

Experimental Investigation and Finite Element Analysis of Fatigue Stress in Sugarcane Harvester Blades

V. Kahrizi¹, R. Hematian², E. Zarei Shahamat^{3*}

1- Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina, Hamadan, Iran

2- Iran Khodro Engine R&D and Manufacturing Co. (IPCo), Tehran, Iran

3- Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

(* - Corresponding Author Email: EbrahimZareishahamat@asnrukh.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.99733.1510>

Introduction

Fatigue life prediction is one of the most important considerations in machine design because it directly determines the durability and operational lifespan of mechanical components. In agricultural machinery, components are frequently exposed to harsh working environments and are often operated far from maintenance and repair facilities. Consequently, inaccurate estimation of fatigue life can lead to premature component failure, increased maintenance costs, interruptions in field operations, and significant crop losses. Despite notable improvements in both the quantity and quality of agricultural machinery manufacturing in Iran, limited attention has been devoted to the production of sugarcane harvester blades. As a result, domestically manufactured blades still do not satisfy the required quality standards. Considering the crucial role of these blades and the influence of fatigue performance under local operating conditions, including soil characteristics, moisture content, stone interference, and harvesting practices, improving blade quality is essential for reducing harvest losses. Therefore, this study investigates the fatigue behaviour of sugarcane harvester blades using finite element analysis implemented in Abaqus. Since these components are subjected to cyclic loading, their design must ensure adequate structural integrity and reliable fatigue performance throughout their service life.

Materials and Methods

Three steel grades, namely Ck60, 100Cr6, and 16MnCr5, were selected for blade fabrication because of their favourable mechanical properties, excellent hardenability, suitability for heat treatment, domestic availability, reasonable cost, and local production. Two hardening techniques, induction hardening and conventional thermal hardening, were applied to each material. The blades were manufactured according to the standard dimensions of commercial sugarcane harvesters, with a length of 28 cm and a width of 9 cm. Four different blade geometries were evaluated: conventional (old), reinforced, triangular, and crescent. Metallographic analysis was conducted to characterise the microstructure, grain size, grain boundaries, constituent phases, and chemical composition of the selected alloys. A three-dimensional model of each blade was then developed, and appropriate loading and boundary conditions were defined. Stress distribution was analysed using the finite element method, while fatigue performance was evaluated using FEMFAT software.

Results and Discussion

Metallographic examination revealed that induction-hardened 100Cr6 steel exhibited the finest grain boundaries and the most uniform microstructure among the investigated materials, which was consistent with the higher measured hardness of the induction-hardened 100Cr6 steel. Fatigue simulations were performed for four blade geometries and demonstrated that the triangular blade experienced the lowest maximum and minimum stress values. This improved stress response was attributed to more efficient load distribution, a higher moment of inertia in critical regions, reduced stress concentration, and smoother load transfer at the connection area, resulting in a more uniform stress field. Moreover, the triangular blade produced the lowest stress amplitude because its geometry effectively distributed cyclic loads and minimised stress concentrations. This characteristic is particularly advantageous from a fatigue standpoint, as stress amplitude is a primary factor governing fatigue crack initiation and propagation. In contrast, the reinforced blade exhibited the lowest mean stress owing to the presence of reinforcing ribs or increased thickness, which enhanced structural stiffness and redistributed the applied load. This reduced the overall tensile and compressive stress levels, thereby decreasing the average stress.

Conclusion

The fatigue assessment demonstrated that most of the investigated blade configurations exhibited minimal fatigue damage together with relatively high safety factors, indicating satisfactory structural performance under the simulated operating conditions. The highest stress concentration was observed at the blade attachment point to the harvester rotary plate, identifying it as the most critical location. Among the evaluated designs, the triangular blade provided the lowest calculated fatigue damage, with a damage value of 4.37×10^{-19} and a safety factor of 4.22. In addition, the results confirmed that the blade manufactured from 100Cr6 steel and treated by induction hardening achieved the highest measured hardness among the investigated material-hardening combinations.

Keywords: Blade, Fatigue Stress, Finite Element Method, Sugarcane

بررسی تجربی و تحلیل تنش خستگی تیغه‌های ماشین برداشت نیشکر به روش اجزای محدود

وحید کهریزی^۱، رسول همتیان^۲، ابراهیم زارعی شهامت^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۵

چکیده

قطعات ماشین‌های کشاورزی اغلب در محیط‌هایی کار می‌کنند که در معرض بارهای پیوسته و سیکلی، خستگی، خوردگی، سایش، ضربه، حرارت و غیره قرار دارند از این رو لازم است جنس این قطعات به گونه‌ای انتخاب شود تا در این شرایط آسیب نبینند و وظیفه پیش‌بینی شده را به خوبی انجام دهند. تیغه باید به بارهای نوسانی مقاوم باشد تا موجب شکستگی ناشی از خستگی نشود، از این رو برای ساخت تیغه، از سه نوع فولاد (100Cr6, 16MnCr5, Ck60) که با دو روش سخت‌کاری (القایی و حرارتی) تقویت شده بود، استفاده شد و عملکرد آن‌ها با هم مورد مقایسه قرار گرفت. با استفاده از نرم‌افزارهای (CAE)، تیغه‌ها طراحی شده و مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج تحلیل تنش خستگی نشان داد که اکثر نقاط تیغه‌ها دارای آسیب خستگی پایین و ضریب اطمینان بالایی هستند. در همه تیغه‌ها بحرانی‌ترین نقطه در محل اتصال به صفحه دوار ماشین برداشت بود. طرح تیغه مثلی با جنس 100Cr6 و روش سخت‌کاری القایی با میزان آسیب 10^{-9} تا $4/37 \times 10^{-9}$ و ضریب اطمینان ۴/۲۲ عملکرد بهتری نسبت به سایر انواع مورد آزمایش داشت.

واژه‌های کلیدی: تیغه، تنش خستگی، روش اجزای محدود، نیشکر

مقدمه

با توجه به نوع بار وارده به آن، انواع مختلفی دارد که عبارتند از خستگی کم‌چرخه^۴، خستگی پرچرخه^۵، خستگی حرارتی^۶، خستگی سطح جسم^۷، خستگی در بارهای ضربه‌ای^۸، خستگی محیط‌های خورنده^۹ و خستگی لایه‌ای شدن یا سایشی^{۱۰} (Paixão, Voltarelli, de Oliveira, Bernache, & da Silva, 2019).

در خستگی پرچرخه، نیروی سیکلی، نسبتاً کوچک بوده و کرنش‌های سیکلی پدیدآمده در جسم، پایین‌تر از محدوده الاستیک می‌باشد و عمر قطعه بیشتر است. در خستگی کم‌چرخه، بارهای سیکلی نسبتاً بالا بوده و کرنش‌های ایجادشده در هر سیکل به صورت پلاستیک بوده و عمر قطعه کم می‌باشد. محدوده گذر از خستگی کم‌چرخه به خستگی پرچرخه عموماً در محدوده سیکلی ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ سیکل می‌باشد (Budynas & Nisbett, 2019).

عوامل مختلفی روی عمر خستگی تأثیر می‌گذارد به طوری که تغییر کمی در تنش باعث تأثیر چند برابری در عمر قطعه می‌شود. این عوامل عبارتند از: ۱- تنش متوسط، ۲- نوع مواد، ۳- عملیات

تعیین عمر خستگی، متغیر اساسی در طراحی ماشین است که تأثیر به‌سزایی در عمر قطعات دارد (Budynas & Nisbett, 2019). درخصوص قطعات درگیر در ماشین‌های کشاورزی، به دلیل شرایط سنگین کاری و دوری از مراکز تعمیر و نگهداری، اگر این مهم به‌درستی پیش‌بینی نشود؛ سبب شکست اجزاء و قطعات ماشین شده و موجب تحمیل هزینه‌های به‌موقع نبودن انجام عملیات و تلفات محصول می‌گردد (Hunt, 2001).

خستگی شامل سه مرحله: جوانه‌زنی، رشد ترک و شکست نهایی قطعه می‌باشد، بنابراین قطعاتی که تحت تأثیر این نوع بارگذاری واقع می‌شوند باید طوری طراحی شده باشند که بتوان صحت و عدم شکست ناشی از خستگی آن‌ها را برای مدت معینی تضمین نمود. شکست ناشی از خستگی تقریباً همیشه از ناپیوستگی‌های موضعی مانند شکاف، ترک یا سایر نواحی تمرکز تنش آغاز می‌گردد. خستگی

- 4- Low Cycle Fatigue
- 5- High Cycle Fatigue
- 6- Thermal Fatigue
- 7- Surface Fatigue
- 8- Impact Fatigue
- 9- Corrosion Fatigue
- 10- Fretting Fatigue

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان و مدیر هنرستان زنده یاد ادهم مظفری، کامیاران، ایران

۲- مرکز تحقیق طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، خوزستان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: EbrahimZareishahamat@asnrukh.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.99733.1510>

حرارتی، ۴- جوشکاری، ۵- ناپیوستگی هندسی، ۶- شرایط سطحی، ۷- اثر اندازه مقطع، ۸- تنش‌های پسماند سطحی، ۹- دمای کارکرد، ۱۰- خوردگی، ۱۱- سرعت کاری و ۱۲- نحوه تغییر تنش با زمان (Bannantine, Comer, & Handrock, 1990).

تعیین عمر و ضریب اطمینان خستگی، دو متغیر مهم در طراحی خستگی می‌باشد، که روش‌های متعددی برای به‌دست آوردن آن‌ها ارائه شده است. روش‌هایی که برای پیش‌بینی عمر استفاده می‌شود عبارتند از: ۱- بررسی تاریخچه تنش، ۲- بررسی تاریخچه کرنش، ۳- بررسی تاریخچه تنش‌های محل شیار، ۴- بررسی تاریخچه کرنش‌های شیار، ۵- بررسی تغییرات شدت تمرکز تنش و انتشار ترک، ۶- روش‌های انرژی (Bhatti, 2005).

مطالعات جامعی در زمینه روش تعیین عمر خستگی انجام شده است؛ گام‌های اصلی تعیین عمر شامل: اندازه‌گیری سیگنال بار عملیاتی، پردازش سیگنال و استخراج طیف بار، مدل‌سازی سه‌بعدی هندسه تیغه، تحلیل استاتیکی المان محدود، تحلیل خستگی، اعتبارسنجی و بهینه‌سازی پارامتریک بود (Logan, 2012; Rao, 2010; Zhang et al., 2023; Meng, Li, Liu, 2020; Tang, & Yuan, 2005). به بررسی و تحلیل خستگی المان‌های برگ‌زدایی از ساقه نیشکر پرداختند. برای تحلیل اثر پارامترهای نصب و عیوب ناشی از فرایند قالب‌گیری تزریقی از شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده شد. برای تحلیل خستگی در شرایط عملیاتی مختلف، مدل محاسباتی المان محدود ارائه گردید و در نهایت عمر خستگی پیش‌بینی شد و اعتبارسنجی تجربی صورت گرفت. ما (Ma 2002) در پژوهشی به تحلیل خستگی تیغه‌های برگ‌زدای دروگرهای نیشگر، تحت تنش‌های دوره‌ای خستگی پرداختند. برای درک مکانیزم برگ‌زدایی از آزمون‌های استاتیک و دینامیک استفاده شد. طراحی آزمایش‌های مجازی با استفاده از نرم‌افزار انسیس و روش‌های طراحی متغیر صورت گرفت. معناداری متغیرهای مورد بررسی و رگرسیون انجام شد. عمر مفید تیغه‌های برگ‌زدا با استفاده از منحنی (تنش-

سیکل شکست ماده) پیش‌بینی شد. در مطالعاتی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی فرایند خردکردن ساقه نیشکر با استفاده از روش المان محدود بررسی شد. پارامترهای مورد مطالعه شامل: سرعت چرخش درام‌ها، طول همپوشانی تیغه‌ها و زاویه اریب بود. برای شبیه‌سازی دینامیکی فرایند برش از نرم‌افزار انسیس استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تنش فون مایزر بیشینه برای ساقه نیشکر ۱۶/۸۷ مگاپاسکال، تیغه بالایی ۱۰۶/۰۸ مگاپاسکال و تیغه پایینی ۱۱۵/۷۲ مگاپاسکال است. نتایج اعتبارسنجی بین شبیه‌سازی و آزمایش عملی، خطای کمتر از ۲۰٪ را نشان داد (Biswas et al., 2004; Magalhães et al., 2024; Stephens, Fatemi, Stephens, & Fuchs, 2001; Wulandana, 2024; Xie, Wang, Cheng, & Shen, 2018).

در تحلیل خرابی تیغه‌های برش پایه، سه مکانیزم اصلی خرابی شناسایی شد که شامل: ۱- سایش؛ بعد از ۲۴ ساعت کار مداوم، تیغه‌ها دچار کاهش وزن بین ۳۹/۸ تا ۹۱/۵ گرم شدند. پس از ۴۸ ساعت کار مداوم و برخورد تیغه با ذرات سیلیس و اکسیدهای موجود در خاک و الیاف سخت نیشکر صورت می‌گیرد و منجر به کاهش تدریجی جرم و از دست رفتن کامل توانایی برش می‌شود. نتایج آزمون میدانی سایش تیغه در جدول ۱ نشان داده شده است ۲- خستگی مکانیکی که به دلیل بارهای دوره‌ای ناشی از برش ضربه‌ای و چرخشی ایجاد شده و منجر به بروز ترک‌های خستگی و شکست ناگهانی می‌شود؛ با تحلیل منحنی (تنش-سیکل شکست ماده) و طیف بار واقعی آن می‌توان عمر تیغه را پیش‌بینی نمود. ۳- شکست که به علت ضربات سنگین یا نقص در عملیات حرارتی اتفاق می‌افتد و سبب شکست ناگهانی، بدون تغییر شکل پلاستیک قابل توجه می‌شود و برای جلوگیری از آن راهکارهایی از قبیل بهینه‌سازی ریزساختار با نرمالایز کردن در (۷۰۰°C) قابل اجراست (Cassia, da Silva, Paixão, Bertonha, & Cavichioli, 2014; Gdoutos & Konsta-Gdoutos, 2024; Pérez-Reyes et al., 2018; Suresh, 2004).

جدول ۱- نتایج آزمون میدانی سایش تیغه دروگر CASE-IH 7000

Table 1- Field test results for CASE-IH 7000 harvester blade wear

وضعیت Status	کاهش وزن متوسط Average weight loss (gr)	زمان کار Working time (h)
ناحیه نشست اولیه Initial settling region	35-50	4
سایش حالت ماندگار Steady state wear	45-55	8
سایش حالت ماندگار Steady state wear	50-65	14
شروع سایش کاتاستروفیک Catastrophic wear begins	60-102	20
از دست رفتن هندسه لبه برش Loss of cutting edge geometry	67-111	24

عمر تیغه از شرایط عملیاتی محلی نظیر: نوع و رطوبت خاک، وجود سنگ، نحوه عملیات برداشت و رابطه مستقیم آن با کاهش ضایعات این محصول ارزشمند به نظر می‌رسد لزوم توجه به تولید با کیفیت این قطعه در حال حاضر از اولویت‌ها است.

هدف از این تحقیق تحلیل تنش خستگی تیغه‌های ماشین برداشت نیشکر به روش اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس می‌باشد. بنابراین قطعاتی که تحت تأثیر این نوع بارگذاری واقع می‌شوند باید طوری طراحی شده باشند که بتوان صحت و عدم شکست ناشی از خستگی آن‌ها را برای مدت معینی تضمین نمود.

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 (AUSTOFT)، بسته می‌شد، در گام اول طول و عرض آن‌ها، مطابق با تیغه‌های استاندارد این ماشین‌ها انتخاب شد. گام دوم، طراحی شکل هندسی تیغه‌ها بود که برش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تیغه‌ها در چهار مدل مختلف طراحی، ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفتند. طرح اول همان مدل مرسوم کنونی است که در پژوهش حاضر با نام طرح قدیمی معرفی می‌گردد. تیغه‌های قدیمی بر روی این ماشین‌ها دارای طول ۲۸ سانتی‌متر، عرض ۹ سانتی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر هستند (شکل ۱).

سریکانتنایک (Srikanthnaik, 2024) به مرور جامعی در زمینه طراحی و توسعه تیغه‌های برش روتواتور با تأکید بر روش‌های مدرن (FEA (Finite و CAD (Computer-Aided Design Element Analysis) برای تحلیل استاتیکی و خستگی پرداخت. علی‌رغم تمرکز بر ادوات خاک‌ورزی، این روش‌ها مستقیماً برای تیغه‌های برداشت نیشکر قابل تعمیم هستند. جنس‌های مورد استفاده برای تیغه‌ها شامل: فولادهای کربن بالا، فولاد بور، فولاد کروم بود. بهینه‌سازی هندسی تیغه‌ها از طریق اصلاح شعاع انحنا، برای کاهش تمرکز تنش انجام شد.

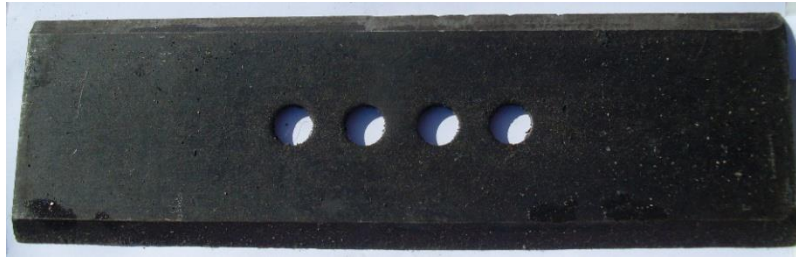
هائو و همکاران (Hao et al., 2024) در پژوهشی به بررسی به سه نوع سایش اصلی (سایشی، خستگی، خوردگی) در تیغه‌های ادوات خاک‌ورزی پرداختند. برای افزایش مقاومت سطحی: افزودن پوشش‌های مقاوم به سایش، عملیات حرارتی سطح و طراحی بهینه تیغه برای کاهش سایش را پیشنهاد کردند. اگرچه تمرکز بر ادوات خاک‌ورزی است، اصول مطرح‌شده برای تیغه‌های برداشت نیشکر قابل تعمیم می‌باشد. مواد رایج مورد استفاده در تیغه‌های دروگر نیشکر به همراه ویژگی‌های مکانیکی و کاربردهای آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

در کشور ما علی‌رغم پیشرفت‌های مختلفی که در تولید کمی و کیفی ماشین‌ها و ابزارهای کشاورزی صورت گرفته است تاکنون نگاه جدی به تولید تیغه‌های ماشین برداشت نیشکر احساس نشده است و تیغه‌های تولیدشده داخل نیز به‌هیچ‌وجه از نظر کیفی قابل قبول نیستند. بنابراین با توجه به اهمیت این قطعه و تأثیرپذیری مستقیم خستگی و

جدول ۲- مواد رایج مورد استفاده در تیغه‌های دروگر نیشکر به همراه ویژگی‌های مکانیکی و کاربردهای آن

Table 2- Common materials used in sugarcane harvester blades along with their mechanical properties and applications

نوع ماده Type of material	سختی (HRC) Hardness	استحکام کششی (MPa) Tensile strength	نقطه تسلیم (MPa) Yield point	کاربرد Application	منبع Reference
65 Mn	42-58	800-1'040	-	تیغه‌های عمومی General blades تیغه‌های برش پایه CASE-IH	(Standardization Administration of the People's Republic of China, 2007)
SAE9260	-	710	260	Basic cutting blades- CASE-IH	(SAE ¹ International, 2000)
فولاد نرمالایز Normalised steel (700 °C)	70	1'183	953	ساخت تیغه با چقرمگی بالا Making blades with high toughness	(Fadare, Fadara, & Akanbi, 2011)
28MnSb	42-48	-	-	ساخت تیغه انعطاف‌پذیر Flexible blade construction	(SAE International, 2000)



شکل ۱- طرح کنونی تیغه‌های برش ماشین برداشت نیشکر

Fig. 1. Current design of the sugarcane harvester's cutting blades

طرح دوم تقریباً شبیه به طرح مرسوم تیغه‌ها بود که در کشت و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این تفاوت که با حذف سنگ‌زنی شدن تیغه‌های قبلی از ناحیه مرکزی بود (شکل ۲).



b



a

شکل ۲- (الف) ناحیه شکست تیغه‌های مرسوم قدیمی و (ب) طرح تیغه تقویت‌شده

Fig. 2. (a) Failure zone of conventional outdated blades, and (b) reinforced blade design

در طرح سوم (تیغه‌های مثلثی)، 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 چهارم (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).



شکل ۳- تیغه‌های مثلثی

Fig. 3. Triangular blades



شکل ۴- تیغه‌های هلالی

Fig. 4. Crescent blades

ساخت تیغه‌ها

با توجه به ویژگی‌های مناسب مکانیکی، سختی‌پذیری بالا و عملیات حرارتی، موجود بودن در بازار ایران، قیمت مناسب و تولید در

داخل کشور، در این پژوهش از دو روش سخت کاری (القایی و حرارتی) بر روی سه نوع فولاد 16MnCr5، 100Cr6، Ck60 برای ساخت تیغه‌ها استفاده شد. استانداردهای مختلف فولادهای مورد اشاره در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- استاندارد مختلف فولادها

Table 3- Different steel standards

نام تجاری Brand Name	شماره مواد Material number	اروپا Europe (European Committee for Standardization, 2019)	ایالات متحده آمریکا United States of America (Classifications and designations, 1998)	آلمان Germany (Deutsches Institut für Normung, 2006)
OCR4ES	1.3505	100Cr6	5210	100Cr6
EC80	1.7131	16MnCr5	5115,5117	16MnCr5
Ck60	1.1221	-	1060	Ck60

ماشین کاری تیغه‌ها

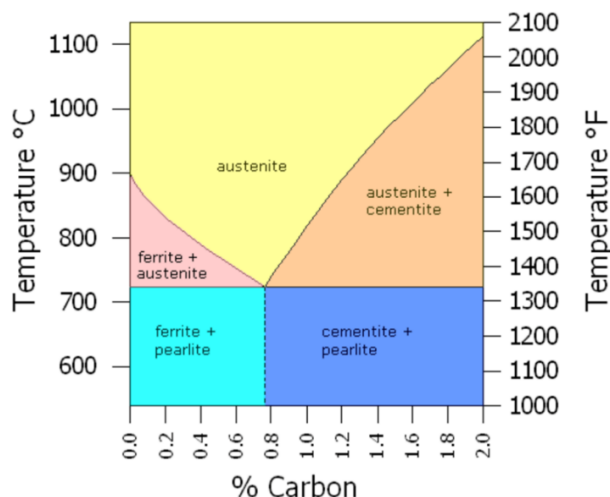
نقشه دوبعدی تیغه‌ها توسط نرم‌افزار SolidWorks آماده شد. سپس برای تهیه نمونه اولیه تیغه‌ها، تسمه‌های خریداری شده توسط اره لنگ به تکه‌های ۲۸ سانتی متری تقسیم شد. با استفاده از دستگاه فرز و مطابق نقشه، طرح‌های تیغه‌ها بر روی تکه‌های فلز ماشین کاری شد. محل نصب تیغه‌ها بر روی ماشین، توسط دریل میزی سوراخ کاری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

عملیات سخت کاری بر روی تیغه‌های ساخته شده، به دو روش حرارتی و القایی انجام شد.

روش سخت کاری حرارتی

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

سخت کاری تیغه‌ها



شکل ۵- درصد کربن موجود در آهن و دما

Fig. 5. The percentage of carbon in iron and temperature Dossett and Totten (2014)

شده و برای کوانچ کردن و رسیدن به ریزساختار مارتنزیتی آماده می‌باشند. 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

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 آستینیتی



شکل ۷- بیرون آوردن نمونه‌ها
Fig. 7. Removing the samples



شکل ۸- حرکت دادن یک نمونه در آب برای سرد کردن آن
Fig. 8. Moving a sample in the water to cool it down

سخت‌کاری القایی

قسمت دیگری از نمونه‌ها باید تحت فرایند سخت‌کاری القایی قرار می‌گرفتند. اساس این فرایند بر قرار گرفتن یک هادی درون یک سیم‌پیچ موسوم به القاگر استوار است (Santos, de Freitas, Li, 2003). با عبور جریان متناوب از القاگر، میدان مغناطیسی در اطراف آن پدید می‌آید که با تغییر عبور خطوط قوای این میدان از جسم هادی، در این جسم جریان فوکو تولید می‌شود (Totten, 2017). این جریان که در سطح قطعه متمرکز شده است به دلیل وجود مقاومت الکتریکی ماده در آن حرارت ایجاد می‌نماید. این حرارت سپس به لایه‌های سرد داخل قطعه نیز منتقل می‌گردد. ضخامتی از ماده که عمده مقدار جریان القایی از آن عبور می‌کند به عمق مرجع یا ضخامت پوسته معروف است و با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه است (Schijve, 2001):

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu f}} \quad (1)$$

که در آن d عمق مرجع بر حسب سانتی‌متر، ρ مقاومت الکتریکی

به ۸۷۰ درجه رسید؛ سپس به مدت ۳۰ دقیقه نمونه‌ها در این دما قرار گرفت (Paulo Testa et al., 2023; Rodríguez, Duran, 2020).
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 سخت‌کاری
Fig. 6. Hardening furnace

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).

به‌منظور سرد شدن سریع و یکنواخت، نمونه‌ها با سرعت در آب حرکت داده شدند (شکل ۸).

برای گرفتن تنش‌های داخلی و ایجاد چقرمگی در نمونه‌ها عمل تمپر شدن انجام شد تا قطعه ضربه‌پذیر گردد. این عمل بلافاصله بعد از کوانچ کردن انجام شد. برای این کار مجدداً نمونه‌ها در داخل کوره قرار گرفت. دمای تمپر شدن پایین‌تر از دمای مرحله قبل بود. در این عملیات نمونه‌ها برای مدت ۲ ساعت در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند سپس از کوره خارج شدند و در هوای محیط خنک شدند (Pérez-Reyes et al., 2018).

مدت صیقل کاری لازم بود نمود را با گرد آلومین معلق در آب آغشته کرد. عملیات سنباده زنی و پولیش با دستگاه سنباده زنی دو قلو ساخت کشور آلمان شرکت بهلر^۲ صورت گرفت (شکل ۹).



شکل ۹- دستگاه سنباده زنی

Fig. 9. Sanding machine

۲- اچ^۳ کردن: در بیشتر مواقع برای مشاهده ساختار فلزات در زیر میکروسکوپ نوری، بایستی این مرحله انجام شود. اچ کردن عبارت است از خوردگی سطح فلز به وسیله یک مایع خورنده که معمولاً نوعی اسید است. هنگام اچ کردن مناطق پر انرژی سطح نظیر مرز دانه ها خورده شده و دانه بندی قطعه آشکار می گردد. همچنین دانه ها و فازهای مختلف ماده با شدت های مختلفی خورده شده و این خود موجب تشخیص آن ها از یکدیگر می گردد. برای انجام عملیات اچ کردن نمونه ها در محلول اسیدی با ۳٪ نایتال^۴ و ۹۷٪ متانول^۵ غوطه ور شد و بلافاصله از محلول بیرون آورده شده و با آب مقطر شستشو و خشک شد.

۳- مطالعه میکروسکوپی: ساختار نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ مدل BX51M شرکت الیمپوس^۶ ساخت کشور ژاپن مورد ارزیابی قرار گرفت. تصاویر مشاهده شده از ساختار مواد با استفاده از سیستم عکس برداری مستندسازی شد. لازم به ذکر است که آزمایش های سختی سنجی و متالوگرافی در محل دانشگاه تربیت مدرس مواد صورت گرفت.

سختی سنجی

پس از تهیه همه نمونه ها، میزان سختی آن ها با استفاده از دستگاه سختی سنجی در محیط آزمایشگاه اندازه گیری شد. دستگاه آزمون سختی سنجی مورد استفاده برای سختی سنجی مدل D1A Testor

ماده بر حسب اهم- سانتی متر، μ نفوذپذیری متوسط مغناطیسی ماده بدون واحد، μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی ماده در خلا و f فرکانس میدان مغناطیسی سیم پیچ بر حسب هرتز است. (Voltarelli, Paixão, Zerbato, da Silva, & Gazzola, 2018). علاوه بر فرکانس میدان مغناطیسی، توان جریان عبور کرده از سیم پیچ، زمان توقف نمونه در میدان القایی، شکل سیم پیچ و ساختار اولیه زمینه فولاد از مهم ترین متغیرهای موجود در روش سخت کردن القایی می باشند. عملیات سخت کاری القایی با استفاده از دستگاه سخت کاری القایی عمودی GH Induction TVK-S1000 انجام شد. دستگاه دارای تغذیه سه فاز ۳۸۰V، جریان نامی ۱۱۰ A و توان نامی ۷۰kW بود. برای گرمایش تیغه ها، از یک سیم پیچ 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. تیغه های ساخته شده از فولاد 100Cr6 با ضخامت ۵ mm تحت عملیات آستنیته کردن القایی در دمای ۸۷۰°C قرار گرفتند پس از رسیدن تیغه به دمای تنظیم شده، نمونه ها به مدت ۲۰ s در این دما نگهداری و سپس بلافاصله تحت عملیات آب دهی قرار گرفتند. بعد از آن فرایند برگشت در دمای ۱۸۰°C به مدت ۲ ساعت انجام شد. شرایط عملیاتی، شامل فرکانس، فاصله القاگر از سطح تیغه، زمان گرمایش و دمای تنظیم شده، برای تمامی نمونه های تحت سخت کاری القایی یکسان نگه داشته شد.

متالوگرافی

هدف از مطالعه متالوگرافی تعیین ساختمان داخلی و بررسی آن از نظر دانه بندی، مرز دانه ها و فازهای تشکیل دهنده و در برخی موارد تعیین عناصر شیمیایی آلیاژها می باشد.

برای بررسی و مطالعه مقطع نمونه ها مراحل زیر طی شد:

۱- آماده سازی نمونه ها: در این مرحله تکه ای از تیغه ها با جنس ها و روش های سخت کاری مختلف با اره لنگ به عنوان نمونه جدا شد. عملیات سنباده زنی به ترتیب بر روی سنباده های ۶۰، ۱۰۰، ۲۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ صورت گرفت. سنباده شماره ۶۰ خشن ترین و ۱۵۰۰ نرم ترین آن ها بود و باید توجه کرد که وقتی در عملیات سنباده زنی از یک سنباده به سنباده بعدی تغییر می کرد نمونه ها باید به اندازه ۹۰ درجه چرخانده می شد تا خطوط حاصل از سنباده قبلی در مرحله بعد محو شود و هر بار خطوطی عمود بر خطوط قبلی ایجاد شود. در پایان پولیش مکانیکی بر روی یک دیسک چرخان که با نمک پوشانده شده بود و به آن یک ماده ساینده خیلی نرم (مانند اکسید آلومینیوم^۱) پاشیده شد، صورت گرفت. در تمام

4- HNO₃
5- CH₃OH
6- Olympus

1- Al₂O₃
2- Buehler
3- H

722 ساخت شرکت اینسترون ولپرت^۱ از کشور انگلستان بود (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- دستگاه سختی‌سنج
Fig. 10. Hardness testing machine

مدل‌سازی یا نرم‌افزارهای تحلیل‌گر دارای قابلیت مدل‌سازی نظیر Ansys یا Catia می‌باشد. پس از ساخت مدل هندسی، به صورت یک فایل IGS* که قابل خواندن برای نرم‌افزار المان‌بندی باشد ذخیره و وارد محیط نرم‌افزار می‌شود. در این تحقیق مدل هندسی تیغه‌های طراحی شده ساخته شده است.

المان‌بندی

نرم‌افزار HyperWork به دلیل توانایی‌های بالا در تغییر دستی المان‌بندی و ریز کردن المان‌ها در محل‌های مورد نیاز، مورد استفاده قرار گرفته است. عملیات صورت‌گرفته در این نرم‌افزار در محیط HyperMesh که شامل، المان‌بندی دو بعدی و اصلاح سطوح مدل در صورت وجود شکاف یا اشکالات دیگر در المان‌ها باشد، انجام می‌گیرد. نرم‌افزار این قابلیت را دارد که المان‌های نامناسب را شناسایی و معرفی کند. در قدم بعدی المان‌های دوبعدی به لحاظ اندازه و سایر شاخص‌ها کنترل و اصلاح شد. پس از ساخت صحیح المان‌های دوبعدی و حذف هرگونه لبه اضافی در آن، المان‌های سه‌بعدی به روش دستی یا خودکار تولید می‌شوند. این المان‌ها نیز به لحاظ کیفیت و نوع آن باید کنترل شوند. لازم به ذکر است که در ساخت مدل سه‌بعدی المان‌ها چگالی، اندازه و نوع المان‌ها بسیار مهم است که باید بر اساس نوع تحلیل مشخص گردند. با توجه به این که ویژگی‌های المان‌ها در تحلیل المان محدود تأثیر زیادی دارد، باید المان‌بندی با اندازه و انواع مختلف المان‌بندی انجام شود. به همین منظور بهترین حالت ممکن به لحاظ کمترین زمان حل و بهترین جواب حالت المان‌هایی با اندازه ۱/۵ mm و درجه ۲ انتخاب شد. همچنین تیغه‌ها به‌خاطر شکل منظم هندسی با المان‌های چهار وجهی (tetra) مطابق شکل ۱۱ المان‌بندی شدند. جدول ۴ تعداد و نوع المان‌ها را برای انواع تیغه‌ها نشان می‌دهد.

تعیین شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی و بارگذاری مدل اجزای محدود با توجه به شرایط واقعی عملکرد تیغه در ماشین برداشت نیشکر تعریف شد. اعمال شرایط مرزی مدل با استفاده از نرم‌افزار HyperMesh و مشخصات بارگذاری در نرم‌افزار Abaqus تعریف گردید. نیروی پیشینه برش وارد بر ساقه نیشکر، معادل ۳۸۰۰ N، از پایان‌نامه کارشناسی ارشد (Hemati, Najafi, & Tavakoli Hashjin, 2011) استخراج شد و در پژوهش حاضر به‌عنوان نیروی برش، به صورت توزیع‌شده در امتداد کل لبه برش تیغه اعمال گردید. این بار به صورت سیکل تناوبی در تحلیل خستگی اعمال شد.

تحلیل تنش به روش اجزای محدود

برای تحلیل تنش در ابتدا مدل سه‌بعدی (3D) تیغه‌ها تهیه شده و پس از اصلاح آن، مدل شبکه‌بندی گردید. در نهایت پس از به دست آوردن خواص مواد، در نرم‌افزار تحلیلی المان محدود شرایط مرزی اعمال شد.

روش اجزای محدود (FEM) با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی قدرتمند اجزای محدود انجام می‌گیرد. با استفاده از این روش تحلیل‌های بسیار پیچیده و محاسبات طاقت‌فرسا با دقت بالا، وقت و هزینه کمتری انجام‌پذیر می‌باشد. در این تحقیق فرایند دقیق تحلیل به کمک کامپیوتر (CAE) با در اختیار داشتن نرم‌افزارهای تحلیل تنش و خستگی انجام می‌گیرد. در این پژوهش از نرم‌افزارهای Solid Works، HyperWork، Abaqus و FEMFAT به ترتیب برای مدل‌سازی هندسی، المان‌بندی، تحلیل تنش و تحلیل خستگی طی یک پروسه CAE استفاده شد.

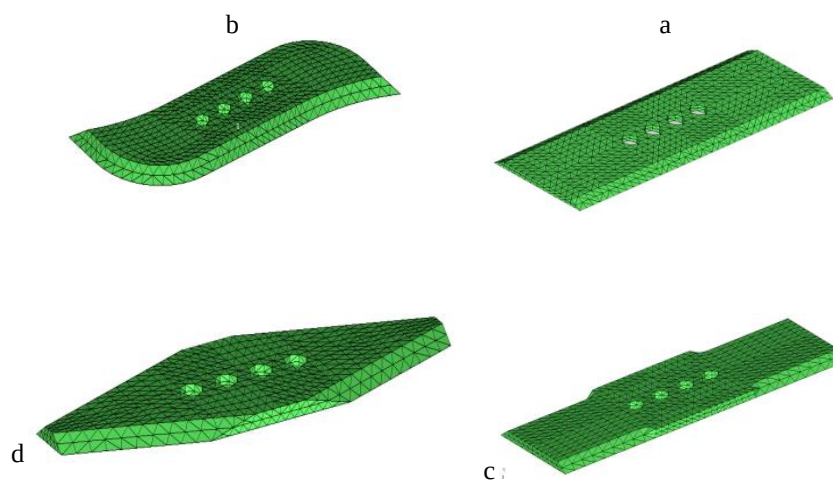
مدل‌سازی هندسی

مدل‌سازی قطعات در نرم‌افزار Solid Works انجام می‌گیرد. مدل‌سازی در این نرم‌افزار نسبتاً ساده‌تر از سایر نرم‌افزارهای

جدول ۴- تعداد و نوع المان‌ها و تعداد گره‌ها در هر یک از تیغه‌ها

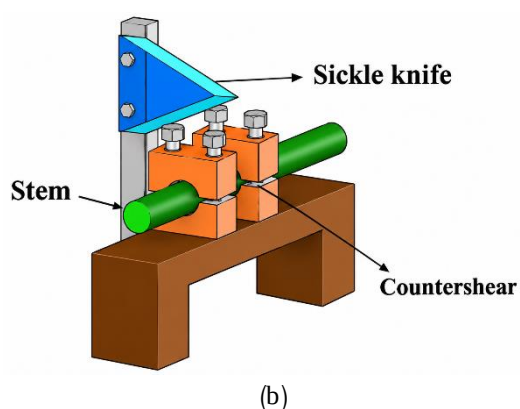
Table 4- Number and type of elements and number of nodes in each blade

تیغه	هلالی	مثلثی	تقویتی	قدیمی
Blade	Crescent	Triangular	Reinforced	Outdated
تعداد گره	5'251	5'288	6'301	8'177
Number of nodes				
تعداد المان	2'461	2'509	3'084	3'972
Number of elements				
نوع المان	HyperMesh	tetra10	tetra10	tetra10
Element type	Abaqus	C3D10	C3D10	C3D10



شکل ۱۱- نمایی از هندسه و شبکه‌بندی تیغه‌های مدل‌سازی شده: (الف) قدیمی، (ب) هلالی، (ج) تقویت شده و (د) مثلثی

Fig. 11. View of the geometry and meshing of the modelled blades: (a) outdated, (b) crescent, (c) reinforced, and (d) triangular

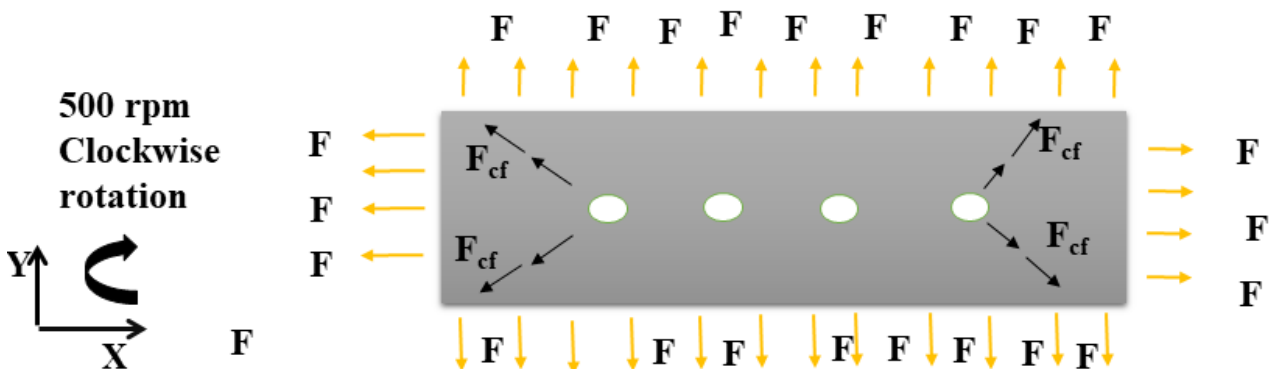


شکل ۱۲- (الف) دستگاه آزمون مواد و (ب) دستگاه اندازه‌گیری نیروی برشی ساقه نیشکر

Fig. 12. (a) Material testing machine, and (b) Sugarcane stem shear force measuring device (Hematian *et al.*, 2011)

۵۰۰ pm همچنین متناظر با فرکانس $8/33 \text{ Hz}$ است که در تعریف بارگذاری سیکل تناوبی تحلیل خستگی مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس، با فرض یک چرخه بارگذاری برای هر دور تیغه، در هر سیکل بارگذاری، نیروی برش بیشینه به صورت توزیع شده در امتداد یکی از چهار ضلع لبه برش اعمال شد و در سیکل‌های متوالی، این بارگذاری به ترتیب بین چهار ضلع لبه برش تکرار شد. بدین ترتیب، شرایط اتصال تیغه به روتور، اثر دورانی و نیروی ناشی از فرایند برش در مدل عددی لحاظ شده و تمامی هندسه‌های مورد بررسی تحت شرایط بارگذاری و مرزی یکسان تحلیل شدند. شماتیک شرایط مرزی و نحوه اعمال نیروی برشی و نیروی گریز از مرکز بر تیغه در تحلیل اجزای محدود در شکل ۱۳ ارائه شده است.

تیغه از طریق سوراخ‌های محل اتصال به بشقاب یا دیسک دوار متصل بوده و نواحی مربوط به این سوراخ‌ها در مدل اجزای محدود به عنوان نواحی تکیه‌گاهی و اعمال قیود تعریف شدند. با توجه به دوران تیغه همراه با دیسک، سرعت دورانی 500 rpm حول محور Z و در صفحه $X-Y$ در مدل عددی در نظر گرفته شد و اثر این دوران به صورت بار گریز از مرکز بر تیغه اعمال گردید. بنابراین، سوراخ‌های اتصال بیانگر محل انتقال قیود و اتصال تیغه به دیسک بوده و سرعت 500 rpm به عنوان پارامتر حرکتی مربوط به دوران، برای محاسبه و اعمال اثر گریز از مرکز در تحلیل اجزای محدود استفاده شد. بنابراین، در تحلیل اجزای محدود، هر دو مؤلفه اصلی بارگذاری شامل نیروی برش 3800 N و نیروی گریز از مرکز ناشی از دوران با سرعت 500 rpm به طور هم‌زمان در نظر گرفته شدند. سرعت دوران



شکل ۱۳- شماتیک شرایط مرزی و بارگذاری تیغه در تحلیل اجزای محدود؛ نیروی برش توزیع شده $F=3800 \text{ N}$ در امتداد کل محیط لبه برش،

نیروی گریز از مرکز ناشی از دوران با سرعت دوران 500 rpm ، دوران ساعت گرد در صفحه $(X-Y)$ حول محور (Z)

Fig. 13. Schematic of the boundary conditions, loading, and blade motion in the finite element analysis; distributed cutting force ($F = 3800 \text{ N}$) along the entire cutting edge, F_{cf} centrifugal force due to rotation at 500 rpm , clockwise rotation in the $(X-Y)$ plane about the (Z) -axis

تمام شرایط کاری ماشین. بنابراین این محدودیت در مقایسه آسیب خستگی هندسه‌های مختلف تیغه مانعی ایجاد نمی‌کند.

نتایج تحلیل تنش

نحوه تشکیل نتایج خروجی در هر Step با مشخص کردن فرکانس خوانش در کد تحلیل نرم‌افزار Abaqus مشخص می‌شود. نتایج خروجی به دو صورت *.odb و *.fil ساخته می‌شوند. فایل *.odb حاوی نتایج خروجی تنش بوده و می‌توان آن را در محیط CAE نرم‌افزار Abaqus به صورت کانتورهای رنگی، بردار، نمودار و یا فایل‌های متنی مشاهده کرد. همچنین فایل *.fil حاوی اطلاعات متنی تنش در المان‌ها و گرده‌ها است که از آن برای تحلیل خستگی توسط نرم‌افزار FEMFAT استفاده می‌شود.

لازم به توضیح است که در شکل ۱۳، به منظور ارائه شماتیکی از نحوه اعمال بار در تحلیل خستگی، نیروی برش بیشینه F به صورت توزیع شده و عمود بر هر یک از چهار ضلع لبه برش نمایش داده شده است. با این حال، در مدل بارگذاری، در هر سیکل نیروی برش بیشینه تنها به یکی از اضلاع اعمال شده و در سیکل‌های متوالی، این بارگذاری به ترتیب بین چهار ضلع لبه برش جابه‌جا می‌شود. همچنین، اثر گریز از مرکز ناشی از دوران تیغه با سرعت 500 rpm به صورت پیکان‌های شعاعی رو به خارج از محور دوران نشان داده شده است. همچنین تاریخچه زمانی واقعی نیروی برش در شرایط کاری ماشین برداشت نیشکر در دسترس نبود. با این حال، هدف اصلی این پژوهش، مقایسه رفتار و مقاومت خستگی هندسه‌های مختلف تیغه تحت یک شرایط بارگذاری یکسان بود، نه تعیین عمر خستگی واقعی تیغه در

al., 2024; Pérez-Reyes, Daquinta-Gradaille, Bonilla-Rocha, Recarey-Morfa, & Pérez-Olmo, 2018; Rodríguez *et al.*, 2020; Varani, 2024

ارزیابی کمی سختی بر اساس نتایج آزمون سختی-سنجی راکول انجام شد. نتایج جدول ۵ نشان داد که سختی نمونه‌های سخت‌کاری شده به روش القایی برای فولادهای 100Cr6، 16MnCr5 و Ck60 به ترتیب برابر با ۶۲، ۶۱ و ۵۹ HRC بوده است، در حالی که این مقادیر برای نمونه‌های سخت‌کاری شده به روش حرارتی به ترتیب ۵۸، ۵۷ و ۵۴ HRC به دست آمد. بنابراین، برتری سختی نمونه‌های سخت‌کاری شده به روش القایی بر اساس نتایج کمی آزمون سختی-سنجی تأیید می‌شود و مشاهدات متالوگرافی صرفاً به عنوان شواهدی از تغییرات ریزساختاری در تفسیر این تفاوت‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. جدول ۵، مقادیر میانگین سختی راکول (HRC) را برای جنس‌های مختلف تیغه و روش سخت‌کاری نشان می‌دهد.

همان‌طور که جدول ۵ نشان می‌دهد در کلیه حالت‌های سخت‌کاری، بیشترین مقدار سختی راکول HRC تیغه‌ها مربوط به جنس 100Cr6 و پس از آن 16MnCr5 و Ck60 قرار داشتند. بنابراین، مشاهده ریزساختار به عنوان شاهد کیفی تغییرات ساختاری و نتایج سختی-سنجی به عنوان شاهد کمی افزایش سختی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج بررسی‌های کمی و کیفی نشان داد که تیغه با جنس 100Cr6 و روش سخت‌کاری القایی، نسبت به سایر جنس‌های تیغه، سختی بهتری داشت؛ لذا نتایج تحلیل سختی برای چهار شکل تیغه شامل: قدیمی، هلالی، تقویت‌شده و مثلی به کمک نرم‌افزار FEMFAT ارائه گردید. خواص مهندسی مواد تشکیل‌دهنده تیغه از جنس 100Cr6، در جدول ۶ نشان داده شده است.

ویژگی‌های خواص مواد در نرم‌افزار، بر اساس اطلاعات جداول ۵ و ۶ تکمیل شد. تغییرات تنش از محدوده تنش کمینه تا تنش بیشینه موجب خستگی می‌شود، بر همین اساس لازم است که پروفیل تنش‌های بیشینه و کمینه در طول چرخه‌کاری تیغه مشخص شده و سپس پروفیل تنش دامنه و میانگین تعیین گردد. به همین منظور تحلیل تنش برای بارگذاری بیشینه و کمینه در دو مرحله جداگانه در نرم‌افزار Abaqus انجام شد، تا تنش‌های بیشینه و کمینه مشخص گردند. در شکل ۱۵ مقادیر بیشینه و کمینه تنش فون میسر گزارش شده است. این شکل، بیانگر مقادیر بحرانی حاصل از کانتور تنش در نواحی مختلف تیغه می‌باشد و الزاماً در یک نقطه مکانی یکسان از تیغه رخ نمی‌دهند. بنابراین، این مقادیر صرفاً برای نشان دادن محدوده تنش‌های حاصل از بارگذاری در هر هندسه ارائه شده‌اند و مستقیماً برای محاسبه دامنه و تنش میانگین به کار نرفته‌اند.

تحلیل خستگی به روش اجزای محدود به کمک FEMFAT

تحلیل خستگی در نرم‌افزار FEM/FAT انجام شد. نتایج تحلیل تنش که توسط نرم‌افزار Abaqus انجام گرفته بود به صورت یک فایل قبل خولندن (فایل *.fil) وارد نرم‌افزار FEM/FAT شد. این فایل حاوی اطلاعات مولفه‌های تنش، تنش فون میسر، بیشینه و کمینه تنش در هر بازه مرحله بارگذاری و ساختار اجزای محدود مدل می‌باشد. تحلیل در این نرم‌افزار به صورت تک‌عضوی و فقط بر روی گره‌ها انجام شد. تنش‌های ناشی از بارگذاری به دو شکل تنش‌های حد پایین و حد بالا یا تنش دامنه و تنش میانگین بر حسب نوع تحلیل در نرم‌افزار آباکوس بازخوانی می‌شود. در صورتی که تنش‌ها به صورت حد بالا و پایین وارد شود، نرم‌افزار به طور خودکار آن‌ها را به تنش‌های دامنه و میانگین تبدیل می‌کند. خصوصیات مهندسی با استفاده از کدهای موجود در کتابخانه نرم‌افزار برای قطعه تعریف شد. تنظیم متغیرهای موثر بر تحلیل خستگی مانند کمینه و بیشینه دما، زبری سطح، اندازه، گردان دما، تنش متوسط، لایه سخت‌کاری شده و روش سخت‌کاری انجام گرفت. محدوده تنش متناظر با مقادیر کمینه و بیشینه حاصل از تحلیل اجزای محدود، برای ارزیابی عمر خستگی مورد استفاده قرار گرفت. نسبت تنش نیز از رابطه (۲) به دست آمد.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2)$$

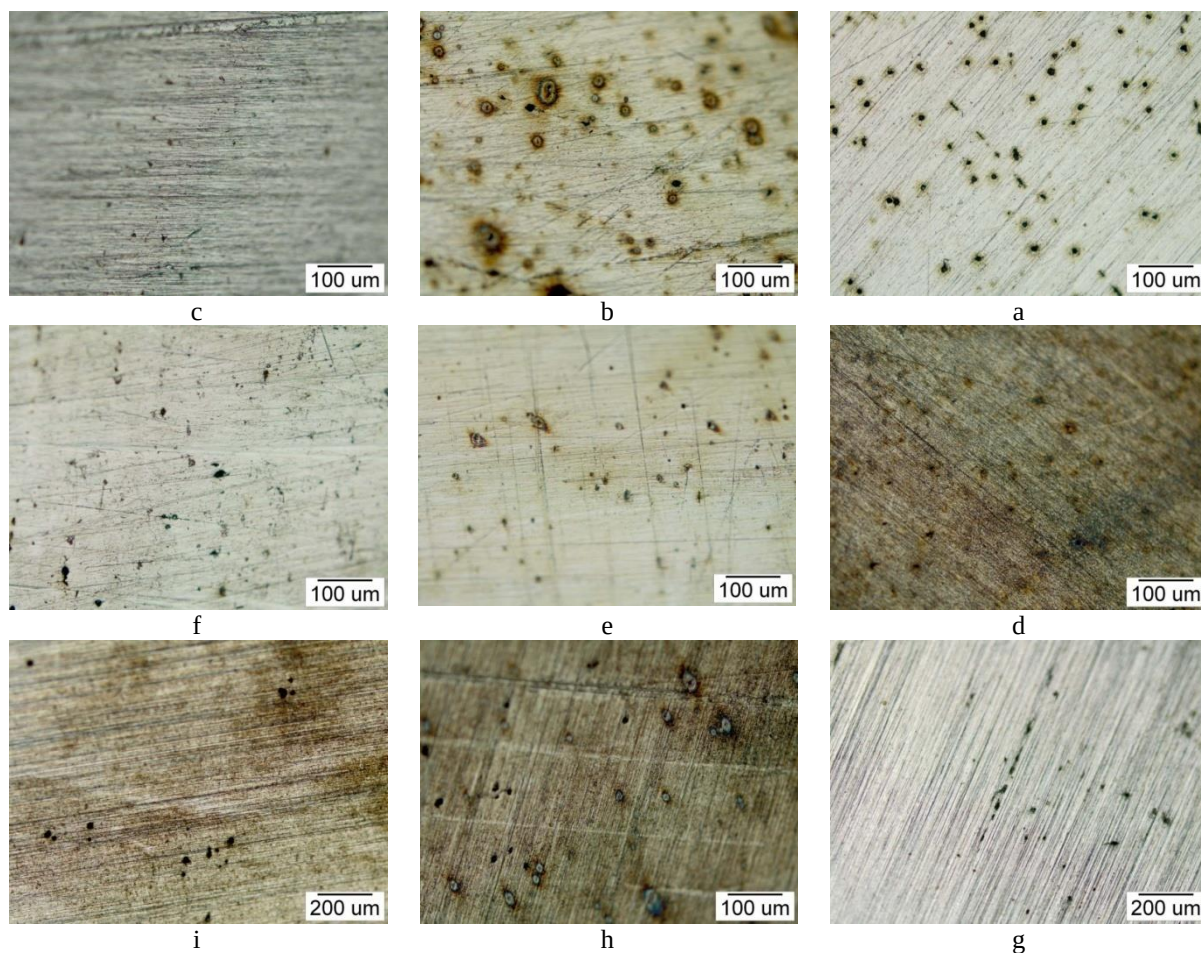
R = نسبت تنش، σ_{min} و σ_{max} به ترتیب تنش کمینه و تنش بیشینه می‌باشند.

نتایج و بحث

نتایج متالوگرافی تیغه‌ها

با جدا کردن قطعاتی از تیغه‌ها و انجام مراحل آماده‌سازی، نمونه‌ها زیر میکروسکوپ قرار داده شدند. که نتایج آن در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در شکل ۱۴ (الف، ب و ج) متالوگرافی نمونه‌های خام، در شکل ۱۴ (د، ه، و) متالوگرافی نمونه‌ها با سخت‌کاری القایی و در شکل ۱۴ (ز، ح، ط) نمونه‌ها با سخت‌کاری حرارتی نشان داده شده است.

نتایج متالوگرافی نشان داد که ریزساختار نمونه‌های سخت‌کاری شده به روش القایی در مقایسه با نمونه‌های سخت‌کاری شده به روش حرارتی دارای ویژگی‌های متفاوتی دارد. در سخت‌کاری القایی مرز دانه‌های کوچک‌تری نسبت به سخت‌کاری حرارتی تشکیل شده است. این تغییرات ریزساختاری می‌تواند در تفاوت خواص مکانیکی حاصل از دو روش سخت‌کاری نقش داشته باشد که با نتایج (Delgado-Bejarano, González-Sánchez, & García-Monsalve, 2024; Hao *et al.*, 2024; Magalhães *et*



شکل ۱۴- نتایج متالوگرافی نمونه‌های از تیغه‌ها با جنس‌های نشان داده شده و روش‌های سخت کاری متفاوت: الف) 100Cr6 خام، ب) 16MnCr5 خام، ج) Ck60 خام، د) 100Cr6 با سخت کاری القایی، ه) 16MnCr5 با سخت کاری القایی، و) Ck60 با سخت کاری القایی، ز) 100Cr6 با سخت کاری حرارتی، ح) 16MnCr5 با سخت کاری حرارتی، ط) Ck60 با سخت کاری حرارتی با بزرگ‌نمایی (×۱۰۰۰)

Fig. 14. Metallographic results of a sample of blades with the indicated materials and different hardening methods: (a) Raw 100Cr6, (b) Raw 16MnCr5, (c) Raw Ck60, (d) 100Cr6 with induction hardening, (e) 16MnCr5 with induction hardening, (f) Ck60 with induction hardening, (g) 100Cr6 with heat hardening, (h) 16MnCr5 with heat hardening, and (i) Ck60 with heat hardening at a magnification of ×1000

جدول ۵- نتایج سختی سنجی

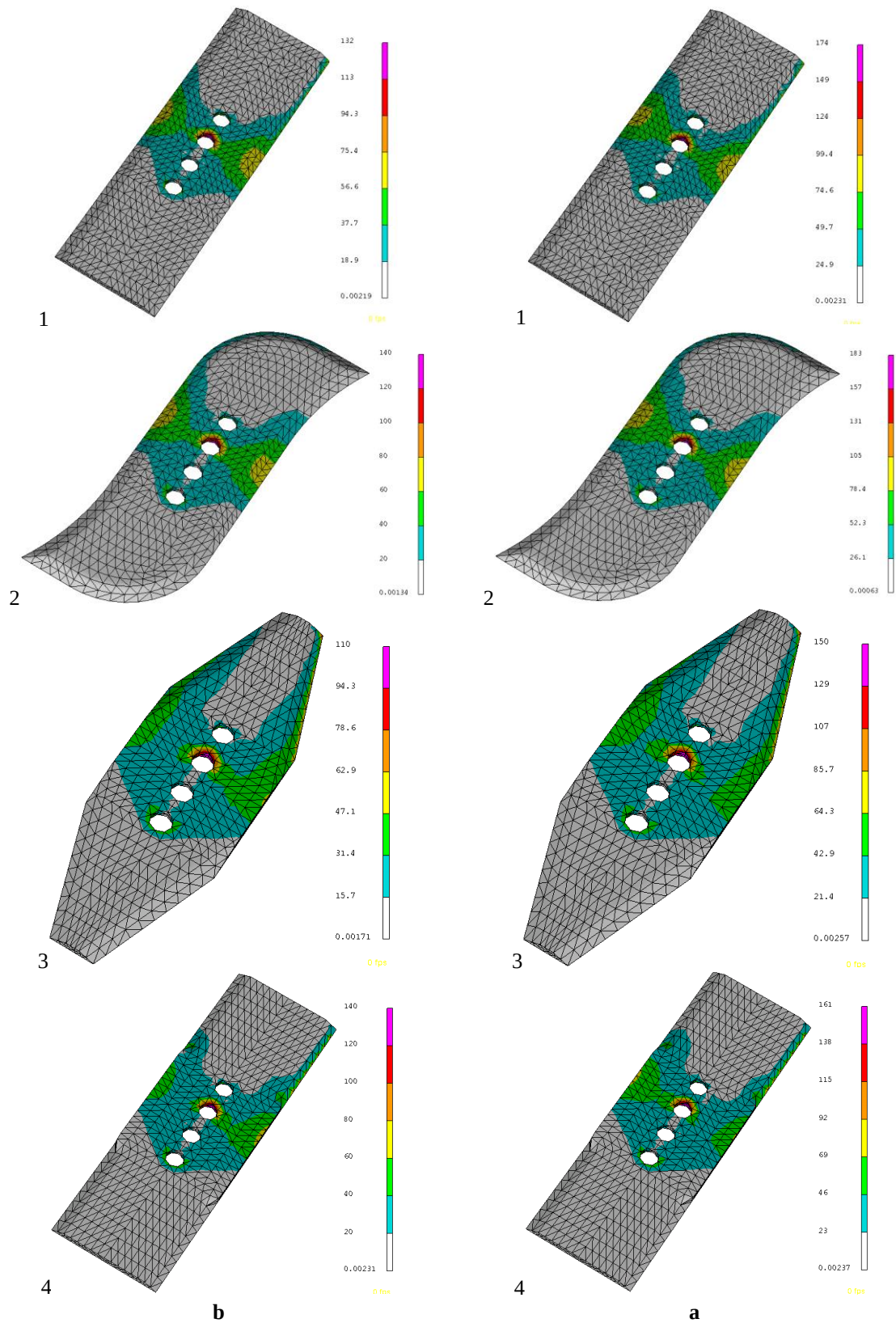
Table 5- Results of hardness measurements

روش سخت کاری	جنس تیغه‌ها	سختی راکول (HRC)
Hardening method	Blade material	Rockwell hardness (HRC)
القایی	100Cr6	62
Induction hardening	16MnCr5	61
	Ck60	59
	100Cr6	58
حرارتی	16MnCr5	57
	Ck60	54

جدول ۶- خواص مهندسی ماده تشکیل دهنده تیغه

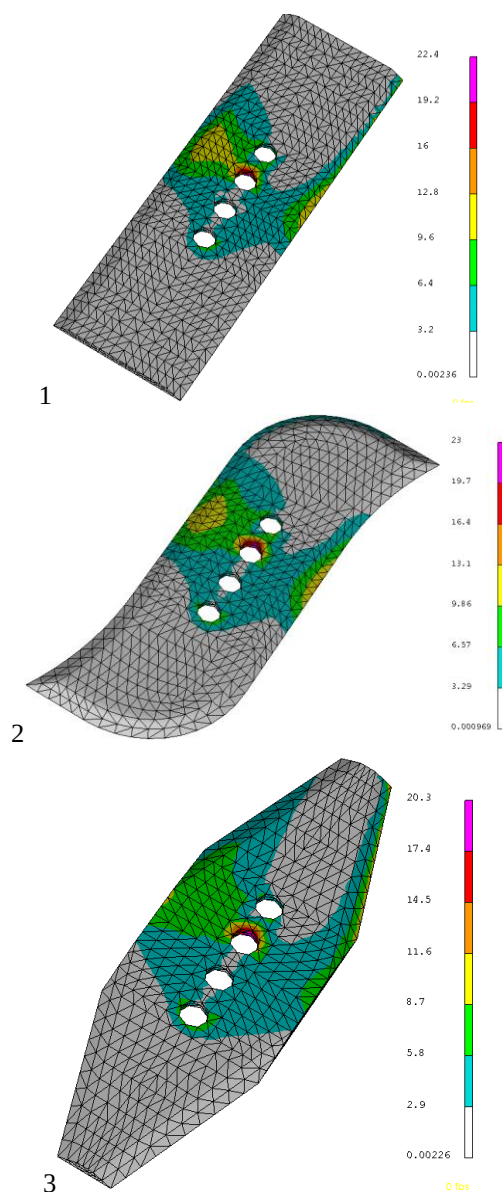
Table 6- Engineering properties of blade material (Valinejad, 2004)

جنس	ضریب انبساط حرارتی	چگالی	ضریب پواسن	مدول الاستیسیته
Material	Thermal Expansion Coefficient (K ⁻¹)	Density (kg m ⁻³)	Poisson's Ratio	Modulus of Elasticity (GPa)
100Cr6	1.15×10 ⁻⁵	7810	0.3	210

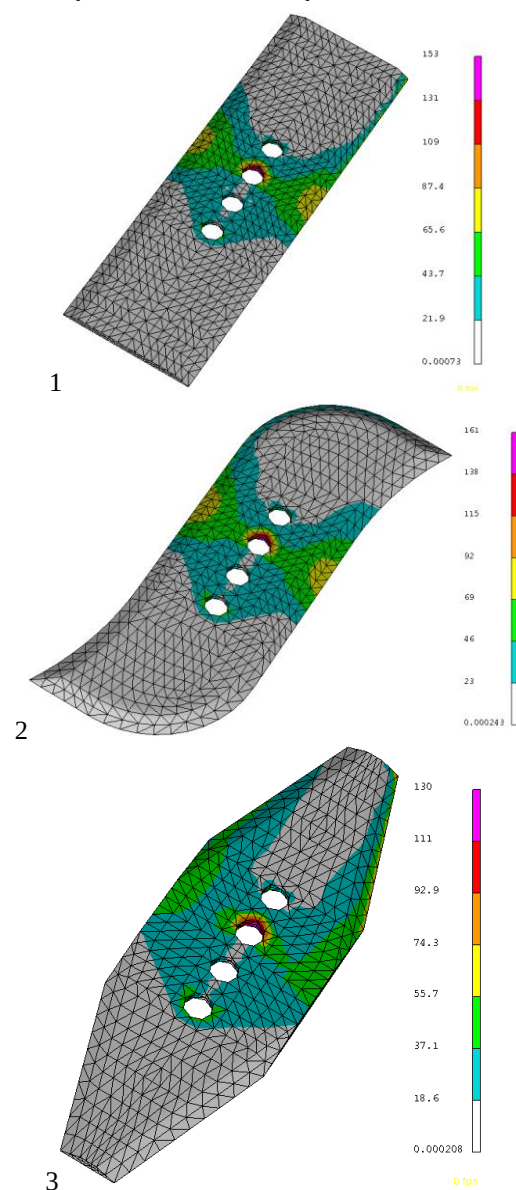


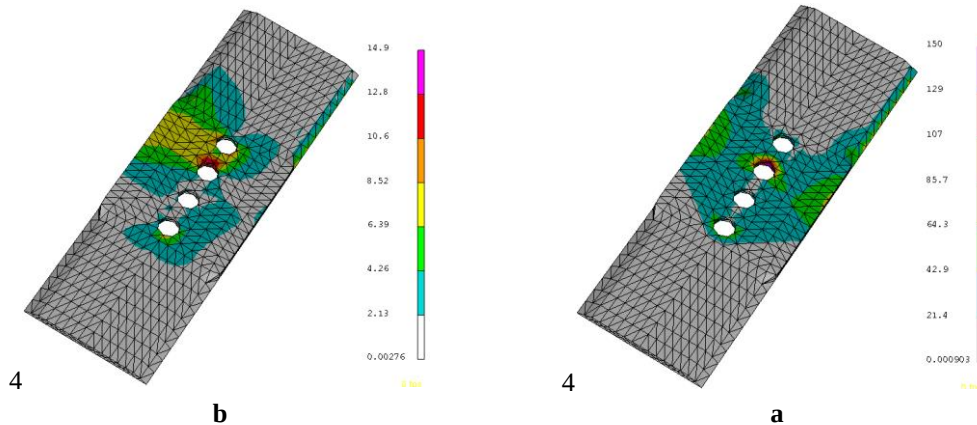
شکل ۱۵- کانتور تنش فون میسز در تیغه‌ها: الف) بیشینه و ب) کمینه (۱= مدل قدیمی، ۲= هلالی، ۳= مثلثی و ۴= تقویت‌شده)
Fig. 15. Von Mises stress contour of the blades: (a) maximum and (b) minimum (1= Outdated, 2= Crescent, 3= Triangular, and 4= Reinforced)

نسبت تنش بین هندسه‌های مختلف به تفاوت در توزیع تنش و مقادیر کمینه و بیشینه تنش حاصل از پاسخ هر هندسه تحت شرایط بارگذاری مورد مطالعه نسبت داده شد. دامنه و تنش میانگین فون میسز بر اساس تغییرات تنش در یک نقطه مشخص از تیغه در طول چرخه بارگذاری در شکل ۱۶ نشان داده شده است. از این رو، مقادیر دامنه و تنش میانگین ارائه شده در این شکل مربوط به پاسخ تنش در همان نقطه و چرخه بارگذاری بوده و لزوماً از مقادیر بیشینه و کمینه سراسری نمایش داده شده در شکل ۱۳ قابل محاسبه نیستند. کانتور این تنش‌ها با استفاده از نرم‌افزار FEMFAT استخراج و نشان داده شده است.



نتایج شکل ۱۵ نشان می‌دهد که تنش بیشینه و کمینه برای تیغه مدل قدیمی به ترتیب $174-132$ MPa، برای تیغه هلالی $140-183$ MPa، تیغه مثلثی $110-150$ MPa و برای تیغه تقویت شده $140-161$ MPa است. تیغه مثلثی به دلیل توزیع مناسب‌تر بار، افزایش ممان اینرسی در نواحی بحرانی، کاهش تمرکز تنش و انتقال تدریجی نیرو به محل اتصال، کمترین تنش بیشینه و کمینه را در میان هندسه‌های مورد بررسی نشان داد. این هندسه موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش شده است که با نتایج (Hao et al., 2024; Xi et al., 2018) مطابقت داشت. با توجه به مقادیر کمینه و بیشینه تنش، نسبت تنش برای تیغه‌های قدیمی، هلالی، مثلثی و تقویت شده به ترتیب برابر با 0.76 ، 0.77 ، 0.73 و 0.78 به دست آمد. تفاوت در



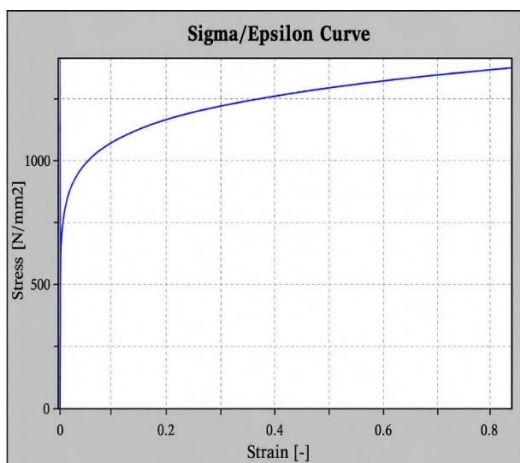


شکل ۱۶- کانتور تنش فون میسز در تیغه‌ها: الف) دامنه و ب) میانگین (۱= Outdated, ۲= Crescent, ۳= Triangular, and ۴= Reinforced)
Fig. 16. Von Mises stress contour of the blades: (a) amplitude and (b) average (1= Outdated, 2= Crescent, 3= Triangular, and 4= Reinforced)

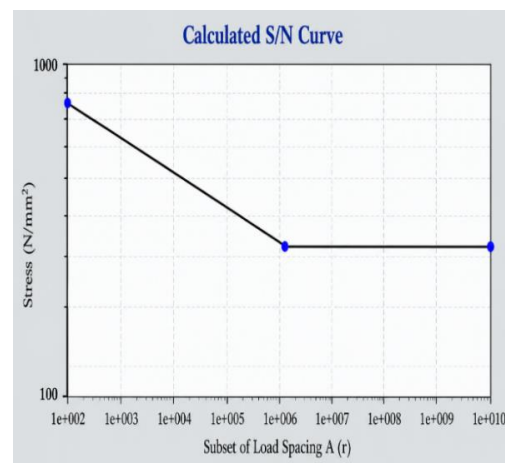
(2004) مطابقت داشت.

تعیین خواص مهندسی مواد و نمودار عمر-تنش استاندارد از الزامات اساسی تحلیل خستگی است. از این رو، پیش از انجام تحلیل خستگی، مشخصات مکانیکی و پارامترهای خستگی فولاد 100Cr6 در نرم‌افزار FEMFAT تعریف شد. نمودارهای تنش-کرنش و تنش-عمر (S-N) حاصل از مدل‌سازی ماده در شکل ۱۷ نشان داده شده است. منحنی S-N بر اساس داده‌های مربوط به بارگذاری با چرخه کاملاً معکوس‌شونده ($R = -1$) تعریف شد. نتایج حاصل با روند گزارش‌شده در مطالعات ([Voltarelli et al., 2018](#); [Xi et al., 2018](#)) مطابقت داشت. مطابق منحنی تنش-عمر (S-N)، برای فولاد 100Cr6 در محدوده تنش ۱۹۰۰ - ۱۴۰۰ MPa سیکل قابل تحمل ماده حدود $۵/۲ \times 10^6$ بود (شکل ۱۷ ب).

نتایج شکل ۱۶ نشان داد که برای تیغه مدل قدیمی، تنش فون میسز دامنه تا ۱۵۳ MPa و میانگین ۲۲/۴ MPa؛ برای تیغه هلالی، تنش فون میسز دامنه تا ۱۶۱ MPa و میانگین ۲۳ MPa؛ برای تیغه مثلثی، تنش فون میسز دامنه تا ۱۳۰ MPa و میانگین ۲۰ MPa؛ برای تیغه تقویت‌شده، تنش فون میسز دامنه تا ۱۵۰ MPa و میانگین ۱۴/۹ MPa بود. تیغه مثلثی کمترین دامنه تنش را داشته است؛ در مقایسه هندسه‌های مختلف، تیغه مثلثی کمترین دامنه تنش را نشان داد. این رفتار را می‌توان به توزیع یکنواخت‌تر بار و کاهش تمرکز تنش در این هندسه نسبت داد. کاهش دامنه تنش از دیدگاه خستگی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا دامنه تنش یکی از عوامل اصلی مؤثر بر شروع و رشد ترک‌های خستگی است. از سوی دیگر، تیغه تقویت‌شده کمترین مقدار تنش میانگین را داشت. وجود نواحی تقویتی و افزایش سختی موضعی سازه می‌تواند موجب توزیع مناسب‌تر بار و کاهش تنش‌های موضعی شود؛ که با نتایج ([Rodríguez et al., 2020](#); [Suresh, 2020](#))



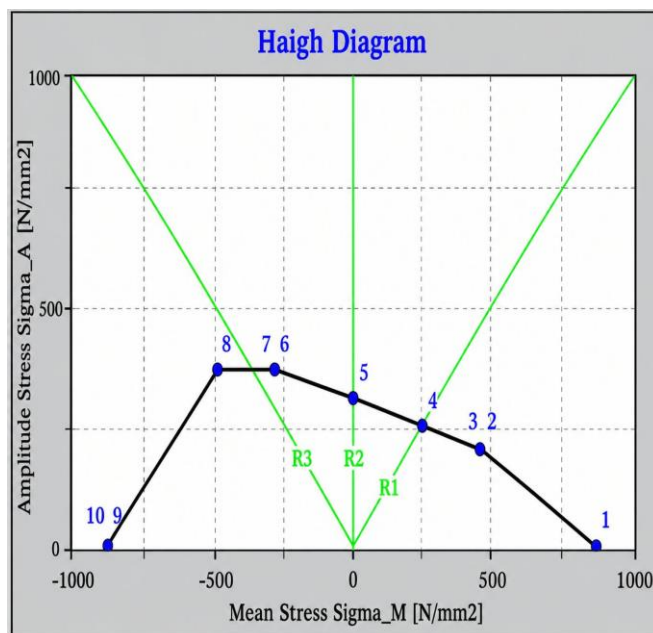
a



b

شکل ۱۷- نمودارهای الف) تنش-کرنش و ب) تنش-عمر (S-N) برای فولاد به کار رفته در تیغه‌ها
Fig. 17. (a) Stress-Strain and (b) Stress-Life (S-N) diagrams for the steel used in the blades

گرفت. همچنین، مشخصات مهندسی فولاد 100Cr6 تحت حالت‌های مختلف بارگذاری کششی، فشاری و برشی در شکل ۱۸ ب ارائه شده است.



a

Strength Data	
Tension	
Ultimate Strength:	870.0 [N/mm2]
Yield Strength:	660.0 [N/mm2]
Pulsating Endurance Strength:	500.0 [N/mm2]
Alternating Endurance Strength:	310.0 [N/mm2]
Thickness of Specimen:	7.5 [mm]
Compression	
Ultimate Strength:	870.0 [N/mm2]
Yield Strength:	660.0 [N/mm2]
Pulsating Endurance Strength:	0.0 [N/mm2]
Alternating Endurance Strength:	310.0 [N/mm2]
Thickness of Specimen:	7.5 [mm]
Bending	
Ultimate Strength:	1020.0 [N/mm2]
Yield Strength:	770.0 [N/mm2]
Pulsating Endurance Strength:	600.0 [N/mm2]
Alternating Endurance Strength:	390.0 [N/mm2]
Thickness of Specimen:	7.5 [mm]

b

شکل ۱۸- الف) نمودار هایگ و ب) اطلاعات مهندسی فولاد 100Cr6 به کاررفته در تیغه‌ها

Fig. 18. (a) Haigh diagram adapted from (ASM Handbook Committee, 1996), and (b) engineering data of the steel used in the blades

ناحیه در مجاورت محل اتصال تیغه به صفحه دوار ماشین برداشت قرار داشت؛ زیرا در این ناحیه انتقال نیرو از تیغه به صفحه دوار انجام شده و تمرکز تنش بیشتری ایجاد می‌شود. بر اساس نتایج تحلیل خستگی، هندسه‌ای که در ناحیه بحرانی دارای کمترین آسیب خستگی و بیشترین ضریب اطمینان باشد، از نظر مقاومت در برابر بارگذاری چرخه‌ای عملکرد مطلوب‌تری خواهد داشت. با توجه به شکل ۱۹ و نتایج تحلیل خستگی، تیغه مثلی با میزان آسیب خستگی $4/37 \times 10^{-19}$ و ضریب اطمینان خستگی $4/22$ در نقطه بحرانی، بهترین عملکرد خستگی را در میان هندسه‌های مورد بررسی نشان داد. که با نتایج (Ma, 2002; Swe et al., 2022) مطابقت داشت. مقدار بسیار پایین آسیب خستگی تیغه را می‌توان ناشی از دو عامل دانست. نخست، هندسه تیغه مثلی و نحوه توزیع نیرو در آن، که موجب پاسخ تنشی متفاوت نسبت به سایر هندسه‌های مورد بررسی شده است؛ به‌طوری‌که تنش‌های ایجادشده در این هندسه در مقایسه با برخی تیغه‌های دیگر پایین‌تر بوده است. دوم، فولاد 100Cr6 پس از سخت‌کاری، به‌ویژه در شرایط سخت‌کاری القایی، سختی بالایی

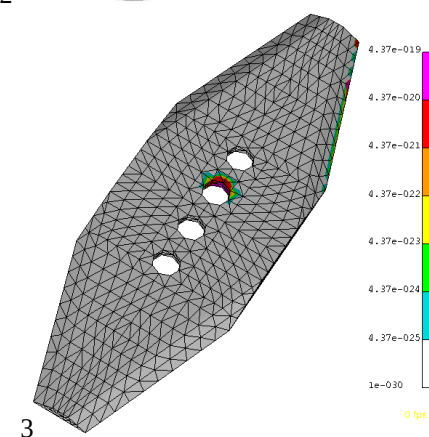
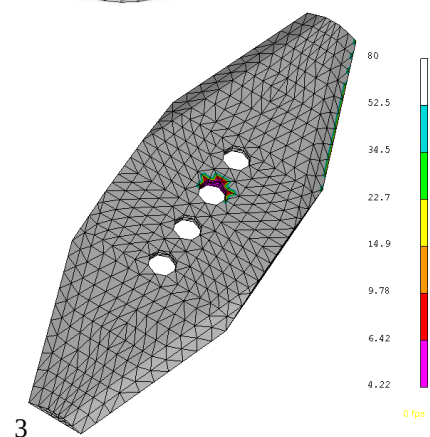
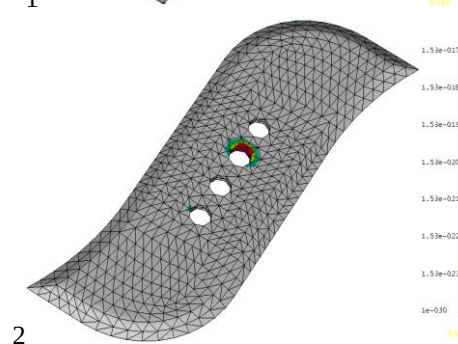
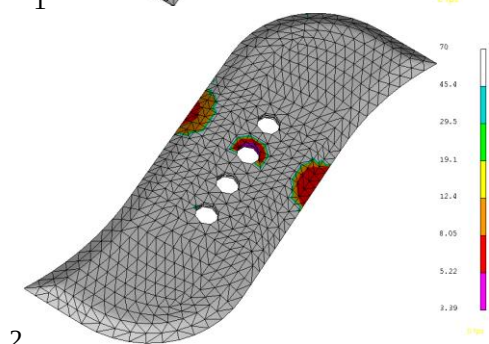
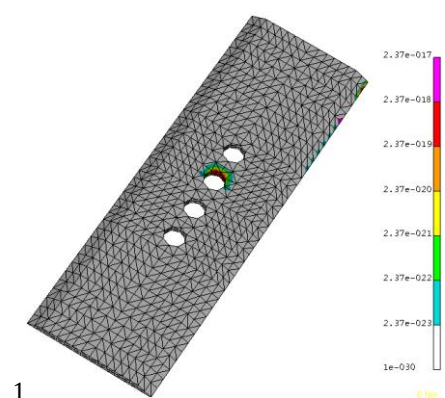
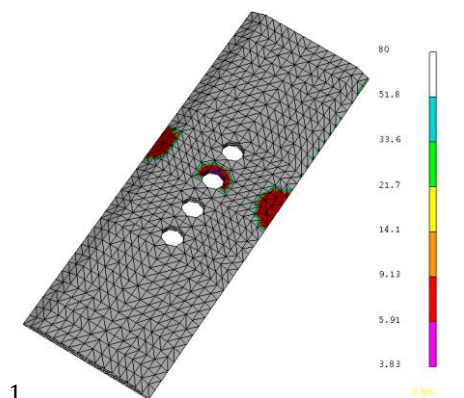
همان‌طور که از نمودار هایگ مشاهده می‌شود، تغییرات تنش میانگین بر محدوده تنش قابل تحمل ماده در شرایط خستگی اثرگذار است. افزایش تنش میانگین کششی معمولاً موجب کاهش دامنه تنش قابل تحمل و در نتیجه کاهش عمر خستگی می‌شود، در حالی‌که تنش میانگین فشاری می‌تواند اثر مطلوب‌تری بر رفتار خستگی داشته باشد. این موضوع در نتایج حاصل از تحلیل FEMFAT نیز مشاهده شد و با یافته‌های گزارش‌شده توسط (Paulo Testa et al., 2023; Pérez- Reyes et al., 2018) همخوانی دارد.

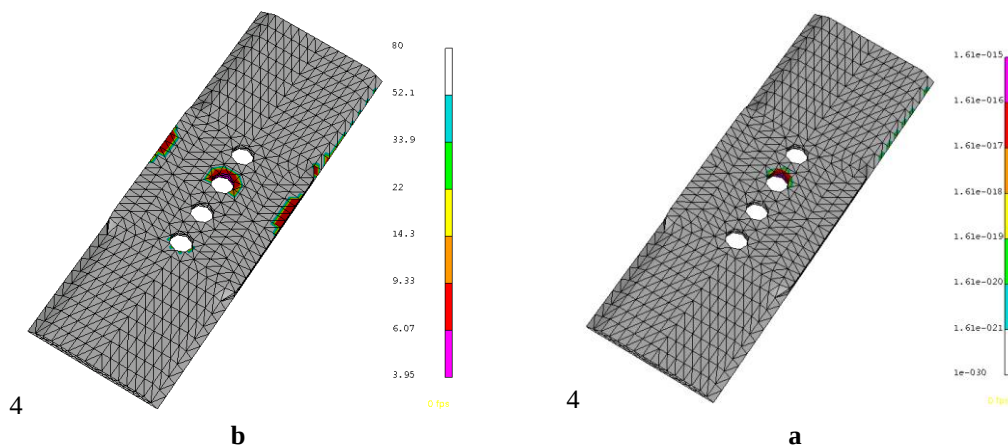
شکل ۱۹ تحلیل آسیب و ضریب اطمینان خستگی با نرم‌افزار FEMFAT بر اساس معیار فون میسز در بحرانی‌ترین حالت به‌ترتیب برای انواع تیغه‌ها نشان داده شده است.

همان‌طور که شکل ۱۹ نشان می‌دهد؛ بیشتر نواحی تیغه‌ها دارای مقادیر پایین آسیب خستگی و ضریب اطمینان نسبتاً بالایی هستند که با نتایج گزارش‌شده در مطالعات (Meng et al., 2005; Paixão et al., 2019) مطابقت داشت. با توجه به نتایج تحلیل تنش، مشاهده چنین رفتاری نیز قابل انتظار بود. در تمامی هندسه‌ها، بحرانی‌ترین

اثبات بیش طراحی، بررسی همزمان عواملی مانند جرم و ابعاد تیغه، الزامات عملکردی، ظرفیت تحمل بار، تنش‌های کاری و ضریب اطمینان خستگی ضروری است که در محدوده این پژوهش قرار نداشت.

نشان داد و مقدار سختی HRC ۶۲ برای این حالت اندازه‌گیری شد که می‌تواند با مقاومت بالای آن در برابر بارگذاری مورد مطالعه مرتبط باشد. بنابراین، مقدار بسیار پایین آسیب خستگی به تنهایی نمی‌تواند به‌عنوان مدرک قطعی برای بیش طراحی تیغه مثلی تلقی شود. برای





شکل ۱۹- کانتور (الف) آسیب و (ب) ضریب اطمینان خستگی در تیغه‌ها (۱= مدل قدیمی، ۲= هلالی، ۳= مثلثی، ۴= تقویت شده)
Fig. 19. Contour of (a) damage and (b) fatigue safety factor in blades (1= Outdated, 2= Crescent, 3= Triangular, 4= Reinforced)

نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل خستگی نشان داد که اکثر نقاط تیغه‌ها، دارای آسیب خستگی پایین و ضریب اطمینان بالایی هستند. در تیغه‌ها بحرانی‌ترین نقطه در محل اتصال به صفحه دوار ماشین برداشت بود. بهترین نوع تیغه برش برای ماشین‌های برداشت نیشکر، شکل مثلثی است که میزان آسیب آن $10^{-19} \times 4/37$ و دارای ضریب اطمینان خستگی $4/22$ می‌باشد. نتایج نشان داد که تیغه ساخته شده از جنس 100Cr6 و روش سخت‌کاری القایی، بیشترین سختی را دارد.

مشارکت نویسندگان

وحید کهربیزی: مفهوم‌سازی، استخراج و تهیه متن اولیه، ویرایش متن، شبیه‌سازی عددی/کامپیوتری، اعتبارسنجی
 رسول همتیان: روش‌شناسی، مفهوم‌سازی، جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، خدمات نرم‌افزاری، شبیه‌سازی عددی/کامپیوتری، اعتبارسنجی، تصویرسازی نتایج، استخراج و تهیه متن اولیه، ویرایش متن
 ابراهیم زارعی شهامت: مشاوره فنی، استخراج و ویرایش متن

References

1. ASM Handbook Committee. (1996). *Fatigue and fracture* (Vol. 19). Materials Park, OH: ASM International.
2. Bannantine, J. A., Comer, J. J., & Handrock, J. L. (1990). *Fundamentals of metal fatigue analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
3. Bhatti, M. A. (2005). *Fundamental finite element analysis and applications: with Mathematica and Matlab Computations*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
4. Biswas, S., Paul, S., Ghosh, S. K., Ghosh, S., Mukherjee, A., & Bose, S. (2024). Advanced modal analysis of NACA 0012 airfoil wings: Unveiling higher-order deformation modes using ANSYS Workbench. In *Innovative approaches in engineering research* (Chapter 18, p. 169).
5. Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2019). *Shigley's mechanical engineering design* (11th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
6. Cassia, M. T., da Silva, R. P., Paixão, C. S. S., Bertonha, R. S., & Cavichioli, F. A. (2014). Basecutter blades wear in quality of mechanized harvesting. *Ciência Rural*, 44(6), 987–993. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000600006>
7. Classifications and designations of carbon and alloy steels. (1998). In J. R. Davis (Ed.), *Metals handbook desk edition* (2nd ed., pp. 203–219). Materials Park, OH: ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.a0003092>
8. Delgado-Bejarano, L., González-Sánchez, H., & García-Monsalve, G. (2024). Stress evaluation using finite elements in a manual agricultural tool. *Ingeniería e Investigación*, 44(2), e104844. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.104844>
9. Deutsches Institut für Normung (DIN). (2006). *DIN EN 10083-1:2006-10: Steels for quenching and tempering—Part 1: General technical delivery conditions*. Berlin, Germany: Beuth Verlag.
10. Dossett, J. L., & Totten, G. E. (Eds.). (2014). Iron-carbon phase diagrams. In *ASM handbook: Heat treating of irons and steels* (Vol. 4D, pp. 543–544). Materials Park, OH: ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v04d.a0005995>

11. European Committee for Standardization. (2019). *EN 10025-2:2019: Hot rolled products of structural steels—Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*. Brussels, Belgium: Author.
12. Fadare, D. A., Fadara, T. G., & Akanbi, O. Y. (2011). Effect of heat treatment on mechanical properties and microstructure of NST 37-2 steel. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10(3), 299–308. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2011.103020>
13. Gdoutos, E., & Konsta-Gdoutos, M. (2024). Compression, bending, torsion and multiaxial testing. In *Mechanical testing of materials* (pp. 35–61). Cham, Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45990-0_2
14. Hematian, R., Najafi, Gh., & Tavakoli Hashjin, T. (2011). *Design, construction, and evaluation of new stem-cutting blades for sugarcane harvesting machines* [Msc's thesis]. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. [in Persian].
15. Hao, J., Liu, T., Zhao, J., Wang, X., Wu, Y., Bai, Z., & Ma, H. (2024). Research progress in surface wear resistance strengthening of soil contact components in tillage and sowing agricultural machinery equipment. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 40(11), 14–25. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202310140>
16. Hunt, D. (2001). *Farm power and machinery management* (10th ed.). Ames, IA: Iowa State University Press.
17. Logan, D. L., (2012). *A first course in the finite element method* (5th ed.). Stamford, CT: Cengage Learning.
18. Ma, F. L. (2002). *Virtual experimental analysis on the cleaning element in brush shape of the sugarcane harvester* [Master's thesis, Guangxi University]. Nanning, China.
19. Magalhães, K. G. D., Soares, V. V., de Lima, L. F., de Moura, L. E. F., de Melo, K. M., & do Nascimento, J. H. O. (2024). Main processes of mechanization of biomass from sugarcane: An approach using Agriculture 4.0. In *Multidisciplinary perspectives: Integrating knowledge* (pp. 619–639). Seven Editora. <https://doi.org/10.56238/sevened2024.007-046>
20. Meng, Y., Li, S., Liu, Z., Tang, Z., & Yuan, H. (2005). Analysis of the Fatigue Life of Nonlinear Arrangement of Sugarcane Cleaning Element in Brush Shape. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 17(2), 334–340.
21. Paixão, C. S. S., Voltarelli, M. A., de Oliveira, L. P., Bernache, L., & da Silva, R. P. (2019). Wear quantification of basal cutting knives in sugarcane harvesting. *Engenharia Agrícola*, 39(4), 498–503. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39n4p498-503/2019>
22. Paulo Testa, J. V., Battistuzzi Martins, M., Carpes Marques Filho, A., Pereira Lanças, K., Lustosa Sobrinho, R., Finatto, T., Okla, M. K., & AbdElgawad, H. (2023). Continuous and impact cutting in mechanized sugarcane harvest: Quality, losses and impurities. *Agriculture*, 13(7), 1329. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071329>
23. 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).
24. Rao, S. S. (2010). *The finite element method in engineering* (5th ed.). Oxford, England: Butterworth-Heinemann.
25. Rencis, J. J., & Grandin, H. T. (2021, July). A general structured procedure to solve machine design problems. Paper presented at the 2021 ASEE Virtual Annual Conference, Virtual Conference. <https://doi.org/10.18260/1-2--36582>
26. Rodríguez, J. S., Duran, J. F., Aguilar, Y., Pérez Alcázar, G. A., & Zambrano, O. A. (2020). Failure analysis in sugar cane cutter base blades. *Engineering Failure Analysis*, 112, 104503. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104503>
27. SAE International. (2000). *Chemical compositions of SAE alloy steels* (SAE J404_200006). Warrendale, PA: Author. https://doi.org/10.4271/J404_200006
28. Santos, J. L. T., de Freitas, M., Li, B., & Trigo, T. P. (2003). Fatigue assessment of mechanical components under complex multiaxial loading. In A. Carpinteri, M. de Freitas, & A. Spagnoli (Eds.), *Biaxial/multiaxial fatigue and fracture* (Vol. 31, pp. 463–482). Oxford, England: Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1566-1369\(03\)80025-0](https://doi.org/10.1016/S1566-1369(03)80025-0)
29. Schijve, J. (2001). *Fatigue of structures and materials*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/0-306-48396-3>
30. Srikanthnaik, J. (2024). Design and development of rotavator cutting tools using advanced mechanization technology for farm fields: A research review. *International Journal of Agriculture Extension and Social Development*, 7(2), 554–558. <https://doi.org/10.33545/26180723.2024.v7.i2g.1804>
31. Standardization Administration of the People's Republic of China. (2007). *Spring steels* (GB/T 1222-2007). Beijing, China: Standards Press of China.
32. Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2001). *Metal fatigue in engineering* (2nd ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.
33. Suresh, S. (2004). *Fatigue of materials* (2nd ed.). Cambridge, England: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511806575>
34. Swe, K. M., Reza, M. N., Chowdhury, M., Ali, M., Islam, S., Lee, S.-H., Chung, S.-O., & Hong, S. J. (2022). Stress and fatigue analysis of major components under dynamic loads for a four-row tractor-mounted radish collector. *Korean Journal of Agricultural Science*, 49(2), 269–284. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20220024>
35. Totten, G. E. (Ed.). (2017). *ASM handbook: Friction, lubrication, and wear technology* (Vol. 18). Materials Park,

- OH: ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v18.9781627081924>
36. Valinejad, A. (2004). *Steel tables and standards, Steel Key* (4th ed.). Tehran, Iran: Tarah Publishing. [In Persian].
37. Varani, M. (Ed.). (2024). *Design, optimization and analysis of agricultural machinery*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-7258-1458-9>
38. Voltarelli, M. A., Paixão, C. S. S., Zerbato, C., da Silva, R. P., & Gazzola, J. (2018). Failure mode and effect analysis (FMEA) in mechanized harvest of sugarcane billets. *Engenharia Agrícola*, 38(1), 88–96. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p88-96/2018>
39. Wulandana, R. (2024, October). Balancing theory, programming, and practical application for teaching of finite element analysis courses. Paper presented at the 2024 Fall ASEE Mid-Atlantic Section Conference, Farmingdale, NY. <https://doi.org/10.18260/1-2--49428>
40. Xie, L., Wang, J., Cheng, S., Zeng, B., & Yang, Z. (2018). Optimisation and finite element simulation of the chopping process for chopper sugarcane harvesting. *Biosystems Engineering*, 175, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.08.004>
41. Zhang, L., Jiang, B., Zhang, P., Yan, H., Xu, X., Liu, R., Tang, J., & Ren, C. (2023). Methods for fatigue-life estimation: A review of the current status and future trends. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 6(2), 025001. <https://doi.org/10.1063/1.50017255>