال‌شده بر روی آن خواهد بود. سایر اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه فاکتورها از نظر آماری تفاوت معنی‌داری را نشان ندادند ( $p > 0.05$ ).

#### اثر جنس تیغه

همان گونه که نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد اثر جنس تیغه بر روی سایش معنی‌دار بود. مقایسه میانگین (LSD) جنس تیغه‌ها در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹. اثر جنس تیغه‌ها بر میزان سایش کل آن‌ها (حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن آزمون (LSD) در سطح ۱٪ می‌باشد).

با توجه به شکل (۹)، کمترین سایش مربوط به جنس 100Cr6 با ۶۷/۳۵ گرم در ۲۴ ساعت کاری تیغه‌ها می‌باشد که نسبت به 16MnCr5 و Ck60 به ترتیب ۶۹ و ۷۱ گرم، سایش کمتری از خود نشان داد. تفاوت در مقدار سایش در جنس‌های مختلف با توجه به تفاوت در میزان سختی آن‌ها قابل توجیه می‌باشد؛ که با نتایج (Guan et al., 2021) در خصوص تاثیر مستقیم جنس تیغه بر سایش همسو بود. جدول (۵)، مقادیر میانگین سختی راکول (HRC) را برای جنس‌های مختلف تیغه و روش سخت کاری نشان می‌دهد.

جدول ۵. نتایج سختی سنجی

| روش سخت کاری | جنس تیغه‌ها | سختی راکول (HRC) |
|--------------|-------------|------------------|
| القایی       | 100Cr6      | ۶۲               |
|              | 16MnCr5     | ۶۱               |
|              | Ck60        | ۵۹               |
| حرارتی       | 100Cr6      | ۵۸               |
|              | 16MnCr5     | ۵۷               |
|              | Ck60        | ۵۴               |

همان‌طور که جدول (۵) نشان می‌دهد در کلیه حالت‌های سخت کاری، بیشترین مقدار سختی راکول HRC تیغه‌ها مربوط به جنس 100Cr6 و پس از آن 16MnCr5 و Ck60 قرار داشتند. مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۲۸۰۸، محدوده سختی HRC ۴۸-۵۸ برای لبه برش تیغه‌های دروگر و کمباین تعیین شده است (سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۳۶۶). نتایج جدول (۵) نشان داد که سختی تیغه‌های سخت کاری شده به روش حرارتی برای فولادهای 100Cr6، 16MnCr5 و Ck60 به ترتیب ۵۸، ۵۷ و ۵۴ HRC بوده و در محدوده استاندارد تیغه‌های دروگر و کمباین قرار دارد. در روش سخت کاری القایی، سختی‌های به دست آمده به ترتیب ۶۲، ۶۱ و ۵۹ HRC بود که اندکی بالاتر از حد بالای محدوده مذکور قرار گرفتند. با توجه به اینکه استاندارد ملی ایران شماره ۲۸۰۸ به طور اختصاصی برای تیغه‌های برش مورد استفاده در دروگرهای انگشتی دار و کمباین‌ها تدوین شده است، در این

پژوهش از آن به عنوان مرجع فنی برای مقایسه استفاده شد و به عنوان یک الزام استاندارد مستقیم برای تیغه‌های برداشت نیشکر نبود؛ در ادامه روند سایش تیغه‌ها در ساعت‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفت که در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بود و مقایسه میانگین (LSD) در جدول (۶)، نشان داده می‌شود. در کلیه زمان‌های اندازه‌گیری، کمترین سایش مربوط به جنس 100Cr6 می‌باشد.

جدول ۶. اثر جنس تیغه‌ها بر سایش آن‌ها بر حسب گرم

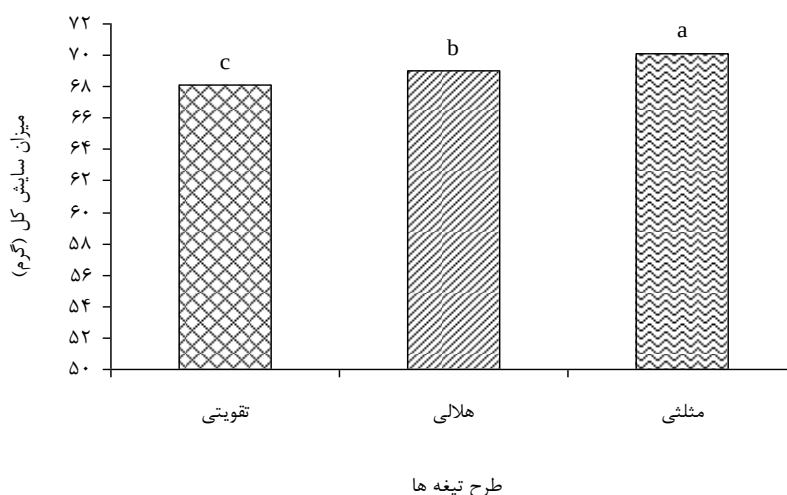
| زمان (ساعت) | 100Cr6                     | 16MnCr5                    | Ck60                       |
|-------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| ۴           | ۲/۰۱۰ ± ۰/۰۷۲ <sup>b</sup> | ۲/۰۲۳ ± ۰/۰۶۷ <sup>b</sup> | ۲/۱۷۹ ± ۰/۰۵۸ <sup>a</sup> |
| ۶           | ۲/۷۵۴ ± ۰/۰۶۳ <sup>b</sup> | ۲/۷۴۶ ± ۰/۰۹۱ <sup>b</sup> | ۲/۹۰۴ ± ۰/۰۶۱ <sup>a</sup> |
| ۸           | ۳/۳۷۹ ± ۰/۰۹۷ <sup>d</sup> | ۳/۵۱۹ ± ۰/۰۸۶ <sup>d</sup> | ۳/۶۹۵ ± ۰/۰۷۸ <sup>d</sup> |
| ۱۰          | ۴/۹۴۵ ± ۰/۰۷۷ <sup>b</sup> | ۵/۰۴۸ ± ۰/۰۷۸ <sup>b</sup> | ۵/۲۹۸ ± ۰/۰۸۴ <sup>a</sup> |
| ۱۲          | ۶/۰۶۸ ± ۰/۰۸۵ <sup>c</sup> | ۶/۲۷۶ ± ۰/۰۶۶ <sup>b</sup> | ۶/۵۵۳ ± ۰/۰۹۷ <sup>a</sup> |
| ۱۴          | ۷/۳۴۹ ± ۰/۰۸۱ <sup>b</sup> | ۷/۴۱۸ ± ۰/۰۹۲ <sup>b</sup> | ۷/۶۴۷ ± ۰/۰۸۷ <sup>a</sup> |
| ۱۸          | ۸/۳۶۷ ± ۰/۰۹۳ <sup>b</sup> | ۸/۷۹۴ ± ۰/۰۷۵ <sup>a</sup> | ۸/۸۳۱ ± ۰/۰۸۲ <sup>a</sup> |
| ۲۰          | ۷/۵۵۳ ± ۰/۰۸۵ <sup>c</sup> | ۸/۱۲۸ ± ۰/۰۸۴ <sup>b</sup> | ۸/۳۶۹ ± ۰/۰۸۱ <sup>a</sup> |
| ۲۲          | ۷/۲۵۳ ± ۰/۰۹۸ <sup>b</sup> | ۷/۴۱۴ ± ۰/۰۷۱ <sup>a</sup> | ۷/۳۶۳ ± ۰/۰۹۵ <sup>a</sup> |
| ۲۴          | ۷/۰۳۶ ± ۰/۰۹۱ <sup>b</sup> | ۷/۱۴۷ ± ۰/۰۷۷ <sup>b</sup> | ۷/۲۷۰ ± ۰/۰۹۳ <sup>a</sup> |

حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن آزمون (LSD) در سطح ۵٪ می‌باشد. (زمان‌های گزارش نشده عدم معنی‌داری است).

مطابق جدول (۶)، فولاد Ck60 در اکثر زمان‌ها دارای بالاترین میانگین و فولاد 100Cr6، کمترین سایش در شرایط آزمون را دارد. در تمام تیغه‌ها، سایش با گذشت زمان روند صعودی دارد و در ساعت ۱۸ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. برای Ck60، 16MnCr5 و 100Cr6 به ترتیب برابر است با ۸/۸۳، ۸/۷۹ و ۸/۳۶ گرم است پس از ساعت ۱۸، در تمامی فولادها کاهش نسبی در سایش مشاهده می‌شود که احتمالاً به دلیل تشکیل و پایداری لایه‌های اکسیدی و ذرات فشرده‌شده سایش بر روی سطح تماس، کاهش زبری سطوح درگیر و رسیدن فرایند سایش به حالت پایدار است. در ساعت ۲۴ سایش در محدوده ۷/۰۳ تا ۷/۲۷ تثبیت می‌گردد. در ساعت ۸ سایش هر سه فولاد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارد. ساعت ۱۲ تفکیک‌پذیری سایش به اوج می‌رسد.

#### اثر شکل هندسی تیغه

اثر طرح (شکل هندسی)، بر سایش تیغه‌ها در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بوده و نمودار مقایسه میانگین (LSD) در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰. اثر طرح تیغه‌ها بر میزان سایش کل آن‌ها (حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن آزمون (LSD) در سطح ۵٪ می‌باشد).

با توجه به شکل (۱۰)، کمترین سایش مربوط به تیغه تقویتی با ۶۸/۱۵ گرم در ۲۴ ساعت کاری می‌باشد که نسبت به طرح‌های هالالی و مثلثی به ترتیب ۱/۳٪ و ۲/۸٪ سایش کمتری از خود نشان داد و این امر به این دلیل می‌باشد که در تیغه‌های تقویتی علاوه بر عمل برش، عامل ضربه نیز به برش گیاه کمک می‌کند و در عمل بسیاری از ساقه‌های درگیر با تیغه بر اثر ضربه بریده شده و کمتر بر روی تیغه می‌لغزند و این باعث سایش کمتر لبه تیغه می‌گردد؛ در صورتی که در دو نوع تیغه دیگر با توجه به طرح تیغه‌ها عامل ضربه نقش کمتری در برش ساقه گیاه داشته و بیشتر ساقه‌ها با لغزش و ساییده شدن بر روی تیغه بریده می‌شوند. در ادامه، روند سایش طرح‌های مختلف تیغه در گذر زمان مورد مقایسه قرار گرفت که در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بود و مقایسه میانگین (LSD) در جدول (۷)، نشان داده می‌شود.

جدول ۷. سایش طرح‌های مختلف تیغه در گذر زمان برحسب (گرم)

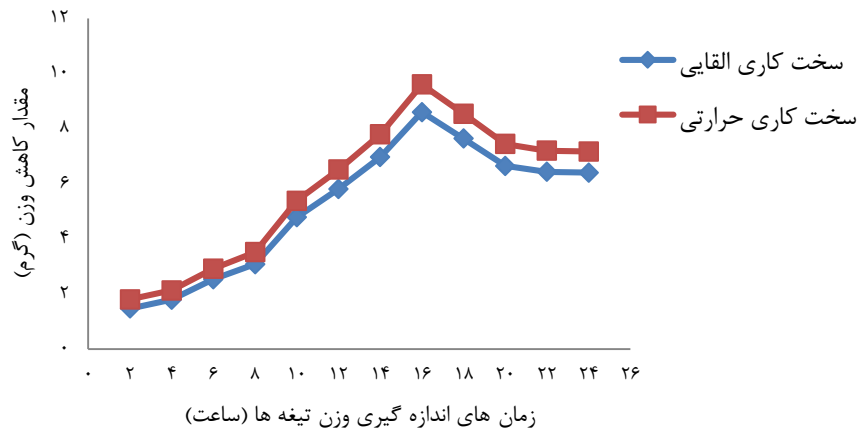
| زمان (ساعت) | تقویتی                  | مثلثی                   | هالالی                   |
|-------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| ۸           | ۳/۳۷۹±۰/۶۵ <sup>b</sup> | ۳/۶۵۹±۰/۶۱ <sup>a</sup> | ۳/۵۱۹±۰/۵۷ <sup>ab</sup> |
| ۱۰          | ۵/۲۰۳±۰/۷۳ <sup>a</sup> | ۵/۰۵۲±۰/۶۵ <sup>b</sup> | ۵/۰۳۵±۰/۸۱ <sup>b</sup>  |
| ۱۲          | ۶/۳۳۱±۰/۶۸ <sup>a</sup> | ۶/۳۸۰±۰/۹۰ <sup>a</sup> | ۶/۱۸۵±۰/۹۲ <sup>b</sup>  |
| ۱۶          | ۸/۷۳۲±۰/۷۷ <sup>b</sup> | ۹/۱۰۳±۰/۸۱ <sup>a</sup> | ۸/۹۱۵±۰/۷۸ <sup>ab</sup> |
| ۱۸          | ۸/۳۱۸±۰/۶۹ <sup>b</sup> | ۸/۷۹۶±۰/۷۶ <sup>a</sup> | ۸/۸۷۸±۰/۶۷ <sup>a</sup>  |
| ۲۲          | ۷/۳۰۷±۰/۷۵ <sup>b</sup> | ۷/۴۱۳±۰/۶۹ <sup>a</sup> | ۷/۳۰۹±۰/۷۱ <sup>b</sup>  |
| ۲۴          | ۷/۳۰۶±۰/۹۷ <sup>b</sup> | ۷/۳۱۴±۰/۶۸ <sup>a</sup> | ۷/۱۳۲±۰/۷۹ <sup>b</sup>  |

حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن آزمون (LSD) در سطح ۵٪ می‌باشد. (زمان‌های گزارش نشده عدم معنی‌داری در آن زمان‌ها می‌باشد).

نتایج جدول (۷)، نشان می‌دهد که میزان سایش هر سه طرح تیغه با افزایش زمان آزمون، ابتدا روندی افزایشی داشته و سپس پس از رسیدن به بیشترین مقدار، کاهش یافته و به حالت نسبتاً پایدار رسیده است. در ساعت ۱۸، سایش تیغه‌ها به بیشترین مقدار خود رسید. در این زمان، تیغه‌های هلالی و مثلی از نظر آماری اختلاف معنی‌داری نداشتند، اما هر دو به‌طور معنی‌داری سایش بیشتری نسبت به تیغه تقویتی نشان دادند. بیشترین مقدار سایش مربوط به تیغه هلالی (۸/۸۷۸) و کمترین آن مربوط به تیغه تقویتی (۸/۳۱۸) بود. پس از ساعت ۱۸، در هر سه طرح تیغه کاهش نسبی در میزان سایش مشاهده شد، به‌گونه‌ای که در ساعات ۲۲ و ۲۴ مقادیر سایش در محدوده ۷/۰۳۶ تا ۷/۴۱۳ تثبیت شد. این رفتار احتمالاً ناشی از رسیدن فرآیند سایش به مرحله پایدار، هموار شدن سطوح تماس، کاهش زبری اولیه و تشکیل لایه‌های محافظ حاصل از اکسیدها و ذرات سایش بر روی سطح تماس است که موجب کاهش نرخ سایش می‌شوند. به‌طور کلی، تیغه تقویتی در اغلب زمان‌های آزمون کمترین میزان سایش را نشان داد که بیانگر مقاومت سایشی بالاتر این طرح هندسی است. در مقابل، تیغه مثلی در بیشتر زمان‌ها بیشترین سایش را تجربه کرد و تیغه هلالی از نظر عملکرد سایشی در جایگاهی بین دو طرح دیگر قرار گرفت. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل هندسی تیغه می‌تواند توزیع تنش، شرایط تماس و نحوه خروج ذرات ساینده را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه مقاومت به سایش تیغه را به‌طور معنی‌داری تغییر دهد؛ که با نتایج سایر محققان در خصوص تاثیرپذیری سایش از شکل هندسی تیغه مطابقت داشت (Qiu et al., 2021; Moura et al., 2021).

### اثر روش سخت‌کاری

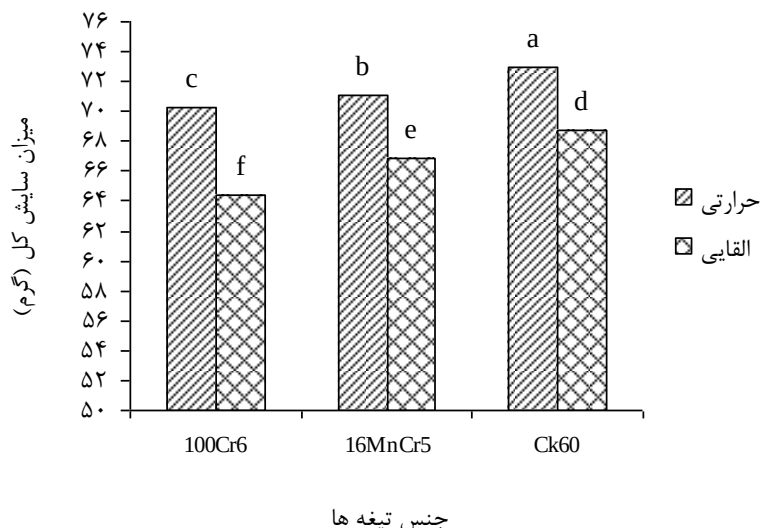
نتایج نشان داد که روش سخت‌کاری در همه ساعت‌های تعیین شده اندازه‌گیری وزن تیغه‌ها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود و کمترین سایش نیز مربوط به سخت‌کاری القایی می‌باشد. در شکل (۱۱) نمودار کاهش وزن تیغه‌ها برای دو روش سخت‌کاری حرارتی و القایی بر حسب زمان کارکرد نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۱)، روند کاهش وزن تیغه‌ها را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در ابتدا که تیغه‌ها دارای لبه‌ی برنده و تیز می‌باشند ساقه‌های نیشکر در حین درگیری با لبه تیز تیغه‌ها بریده شده و به مقدار کمی روی لبه تیغه لغزیده می‌شوند و در نتیجه سایش تا ساعت ۸ با شیب ملایمی در حال افزایش است. در مرحله دوم، با کند شدن لبه‌ی تیغه‌ها مقدار سایش رفته رفته افزایش یافته تا جایی که لبه‌ی نازک تیغه‌ها کاملاً ساییده شود. بنابراین از ساعت ۸ تا ۱۶، سایش تیغه‌ها با شیب تندتری افزایش می‌یابد. در نهایت، بعد از ساییده شدن کامل لبه‌ی تیغه‌ها به علت اینکه قطع شدن ساقه‌ها فقط ناشی از ضربه وارده به ساقه می‌باشد و عملاً برشی اتفاق نمی‌افتد. بنابراین از ساعت ۱۶ به بعد سایش تیغه‌ها کاهشی است. نتایج با یافته‌های محققین در خصوص اثرگذاری روش سخت‌کاری بر سایش مطابقت داشت (Khuengpukheiw et al., 2024; Kawsringam & Chaijit, 2025). کاهش میزان سایش در تیغه‌های با سختی بالاتر، یافته متالورژیکی جدید نیست. اهمیت آن در نحوه انعکاس این رابطه شناخته‌شده در ترکیب‌های مختلف جنس، هندسه و روش سخت‌کاری و تأثیر آن بر عملکرد واقعی تیغه‌های برش ماشین برداشت نیشکر است.



شکل ۱۱. نمودار نرخ کاهش وزن تیغه‌ها طی هر دو ساعت کارکرد برای جنس 100Cr6

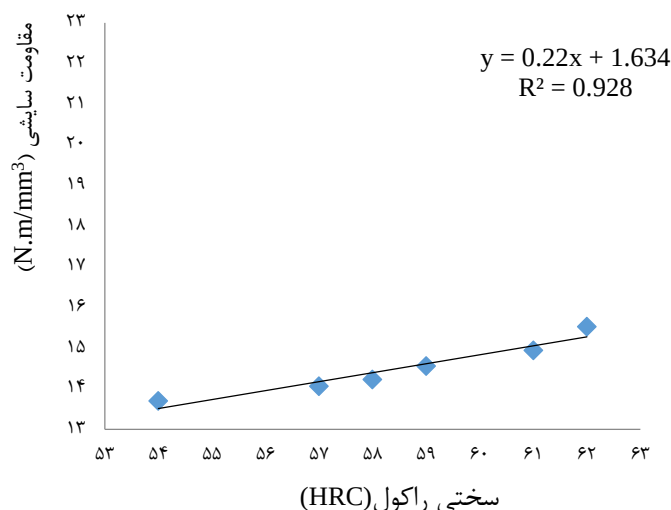
### اثر متقابل جنس تیغه‌ها و روش سخت کاری

اثر متقابل جنس تیغه‌ها و روش سخت کاری بر سایش تیغه‌ها در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود. معنی‌دار بودن این اثر متقابل در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که عملکرد یک روش سخت کاری مشخص، به جنس فولاد مورد استفاده وابسته است. بنابراین، نتایج را نمی‌توان صرفاً بر اساس برتری کلی سختی بیشتر تفسیر کرد؛ بلکه پاسخ سایشی تیغه تحت تأثیر ترکیب مشخص جنس فولاد و روش سخت کاری قرار گرفت. این یافته، اطلاعات کاربردی لازم برای انتخاب ترکیب مناسب جنس و روش سخت کاری تیغه‌های برش ماشین برداشت نیشکر را فراهم می‌کند. نمودار مقایسه میانگین (LSD) جنس‌های مختلف و دو روش سخت کاری در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲. اثر متقابل جنس تیغه‌ها و روش سخت کاری بر میزان سایش کل (حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن آزمون (LSD) در سطح ۱٪ می‌باشد).

نتایج شکل (۱۲) نشان می‌دهد که جنس 100Cr6 و سخت‌کاری القایی با ۶۴/۴۱ گرم سایش در کل زمان ۲۴ ساعت کاری تیغه‌ها، کمترین سایش را به خود اختصاص داده است که با توجه به جدول ۵، بیشترین سختی را با مقدار HRC ۶۲ نیز به خود اختصاص داده است. بین سختی و مقاومت سایشی رابطه رگرسیون خطی مطابق شکل ۱۳ برقرار است که ضریب تبیین آن  $R^2 = 0.92$  بدست آمد. محققان دیگری نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند (مهدی‌پور، ۱۳۸۸).



شکل ۱۳. رابطه سختی و مقاومت سایشی

مطابق شکل (۱۳)، رابطه (۱) بین سختی و مقاومت سایشی برقرار است که با نتایج آزمایش‌های پژوهشگران دیگر یکسان می‌باشد (García-Vanegas et al., 2025; Białobrzaska, 2025).

$$y = 0.22x + 1.634$$

(۱)

که در آن  $y$  مقاومت سایشی ( $N.m/mm^3$ ) و  $x$  سختی راکول (HRC) است.

### اثر متقابل طرح تیغه و روش سخت‌کاری

عدم معنی‌داری اثر متقابل "طرح تیغه × روش سخت‌کاری" در تجزیه واریانس کلی نشان داد که برهم‌کنش این دو عامل در میانگین کل دوره آزمایش معنی‌دار نبود. با این حال در روش سخت‌کاری حرارتی، طرح مثلی در بسیاری از زمان‌ها بیشترین میزان سایش را نشان داد. به طوری که در ساعت ۱۶ مقدار سایش تیغه مثلی ۹/۷۵۱ گرم بود که نسبت به طرح هلالی (۹/۱۰۷) و تقویتی (۸/۷۴۲) گرم بیشتر بود. در مجموع، نتایج نشان داد که بهترین ترکیب از نظر مقاومت سایشی، مربوط به تیغه تقویتی با سخت‌کاری القایی بوده است، زیرا این تیمار در بیشتر زمان‌های آزمایش کمترین میزان سایش را نشان داد. همچنین، تیغه مثلی در شرایط سخت‌کاری حرارتی عموماً بیشترین مقدار سایش را داشت و از نظر مقاومت سایشی عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سایر طرح‌ها نشان داد. این نتیجه اهمیت همزمان انتخاب جنس، روش عملیات حرارتی و هندسه لبه برشی را در طراحی تیغه‌های مقاوم به سایش نشان می‌دهد.

## اثر متقابل جنس و طرح تیغه‌ها

عدم معنی‌داری اثر متقابل جنس تیغه و طرح تیغه در کل دوره آزمایش نشان داد که برتری یک جنس خاص از تیغه برای کاهش سایش، به‌طور ثابت در همه طرح‌های هندسی مشاهده نمی‌شود. با این حال فولاد Ck60 در اغلب زمان‌های آزمایش، به‌ویژه در ترکیب با طرح مثلی، بیشترین میزان سایش را نشان داد و ضعیف‌ترین عملکرد را از نظر مقاومت سایشی داشت. در مقابل، فولاد 100Cr6، به‌خصوص در ترکیب با طرح تقویتی، در بیشتر زمان‌ها کمترین میزان سایش را ثبت کرد و بهترین عملکرد را از نظر مقاومت سایشی ارائه داد.

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش بیانگر ارائه یک سازوکار متالورژیکی جدید برای افزایش مقاومت به سایش فولادها نیست، بلکه شواهد تجربی کاربردی در خصوص انتخاب جنس، هندسه و روش سخت‌کاری مناسب برای تیغه‌های برش ماشین برداشت نیشکر فراهم می‌کند. نتایج نشان داد که اثر روش سخت‌کاری، جنس تیغه، طرح هندسی تیغه و اثر متقابل روش سخت‌کاری و جنس تیغه بر روی سایش تیغه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد. در جنس تیغه‌ها، کمترین سایش مربوط به جنس 100Cr6 با  $67/35$  گرم در  $24$  ساعت کاری آن‌ها می‌باشد. که نسبت به Ck60 و 16MnCr5 به ترتیب  $2/5\%$  و  $5/2\%$  سایش کمتری از خود نشان داد. با توجه به طرح تیغه‌ها کمترین سایش مربوط به تیغه تقویتی با  $68/15$  گرم در  $24$  ساعت کاری آن‌ها می‌باشد. که نسبت طرح‌های هلالی و مثلی به ترتیب  $1/3\%$  و  $2/8\%$  سایش کمتری از خود نشان داد. نتایج نشان داد که جنس 100Cr6 و سخت‌کاری القایی با  $64/41$  گرم سایش در  $24$  ساعت کاری تیغه‌ها، کمترین سایش را به خود اختصاص داده است که با توجه نتایج سختی‌سنجی این ماده و روش سخت‌کاری القایی بیشترین سختی را نیز به خود اختصاص داده است. بین سختی و مقاومت سایشی رابطه رگرسیون خطی با ضریب تبیین  $0/93$  برقرار بود. بهترین حالت ممکن برای حل مشکل تیغه‌های برش ماشین‌های برداشت نیشکر طرح تقویتی با جنس 100Cr6 و روش سخت‌کاری القایی می‌باشد. نتایج حاصل می‌تواند برای انتخاب و طراحی تیغه‌های برداشت نیشکر در شرایط مشابه مورد استفاده قرار گیرد و تیغه ساخته شده با این مشخصات می‌تواند مشکل سائیده شدن تیغه‌های ماشین برداشت نیشکر را حل نماید.

## منابع

- اعلمی، مصطفی. (۱۳۸۶). اثر سه روش سخت‌کاری بر کاهش سایش تیغه خاک‌ورز برگردان‌دار. *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*. به راهنمایی مهدی کسرائی و محمد لغوی. شیراز: دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی.
- سازمان استاندارد ملی ایران. (۱۳۶۶). *تیغه‌های برش مورد استفاده در دروگرهای انگشتی و کمباین*. (استاندارد ملی ایران، شماره ۲۸۰۸).
- شریف نسب، هومن. (۱۳۷۵). روش سخت‌کاری تیغه دروگر و کمباین و طراحی دستگاه‌های انجام آن. *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*. به راهنمایی منصور بهروزی لار. کرج: دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.
- کسرائی، مهدی و صبور روح‌آقدم، علیرضا. (۱۳۸۳). مطالعه سایش در ابتدای تیغه گاواهن برگردان‌دار. *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی*. سال یازدهم. شماره چهارم. ص ۱۱۷-۱۲۳.
- کسرائی، مهدی و صبور روح‌آقدم، علیرضا. (۱۳۸۴). مطالعه فولاد ساده کربنی CK45 جهت استفاده ابزار خاک‌ورز. *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*. شماره پانزدهم. ص ۲۵-۱۹.
- گل‌عزار، محمد علی. (۱۳۸۲). *عملیات حرارتی و مهندسی سطح*. چاپ دوم. اصفهان. نشر ارکان اصفهان.
- مهدی‌پور، یاسر. (۱۳۸۸). مطالعه سایش در چهار نوع تیغه گاواهن برگردان‌دار. *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*. به راهنمایی مهدی کسرائی. شیراز: دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی.

## References

- Alami, M. (2007). *Effect of three hardening methods on reducing the wear of moldboard plow tillage blade* (MSc thesis. Supervised by Mehdi Kasraei and Mohammad Loghavi. Faculty of Agriculture, Shiraz University Shiraz: Iran). (In Persian).
- Iranian National Standards Organization (INSO). (1987). *Cutting blades used in finger-type reapers and combine harvesters*. (Iranian National Standard No. 2808) (In Persian).
- American Iron and Steel Institute (AISI). (1998). *Designation system for carbon and alloy steels*. Washington, DC: American Iron and Steel Institute.
- ASM International. (2017). *ASM handbook: Friction, lubrication, and wear technology* (Vol. 18). ASM International. ISBN electronic: 978-1-62708-192-4.
- Bayhan, Y. (2006). Reduction of wear via hardfacing of chisel ploughshare. *Tribology international*, 39(6), 570-574.
- Bernache, L., Tedesco-Oliveira, D., Oliveira, L. P. D., Corrêa, L. N., & Silva, R. P. D. (2020). Can basal cutting blade wear affect sugarcane regrowth?. *Engenharia Agricola*, 40(1), 53-60.
- Bhadeshia, H. K. D. H., & Honeycombe, R. W. K. (2024). *Steels: Structure, properties, and design*. Elsevier.
- Bhakat, A. K., Mishra, A. K., Mishra, N. S., & Jha, S. (2004). Metallurgical life cycle assessment through prediction of wear for agricultural grade steel. *Wear*, 257(3-4), 338-346.
- Białobrzaska, B. (2025). Prediction of Cast Steel Three-Body Abrasive Wear by Multivariate Analysis. *Wear*, 206501.
- Budinski, K. G. (2007). *Guide to friction, wear and erosion testing*. West Conshohocken, PA: ASTM international. 86-92
- Coronado, J. J., Caicedo, H. F., & Gómez, A. L. (2009). The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology international*, 42(5), 745-749.
- Deutsches Institut für Normung. (2006). *DIN EN 10083-1: Steels for quenching and tempering—Part 1: General technical delivery conditions*. Berlin, Germany: Beuth Verlag.
- European Committee for Standardization. (2019). *EN 10025-2: Hot rolled products of structural steels—Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*. Brussels, Belgium: CEN.
- Farag, M. M. (2020). *Materials and process selection for engineering design*. CRC press.
- García-Vanegas, L., Elías-Espinosa, M. C., López Perrusquia, N., Doño Ruiz, M. A., & Bastida-Escamilla, E. (2025). Effect of surface roughness, elastic modulus, and hardness on wear and friction in borided AISI M2 steel substrates. *Materials Research Express*, 12(10), 106401.
- Godwin, R. J. (2007). A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil and Tillage Research*, 97(2), 331-340.
- Golozar, M. 2003. *Heat treatment and surface engineering*. Second edition. Isfahan. Arkan Isfahan Publishing (in Persian).
- Guan, C., Fu, J., Cui, Z., Wang, S., Gao, Q., & Yang, Y. (2021). Evaluation of the tribological and anti-adhesive properties of different materials coated rotary tillage blades. *Soil and Tillage Research*, 209, 104933.
- Gupta, A. K., Jesudas, D. M., Das, P. K., & Basu, K. (2004). Performance evaluation of different types of steel for duck foot sweep application. *Biosystems engineering*, 88(1), 63-74.
- Hironaka, Y., & Shigemori, K. (2026). Improvement in the abrasion resistance of cutter blades by laser processing. *Discover Mechanical Engineering*, 5(1), 35.
- Horvat, Z., Filipovic, D., Kosutic, S., & Emert, R. (2008). Reduction of mouldboard plough share wear by a combination technique of hardfacing. *Tribology International*, 41(8), 778-782.
- Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: friction and wear of engineering materials*. Butterworth-heinemann.
- Karoonboonyanan, S., Salokhe, V. M., & Niranatlumpong, P. (2007). Wear resistance of thermally sprayed rotary tiller blades. *Wear*, 263(1-6), 604-608.
- Kasraee, M.; & Sabour Rooh Aghdam, A. R. (2004). Investigation on Plane Carbon Steel “CK45” for Using in Tillage Tools. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 5 (19), 19-25. (In Persian).

- Kasraee, M.; & Sabour Rooh Aghdam, A. R. (2005). A Study of abrasive wear near the edge of a moldboard plow share. *Agric. Sci. Natur. Resour.*, 11(4), 117-123. (In Persian).
- Kawsringam, R., & Chaijit, S. (2025). Optimizing Nickel-Cobalt Electrodeposition for Sustainable Agricultural Equipment: Wear Resistance Enhancement through Multi-Response Optimization. *Engineering Journal*, 29(11), 65-78.
- Khuengpukheiw, R., Wisitsoraat, A., & Saikaew, C. (2024). Effect of spraying time on mechanical and tribological performances of HVOF-sprayed WC-Co and WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>Ni coatings on AISI 1095 steel. *World Journal of Engineering*, 21(3), 578-587.
- Lau, K. H., Mei, D., Yeung, C. F., & Man, H. C. (2000). Wear characteristics and mechanisms of a thin edge cutting blade. *Journal of Materials Processing Technology*, 102(1-3), 203-207.
- Liu, J., Chen, Y., & Kushwaha, R. L. (2010). Effect of tillage speed and straw length on soil and straw movement by a sweep. *Soil and Tillage Research*, 109(1), 9-17.
- Luo, D. Y., Liu, C., Wei, T., Wang, C., Ma, H., & Jiang, S. (2025). Microstructure and performance of laser cladding 17-4PH-xTiC coatings on harvester blades. *Plos one*, 20(11), e0336947.
- Malvajerdi, A. S. (2023). Wear and coating of tillage tools: A review. *Heliyon*, 9(6).
- Mehdipour, Y. (2009). *Study of wear in four types of plough blades with flanges*. (MSc thesis. Supervised by Mehdi Kasraei. Shiraz: Shiraz University, Faculty of Agriculture). (In Persian).
- Mo, H., Li, S., Zhou, J., Zeng, B., He, G., & Qiu, C. (2022). Simulation and experimental investigations on the sugarcane cutting mechanism and effects of influence factors on the cutting quality of small sugarcane harvesters under vibration excitations. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(1), 6929776.
- Moura, M. D. S., Carpes, A., & Grudtner, G. H. (2021). Acan speed, attack angle and cutting force, affect the quality of sugarcane harvest?. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 15(3), 469-483.
- Owsiak, Z. (1997). Wear of symmetrical wedge-shaped tillage tools. *Soil and Tillage Research*, 43(3-4), 295-308.
- Paulo, T. J. V; Battistuzzi, M. M; Carpes M. F.A; Pereira, L.K; Lustosa, S.R; Finatto, T; Okla, M. K; AbdElgawad, H. 2023. Continuous and Impact Cutting in Mechanized Sugarcane Harvest: Quality, Losses and Impurities. *Agriculture*, 13(7). DOI:10.3390/agriculture13071329.
- Pérez-Reyes, R. A., Daquinta-Gradaille, L. A., Bonilla-Rocha, J. D., Recarey-Morfa, C. A., Pérez-Olmo, C. B., & Gómez-Bravo, J. E. (2018). Performance of the base-cutter blades in the sugarcane harvester machines Case-IH 7000. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(3).
- Pérez-Reyes, R. A., Gradaille, L. A. D., Rocha, J. D. B., Morfa, C. A. R., Numa, A. S., & Bravo, J. E. G. (2022). Numerical Model for Sugarcane Base Cutting. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(2).
- Qian, J., Ma, S., Xu, Y., Li, W., HUO, P., & LI, W. (2023). Design and test of sliding shear combined sugarcane basecutter. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 39(10), 37-47.
- Qiu, M., Meng, Y., Li, Y., & Shen, X. (2021). Sugarcane stem cut quality investigated by finite element simulation and experiment. *Biosystems engineering*, 206, 135-149.
- Rencis, J. J., & Grandin, H. T. (2021). *A General Structured Procedure to Solve Machine Design Problems*. In 2021 ASEE Virtual Annual Conference Content Access.
- Rodríguez, J. S., Duran, J. F., Aguilar, Y., Alcázar, G. P., & Zambrano, O. A. (2020). Failure analysis in sugar cane cutter base blades. *Engineering Failure Analysis*, 112, 104503.
- Sharifnasab, H. (1996). *Hardening method of harvester and combine blades and design of equipment for performing the hardening process*. (MSc thesis. Supervised by Behrouzi Lar, M. Faculty of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Karaj: Iran). (In Persian)
- Singh, J., Chatha, S. S., & Sidhu, B. S. (2020). Effect of alloying elements in Fe-based hardfacings to improve the abrasive wear behavior of ploughshares. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(23), 4737-4750.
- Singh, J., Chatha, S. S., & Sidhu, B. S. (2021). Performance evaluation of surface overlaid EN-42 steel for tillage applications. *Journal of Tribology*, 143(3), 031202.
- Society of Automotive Engineers (SAE). (2020). *G92600: Silicon Steel*.
- Syafriandi, S., Putra, B. S., Fachruddin, & Fitra, A. (2021, January). *Cutting sugarcane stumps with serrated cylindrical blades on ratoon cane*. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental*

- Science* (Vol. 644, No. 1, Article 012081). IOP Publishing. Banda Aceh, Indonesia.
- Totten, G. E. (Ed.). (2006). *Steel heat treatment: Metallurgy and technologies*. CRC Press.
- Turapov, B., Kalacska, G., & Szakal, Z. (2024). A comparative study of wear resistance and bending characteristics of cutting blades and knife guards for combine harvesters. *Agricultural Research & Technology*, 28(2). <https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2024.28.556405>
- Xiao, H., Yang, D., Ou, Y., Zhang, J., Hu, Y., & Ma, L. (2025). Laser texturing to improve wear resistance of 65Mn steel rotary tiller blades: effects of scanning speed. *Lubricants*, 13(5), 224.
- Zhang, J., & Kushwaha, R. L. (1995). Wear and draft of cultivator sweeps with hardened edges. *Canadian Agricultural Engineering*, 37(1), 41-47.
- Zhang, X., Yu, S., Hu, X., & Zhang, L. (2024). Study on rotary tillage cutting simulations and energy consumption predictions of sandy ground soil in a Xinjiang cotton field. *Computers and Electronics in Agriculture*, 217, 108646.
- Zhou, B., Ma, S., Li, W., Peng, C., & Li, W. (2024). Study on sugarcane chopping and damage mechanism during harvesting of sugarcane chopper harvester. *Biosystems Engineering*, 243, 1-12.
- Zou, Z., Li, J., Wang, X., Tang, C., & Chen, X. (2025). Wear Resistance Enhancement of Rotary Tillage Blades Through Structural Optimization and Surface Strengthening. *Materials*, 18(21), 5006.

دانشگاه صنعتی امیرکبیر