



Comprehensive Failure Analysis of Rollers Screen Used in Iron Ore Pelletizing Plants

Maryam Karbasi^{1*} , Amir Karimi¹, Sobhan Saadat², Hamid Talebizadeh Sardari² and Ali Mirzaei¹

1- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Nazm Avaran Sanat va Madan Gol Gohar Company, Sirjan, Iran

* Corresponding author, Email: m_karbasi@cc.iut.ac.ir

(Received: 4 March 2025; Revised: 2 June 2025; Accepted: 6 June 2025; Available online: 12 January 2026)

ABSTRACT

Introduction and Objectives: This study investigates the failure mechanisms of three types of rollers used in iron ore pelletizing plants, namely 304 stainless steel, 1.4313 steel, and hard chrome-coated St52 steel. The objective is to identify the causes of failure and assess the suitability of these materials for industrial application.

Materials and Methods: The failure analysis was conducted using macroscopic and statistical classification, hardness testing, quantometer analysis, scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive spectroscopy (EDS). These methods enabled a comprehensive evaluation of the mechanical, structural, and surface characteristics of the rollers.

Results: The results indicated that 304 stainless steel rollers failed due to low yield strength and insufficient hardness (~210 HV), leading to mechanical deformation and wear. In 1.4313 steel, widespread pitting corrosion and microstructural inhomogeneity caused excessive surface roughness and twisting. For the hard chrome-coated St52 rollers, the excessive coating thickness (up to 200 µm) resulted in brittle, detached layers that cracked at the interface, causing severe local delamination during operation.

Conclusion: The study reveals that failure mechanisms vary depending on the material properties and coating processes. Understanding these differences can inform better material selection and manufacturing practices, potentially extending the service life and improving the efficiency of roller components in pelletizing operations.

Keywords: Failure analysis, Mechanical deformation, Roller, Pitting corrosion, Steel.

How to Cite: Karbasi M, Karimi A, Saadat S, Talebizadeh Sardari H, Mirzaei A. Comprehensive failure analysis of rollers screen used in iron ore pelletizing plants. J Adv Mater Eng. 2026;45(2):1–21. <https://doi.org/10.47176/jame.45.2.1114>

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



تجزیه و تحلیل جامع تخریب غلتک‌های مورد استفاده در سرندهای غلتکی کارخانه‌های گندله‌سازی کنسانتره آهن

مریم کرباسی^{۱*}، امیر کریمی^۱، سبحان سعادت^۲، حمید طالبی زاده سردری^۲ و علی میرزایی^۱

۱- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- شرکت نظم آوران صنعت و معدن گل گهر، سیرجان، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m_karbasi@cc.iut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴، بازنگری: ۱۴۰۴/۳/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۱۶، انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۲)

چکیده

مقدمه و اهداف: این پژوهش با هدف بررسی مکانیزم‌های تخریب سه نوع غلتک مورد استفاده در کارخانه‌های گندله‌سازی سنگ آهن انجام شده است. این غلتک‌ها شامل فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، فولاد ۱.۴۳۱۳ و فولاد St52 با پوشش کروم‌سخت هستند. هدف نهایی، شناسایی علل شکست و ارزیابی مناسب بودن این مواد برای کاربرد صنعتی است.

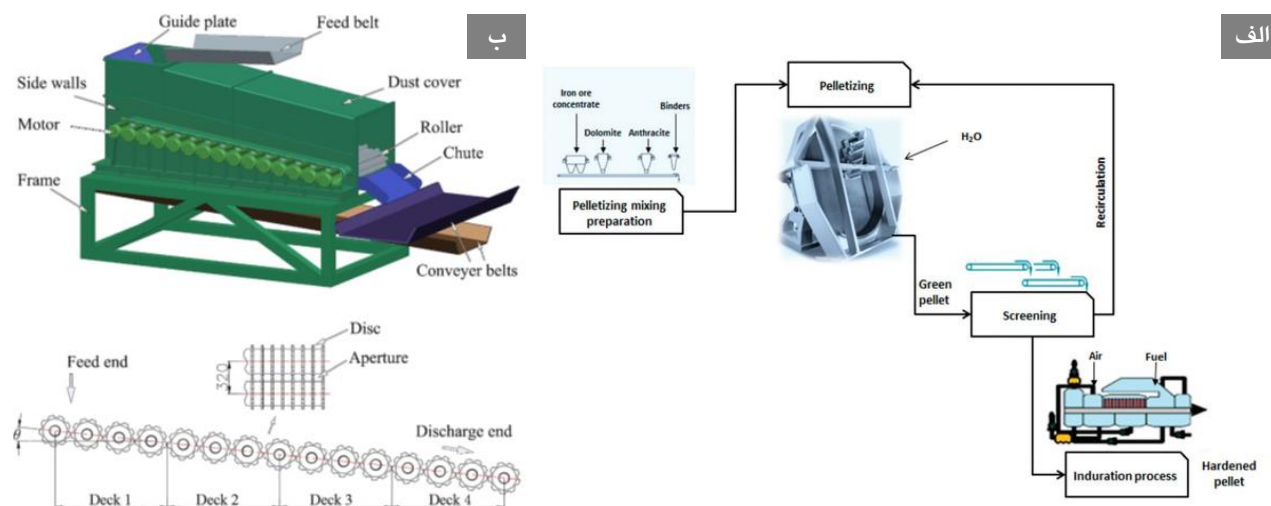
مواد و روش‌ها: جهت تحلیل تخریب، از روش‌های طبقه‌بندی ماکروسکوپی و آماری، سختی‌سنجی، کوآنتومتری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنجی پراش انرژی استفاده شد. این روش‌ها امکان بررسی جامع خواص مکانیکی، ساختاری و سطحی نمونه‌ها را فراهم نمودند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد در فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، سختی پایین (حدود ۲۱۰ ویکرز) و استحکام تسلیم کم، موجب سایش و تغییر شکل مکانیکی شد. فولاد ۱.۴۳۱۳، به دلیل خوردگی حفره‌ای گسترده و ریزساختار ناهمگن، دچار زبری سطحی شدید و پیچش شد. در فولاد St52 با پوشش کروم‌سخت، ضخامت بالای پوشش (تا ۲۰۰ میکرومتر)، منجر به ایجاد ترک در ناحیه مرزی پوشش و زمینه و جداشدگی موضعی پوشش حین چرخش شد.

نتیجه‌گیری: مکانیزم‌های تخریب در انواع غلتک‌ها، به ویژگی‌های مکانیکی، ساختاری و فرایندهای پوشش‌دهی وابسته‌اند. نتایج حاصل می‌تواند در انتخاب بهینه مواد و اصلاح فرایندهای ساخت غلتک‌ها مؤثر بوده و منجر به افزایش عمر و کارایی آن‌ها در صنایع گندله‌سازی شود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز تخریب، تغییر شکل مکانیکی، غلتک، خوردگی حفره‌ای، فولاد.





شکل ۱- (الف) طرح‌واره مراحل فرایند گندله سازی و (ب) طرح‌واره‌ای از سرنده غلتکی (۳ و ۶).

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با افزایش تقاضای جهانی برای فولاد، گندله‌سازی سنگ‌آهن به‌عنوان یکی از مراحل حیاتی در زنجیره تولید آهن و فولاد از اهمیت بیشتری برخوردار شده است. در این فرآیند، گندله‌های خام که از تجمع ذرات ریز سنگ‌آهن و افزودنی‌ها تحت شرایط خاص رطوبتی و مکانیکی در دیسک یا درام‌های گندله‌سازی تولید می‌شوند، باید از نظر ابعادی در محدوده‌ای خاص (معمولاً ۸ تا ۱۶ میلی‌متر) قرار گیرند تا عملکرد مناسب در مرحله پخت و سپس احیای مستقیم را تضمین کنند (۲ و ۳).

در صنعت گندله‌سازی، گندله‌های خارج از محدوده ابعادی مجاز می‌توانند مشکلات جدی از جمله کاهش نفوذپذیری بستر در کوره، افزایش مصرف انرژی، افت کیفیت محصول نهایی، افزایش تولید غبار و همچنین افزایش نرخ برگشت به واحد گندله‌سازی را به همراه داشته باشند (۴ و ۵). به همین دلیل، عملیات طبقه‌بندی گندله‌ها پیش از ورود به کوره پخت، به‌منظور حذف ذرات خارج از محدوده ابعادی امری ضروری و کلیدی است.

در گذشته، از سرندهای ارتعاشی برای انجام عملیات طبقه‌بندی استفاده می‌شد. هرچند این سرندها در سایر صنایع موفق ظاهر شده‌اند، اما برای گندله‌های خام که مقاومت مکانیکی محدودی دارند، مناسب نیستند؛ زیرا اعمال نیروهای دینامیکی

شدید موجب شکست یا ترک‌خوردگی گندله‌ها و در نتیجه افت عملکرد فرآیند می‌شود (۲ و ۴). این مشکل منجر به توسعه و استفاده گسترده از تجهیز جدیدی به نام «سرنده غلتکی» شد که به‌سرعت جایگزین سرندهای ارتعاشی در صنعت گندله‌سازی گردید.

سرنده غلتکی، سیستمی متشکل از تعدادی غلتک موازی است که در جهت مشخص و با سرعت دوران معین حرکت می‌کنند. این غلتک‌ها با ایجاد شکاف‌های تنظیم‌شده بین یکدیگر، امکان عبور ذرات کوچک‌تر و حرکت ذرات بزرگ‌تر را فراهم می‌کنند و ذرات در محدوده اندازه مطلوب را از انتهای مسیر به‌عنوان «ذرات با اندازه مناسب» جدا می‌کنند. از مهم‌ترین مزایای سرنده غلتکی می‌توان به قابلیت کارکرد با مواد چسبنده و مرطوب، کاهش آسیب مکانیکی به گندله‌ها، بهره‌برداری پیوسته و ظرفیت بالا اشاره کرد (۱ و ۶). فرآیند گندله‌سازی سنگ‌آهن و طرح-واره‌ای از سرنده غلتکی در شکل (۱) نشان داده شده است.

باین‌حال، عملکرد سرنده غلتکی به‌شدت تحت تأثیر پارامترهای طراحی و عملیاتی نظیر سرعت دورانی غلتک‌ها، زاویه شیب سطح سرنده، نرخ خوراک‌دهی، شکل و جنس غلتک‌ها و خواص مکانیکی و رئولوژیکی گندله‌ها قرار دارد. مطالعات شبیه‌سازی عددی مبتنی بر روش المان مجزا نشان داده‌اند که تغییر در این پارامترها می‌تواند منجر به کاهش راندمان

والدی و همکاران (۸) در سال ۲۰۲۰، به مطالعه استفاده از فناوری پوشش WC10Co4Cr به روش پوشش اسپری WC17Co و حرارتی سوخت اکسیژن با سرعت بالا در بهبود مقاومت اکسیداسیون فن القایی AISI 1045 پرداختند. نتایج نشان داد که سختی کمتر پوشش WC17Co نسبت به پوشش دیگر و یکپارچگی ریزساختاری بهتر، منجر به سرعت اکسیداسیون پایدار و تجمع WC17Co با ضخامت اکسید کمتر می‌شود.

ژانگ و همکاران (۹) در سال ۲۰۲۲، به عارضه‌یابی و بررسی دلایل تخریب میله پیستون جک هیدرولیک از جنس فولاد با پوشش کروم سخت شده پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که عیوب خوردگی حفره‌ای و پوسته‌پوسته شدن لایه کروم همراه با سختی و شکنندگی بالای آن مشاهده شدند. همچنین مشخص شد که کیفیت پوشش با آبکاری کامپوزیت نیکل-کروم بهبود می‌یابد.

در بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه غلتک‌های صنعتی، مشخص می‌شود که اکثر مطالعات محدود به بررسی جنبه‌های خاصی مانند مواد، پوشش‌ها یا تحلیل تخریب به صورت جداگانه بوده‌اند. علی‌رغم وجود تحقیقات متعدد، مطالعه جامعی که همه عوامل مؤثر بر عملکرد غلتک‌ها را در شرایط واقعی صنعتی بررسی کند، انجام نشده است و اغلب نتایج آزمایشگاهی قابلیت تعمیم به محیط صنعتی را ندارند. در این راستا، در این پژوهش تحلیل‌های تخریب روی رایج‌ترین غلتک‌های مورد استفاده در صنعت انجام شده است تا از این طریق بتوان نقاط ضعف را شناسایی کرد و راهکارهای مناسب برای بهبود طول عمر و کارایی این قطعات حیاتی را ارائه داد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

نمونه‌برداری مورد نیاز، طی بازدیدهای میدانی از دپوی غلتک‌های از رده خارج شرکت نظم آوران تهیه شدند. این غلتک‌ها در ابعاد طول ۴ متر، قطر خارجی آن‌ها ۸ سانتی‌متر و ضخامت آن ۱/۵ سانتی‌متر و از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، فولاد ۱.۴۳۱۳ و

جداسازی، ایجاد انسداد بین غلتک‌ها و افزایش نرخ عبور ذرات نامطلوب شود (۱ و ۵ و ۶).

با توجه به نقش کلیدی این تجهیز در کیفیت نهایی گندله‌ها و تأثیر مستقیم آن بر عملکرد کوره پخت، هرگونه اختلال در عملکرد سرند غلتکی می‌تواند موجب افزایش بار برگشتی، کاهش ظرفیت تولید، افزایش هزینه انرژی و کاهش عمر مفید اجزای تجهیز گردد. علی‌رغم اهمیت عملکردی سرندهای غلتکی در صنعت گندله‌سازی، تحلیل‌های جامع و تجربی درباره‌ی تخریب مکانیکی اجزای این تجهیزات (مانند سایش سطحی، خستگی، شکست تماسی و خرابی مکانیزم‌های محرک) هنوز محدود است و در بسیاری از واحدها بر اساس آزمون و خطا انجام می‌گیرد.

انواع جنس‌های سرندهای غلتکی در صنعت شامل چندین نوع اصلی است. فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، یکی از متداول‌ترین جنس‌های مورد استفاده است که به دلیل مقاومت به خوردگی بالا کاربرد گسترده‌ای دارد. فولاد زنگ‌نزن ۱.۴۳۱۳ نیز از دیگر آلیاژهای مورد استفاده است که خواص مکانیکی مطلوبی را ارائه می‌دهد. فولاد St52 با روکش کروم سخت شده، گزینه دیگری است که برای افزایش مقاومت به سایش مورد استفاده قرار می‌گیرد. پوشش‌های WC-Cr-Co که به روش اسپری حرارتی اعمال می‌شوند، مقاومت بسیار خوبی در برابر سایش و خوردگی از خود نشان می‌دهند. فولادهای زنگ‌نزن دوفازی نیز به دلیل ترکیب خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین در برخی کاربردها از سرندهای غلتکی پلیمری استفاده می‌شود که مزایای خاص خود از جمله وزن کمتر و مقاومت شیمیایی بالا را دارند.

محمدی و همکاران (۷) در سال ۲۰۱۸، به بررسی ساخت سرندهای دبل سطح سرند اسکرین از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که چسبیدن گندله‌های سنگ آهن به سطح سرندها ناشی از ریزساختار کاملاً فریتی در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی است که در اثر حضور ترکیبات کربید کروم به صورت شبکه دندریتی رخ می‌دهد.

فولاد St52 دارای پوشش کروم سخت بودند. نمونه‌ها به صورت تصادفی انتخاب شدند و بررسی تحلیل تخریب روی آن‌ها صورت پذیرفت.

درخصوص لزوم یکسان‌سازی شرایط عملکردی غلتک‌ها جهت مقایسه مقاومت به تخریب، مراحل زیر انجام گرفت. در مرحله نخست، مجموعه‌ای از نمونه‌های آماری هر یک از غلتک‌ها مورد بررسی قرار گرفت تا الگوی عمومی تخریب برای هر جنس شامل انواع و شدت‌های آن استخراج شود. در مرحله دوم، جهت ایجاد شرایط یکسان و قابل مقایسه، از هر نوع غلتک، نمونه‌هایی با عمر کاری ثابت شش ماهه انتخاب گردید. تمامی این نمونه‌ها مربوط به بازه زمانی مشابهی از سال بودند تا تأثیر عوامل بیرونی و محیطی مانند توزیع بار روی سرند، توزیع دانه‌بندی گندله‌ها، آنالیز رطوبت گندله‌ها، دما، رطوبت، نوع مواد و افزودنی‌های موجود در گندله، pH محیط و قدرت ساینده‌گری ذرات بر نتایج به حداقل برسد. هماهنگی‌های لازم از طریق دفتر فنی کارخانه صورت پذیرفت تا اطمینان حاصل شود نمونه‌های انتخاب‌شده همگی تحت شرایط عملکردی یکسان مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

براین اساس، شرایط عملکردی غلتک‌ها در حد امکان همگن‌سازی شده و بدین ترتیب مقایسه مقاومت به تخریب بین مواد مختلف با دقت و صحت قابل قبول انجام پذیر بوده است. به منظور حذف اثرات ناشی از وقایع خاص یا ناپایدار، مواردی که فقط یک یا دو بار در دوره ارزیابی مشاهده شده‌اند (نظیر عیوب استثنائی یا تخریب‌های غیرمتداول)، از تحلیل نهایی حذف گردیدند. بدین ترتیب، تنها روندهای تکرارشونده و معنادار از نظر آماری مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. به منظور حذف اثرات ناشی از وقایع خاص یا ناپایدار، مواردی که فقط یک یا دو بار در دوره ارزیابی مشاهده شده‌اند (نظیر عیوب استثنائی یا تخریب‌های غیرمتداول)، از تحلیل نهایی حذف گردیدند. بدین ترتیب، تنها روندهای تکرارشونده و معنادار از نظر آماری مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

شایان ذکر است که در مطالعات صنعتی واقعی، محدودیت‌هایی

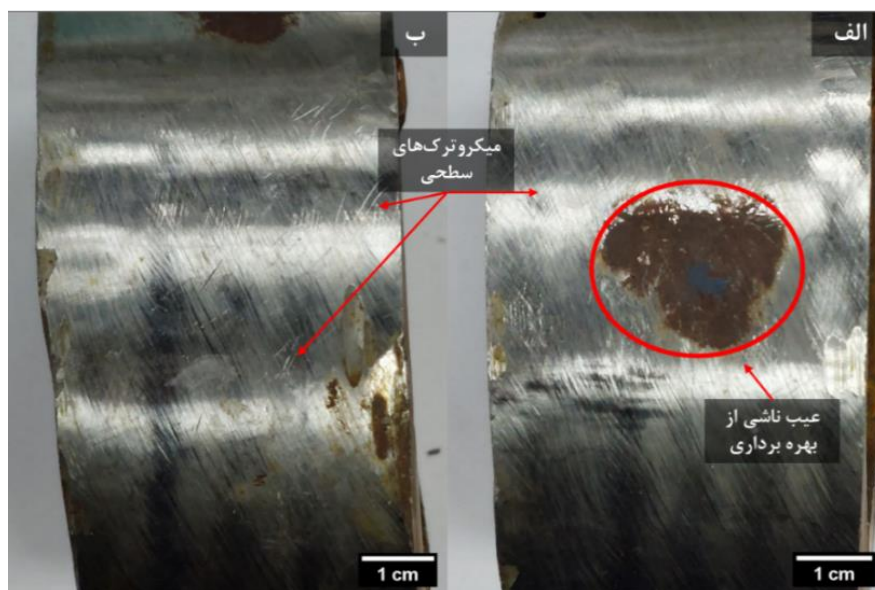
مانند عدم دسترسی به کلیه اطلاعات دقیق عملکردی، سوابق تعمیر و نگهداری و کنترل کامل بر تمامی متغیرهای محیطی، همواره وجود دارد. این امر نه تنها در تحقیق حاضر، بلکه در اغلب مطالعات موردی مشابه در سطح بین‌المللی نیز گزارش شده است. همان‌طور که در تحقیقات آندراده و همکاران (۴) مشاهده می‌شود، عمدتاً تحلیل‌های شکست در شرایط صنعتی به صورت مطالعات میدانی و با تکیه بر داده‌های آماری، مشاهدات عینی و بررسی‌های آزمایشگاهی در دسترس انجام می‌گیرد و به دلیل پیچیدگی محیط صنعتی، امکان ارزیابی کامل همه شرایط و پارامترها وجود ندارد؛ بنابراین، در تحقیق حاضر نیز با تمرکز بر تحلیل موردی نمونه‌های واقعی و تطبیق شرایط تا حد امکان، تلاش شده است تا مکانیزم‌های اصلی شکست شناسایی و تحلیل شوند. این رویکرد، منطبق با اصول پذیرفته‌شده در تحلیل شکست قطعات صنعتی بوده و همان‌طور که مطالعات مرجع نشان داده‌اند، ارائه راهکارهای کاربردی بر اساس داده‌های عملیاتی و مشاهدات میدانی، به مراتب برای صنعت ارزشمندتر از تحلیل‌های صرفاً تئوری و آزمایشگاهی است.

۲-۲- روش تحقیق

جهت بررسی‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی، نمونه‌هایی در طول ۵ سانتی‌متر از غلتک برش خوردند که ابتدا بازرسی چشمی روی آن‌ها صورت گیرد و پس از آن به قطعات کوچک‌تر برش داده شد تا در بررسی‌های میکروسکوپی استفاده شود. جهت حذف آلودگی‌های سطحی و مشاهده بهتر، نمونه‌ها در الکل برای مدت زمان ۲۰ دقیقه داخل دستگاه التراسونیک قرار داده شدند. در این پژوهش، از دستگاه التراسونیک مورد استفاده از برند Elma ساخت کشور آلمان استفاده شد.

۲-۳- تحلیل تخریب و مشخصه‌یابی نمونه‌ها

اولین قدم در انجام هر تحلیل تخریب، استفاده از بازرسی چشمی و مشاهدات ماکروسکوپی است (۱۰ و ۱۱). نمونه‌های تهیه‌شده در این مرحله، توسط مشاهدات ماکروسکوپی مورد ارزیابی قرار



شکل ۲- (الف و ب) تصویر نواحی مختلف نمونه فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ و وقوع میکرو ترک‌های سطحی روی سطح نمونه.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بازرسی چشمی و مشاهدات ماکروسکوپی

در اولین مرحله از تحلیل تخریب، بازرسی چشمی و بررسی‌های ماکروسکوپی از سه نوع فولاد زنگ‌زن ۳۰۴، ۱.۴۳۱۳ و St52 دارای پوشش کروم‌سخت مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه به هر یک از آن‌ها پرداخته شده است.

بررسی قطعه فولاد زنگ‌زن ۳۰۴

در بررسی این قطعات، مشاهده شد عیوب سطحی زیادی روی نمونه تشکیل نشده و صرفاً برخی عیوب روی سطح رخ داده‌اند که ناشی از بهره‌برداری هستند. این عیوب، به‌صورت تکرارشونده روی سطح نیستند و به همین علت از بررسی این عیوب صرف‌نظر می‌گردد. در بررسی اولیه نمونه‌های برش خورده مشاهده می‌شود که میکرو ترک‌های بسیاری روی سطح نمونه وجود دارند که در شکل (۲) نشان داده شده است. منشأ این ترک‌ها را می‌توان به تنش‌های موضعی ناشی از بارگذاری نوسانی و تماس‌های مکرر مکانیکی نسبت داد که در طی سرویس‌دهی به وجود می‌آیند. چنین تنش‌هایی، به‌ویژه در نواحی دارای تمرکز تنش یا تغییرات ناگهانی در سختی یا ریزساختار، زمینه‌ساز شروع و گسترش میکرو ترک‌ها می‌باشند.

گرفتند. پس از انجام این مرحله، مشاهدات میکروسکوپی توسط میکروسکوپ الکترونی انجام شد.

کوانتومتری

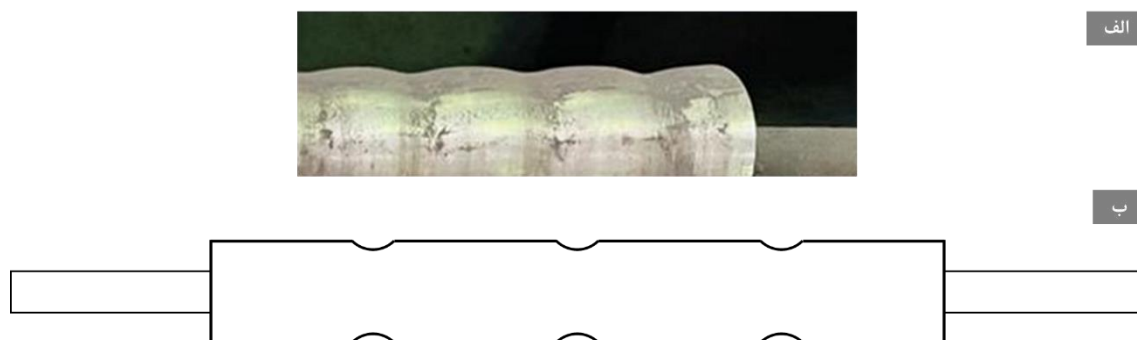
کوانتومتری انجام شده روی نمونه‌ها، براساس استاندارد ASTM E415-08 انجام شد.

بررسی میکروسکوپی الکترونی

جهت بررسی سطوح خارجی و داخلی نمونه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی FEI/SEM Quanta 200 ساخت کشور آمریکا و با دو آشکارساز SE و BSE استفاده شد. آنالیز مناطق مورد نظر توسط آنالیزگر EDS EDAX Silicon Drift 2017 ساخت کشور آمریکا نیز انجام شد.

سختی سنجی

سختی‌سنجی با دستگاه سختی‌سنج با مشخصات W Testor OTTO WOLPERT-WERKE LUDWIGSHAFEN a.RH. ساخت کشور آلمان انجام شد.



شکل ۳- (الف) تصویری از عیب مشاهده شده در نمونه صنعتی، (ب) طرح‌واره غلتک دارای عیب از جنس فولاد زنگ‌زن ۳۰۴.

به همراه شرایط کاری موجود، عامل اصلی بروز این نوع تخریب محسوب می‌شود.

این عیب، به کاهش موضعی در سطح غلتک اشاره دارد که می‌تواند یکپارچگی سازه و کارایی عملیاتی را به خطر بیندازد. در بررسی این موارد نیز میکروترک مشاهده شد؛ اما در سطح این فولاد، آثاری از تشکیل حفره و خوردگی حفره‌ای مشاهده نمی‌شود و علت آن را می‌توان به وجود کروم بالا در این فولاد نسبت داد. کروم باعث ایجاد یک لایه محافظ^۳ روی سطح فولاد شده که از خوردگی جلوگیری می‌کند.

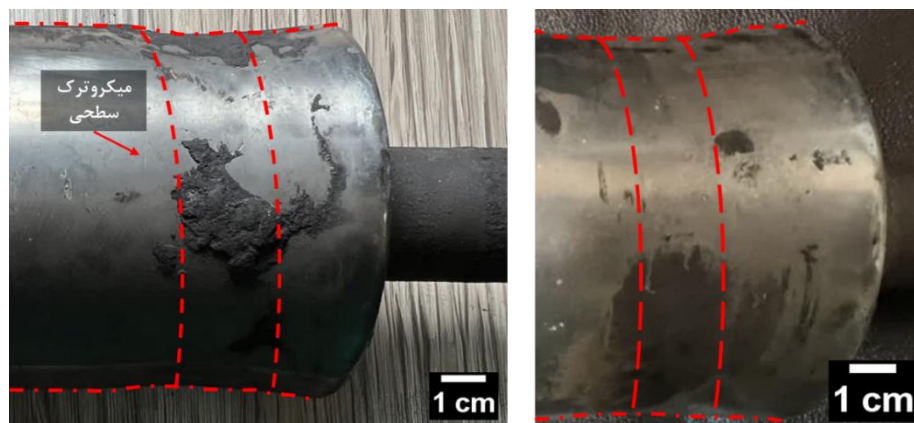
با توجه به اینکه گلوپی‌شدن به صورت منظم در نمونه رخ داده است، این فرضیه مطرح می‌شود که به دلیل اینکه این فولاد تنش تسلیم کمی دارد المان گشتاوری در داخل قطعه به وجود می‌آید و موجب تشکیل این عیب می‌شود. به محض اینکه گلوپی‌شدن در نمونه به وجود می‌آید، گشتاور مجدداً در محل گلوپی‌شدن رخ داده و در فواصل منظم این پدیده انجام می‌شود (شکل ۳). موارد بیان شده در تایید با نتایج پژوهش‌های همکاران (۱۲) نیز می‌باشد و این دلایل می‌تواند از علل تخریب این قطعه باشد. تصویر دیگری از این قطعه در شکل (۴) نمایش داده شده است.

۳-۱-۲- بررسی قطعه فولاد ۱.۴۳۱۳

در بررسی ماکروسکوپی این نمونه‌ها، مشاهده شد که دو نوع عیب به صورت کلی روی سطح رخ داده است. نوع اول عیب همگن بوده که در اثر خوردگی حفره‌ای که به صورت سراسری

بر اساس بازدیدهای میدانی انجام‌شده، مشاهده شد که روی این غلتک‌ها، عیبی مانند فرورفتگی در نمونه به وجود آمده است. این عیوب در نزدیکی دسته‌ها، فواصل یکسانی از قطعه رخ داده‌اند که این نوع عیوب را اصطلاحاً گلوپی‌شدن^۲ می‌نامند (۱۲). این پدیده معمولاً در اثر اعمال تنش‌های مکانیکی فراتر از حد تسلیم ماده رخ می‌دهد. فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ دارای تنش تسلیم حدود ۲۰۵ مگاپاسکال است و در برابر نیروهای فشاری و خمشی ممتد، مقاومت محدودی از خود نشان می‌دهد. در بررسی‌های انجام‌شده، این تغییر شکل عمدتاً در ناحیه‌ای از غلتک مشاهده شد که تحت بیشترین تنش خمشی ناشی از بار مداوم گندله‌ها و تماس با ذرات ساینده قرار داشته است. پژوهش‌های جواهری و همکاران (۱) نیز به صورت عددی با استفاده از روش المان مجزا، نشان داده است که غلتک‌ها در غربال نوار غلتکی تحت نیروهای دینامیکی متغیر از جانب گندله‌ها قرار دارند. در این پژوهش مشخص شده است که نیروهای تماس در نقاط مختلف غلتک، دارای مؤلفه‌های مماسی قابل توجهی هستند که می‌توانند سبب تمرکز تنش و در نتیجه آسیب موضعی شوند. به‌ویژه هنگامی که تفاوت سرعت نسبی میان غلتک‌های مجاور افزایش می‌یابد یا زاویه قرارگیری غربال تغییر می‌کند، این اثر تشدید می‌شود.

مطابق با یافته‌های این تحقیق و در تطابق با نتایج مطالعه جواهری و همکاران، به نظر می‌رسد که پدیده گلوپی‌شدن در غلتک فولاد ۳۰۴، تحت تأثیر مستقیم بارگذاری دینامیکی و نوسانات نیروهای تماس بوده و تمرکز تنش در این ناحیه منجر به تغییر شکل دائمی شده است. لذا پایین‌بودن تنش تسلیم ماده



شکل ۴- تصویری از گلیی شدن در قطعه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴.

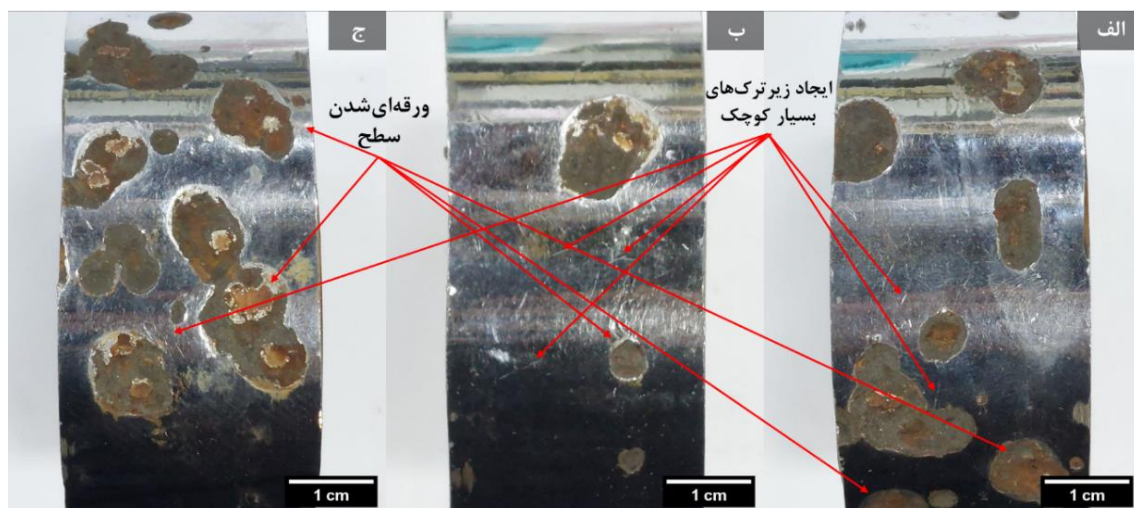


شکل ۵- نمونه برش داده شده از جنس فولاد ۱.۴۳۱۳. (الف) نمونه دارای خوردگی حفره‌ای که به صورت همگن روی سطح مشخص شده است، (ب) نمونه دارای خوردگی حفره‌ای رخ داده بر سطح و عیب موضعی ناشی از بهره‌برداری، (ج) وقوع خوردگی به صورت همگن در سرتاسر قطعه مورد بررسی.

بررسی قطعه فولاد St52 دارای پوشش کروم سخت

در بررسی این نمونه‌ها عیوب رایجی که مشاهده شد، وجود میکروترک‌ها بود که به صورت تصادفی در طول نمونه به وجود آمده بود. همچنین ورقه‌ای شدن در طول نمونه مشاهده شد که نوع آن‌ها با نوع عیوب ناشی از شرایط کاری و عملیاتی متفاوت

روی سطح بوده است مشاهده می‌شود. نوع بعدی عیوب، عیوب موضعی بوده است که مشاهده شده است که این عیوب به صورت تکرارشونده روی سطح رخ نداده است و به همین دلیل از بررسی این نقاط صرف نظر شده است. تصاویر ماکروسکوپی از این عیوب در شکل (۵) قابل مشاهده است.



شکل ۶- بررسی ماکروسکوپی نمونه فولاد ST52 دارای پوشش کروم سخت. (الف، ب و ج) تصاویر نواحی مختلف از قطعه.

جدول ۱- نتایج حاصل از کوانتومتری نمونه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و مقایسه با حالت استاندارد

نمونه	ترکیب شیمیایی (%wt)					
	Cu	Ni	Mo	Cr	Mn	Si
AISI 304	<۰/۷۵	۷/۸-۱۰/۵	<۰/۷	۱۷-۲۰	<۲	<۱
304 Roller	۰/۵	۹/۲۳۰	۰/۲۳	۱۸/۰۳۰	۰/۱۲۰	۰/۰۰۳

جدول ۲- نتایج حاصل از کوانتومتری نمونه فولاد ۱.۴۳۱۳ و مقایسه با حالت استاندارد

نمونه	ترکیب شیمیایی (%wt)							
	Ni	N	Mo	Cr	S	P	Mn	Si
DIN 1.4313	۳/۵-۴/۵	>۰/۰۲	۰/۳-۰/۷	۱۲-۱۴	<۰/۰۱۵	<۰/۰۴۰	<۱/۵	<۰/۰۷
1.4313 Roller	۸/۵	۰/۰۳	۰/۵	۱۳	۰/۰۰۷	۰/۰۲۹	۱/۳۹	۰/۴۲۹

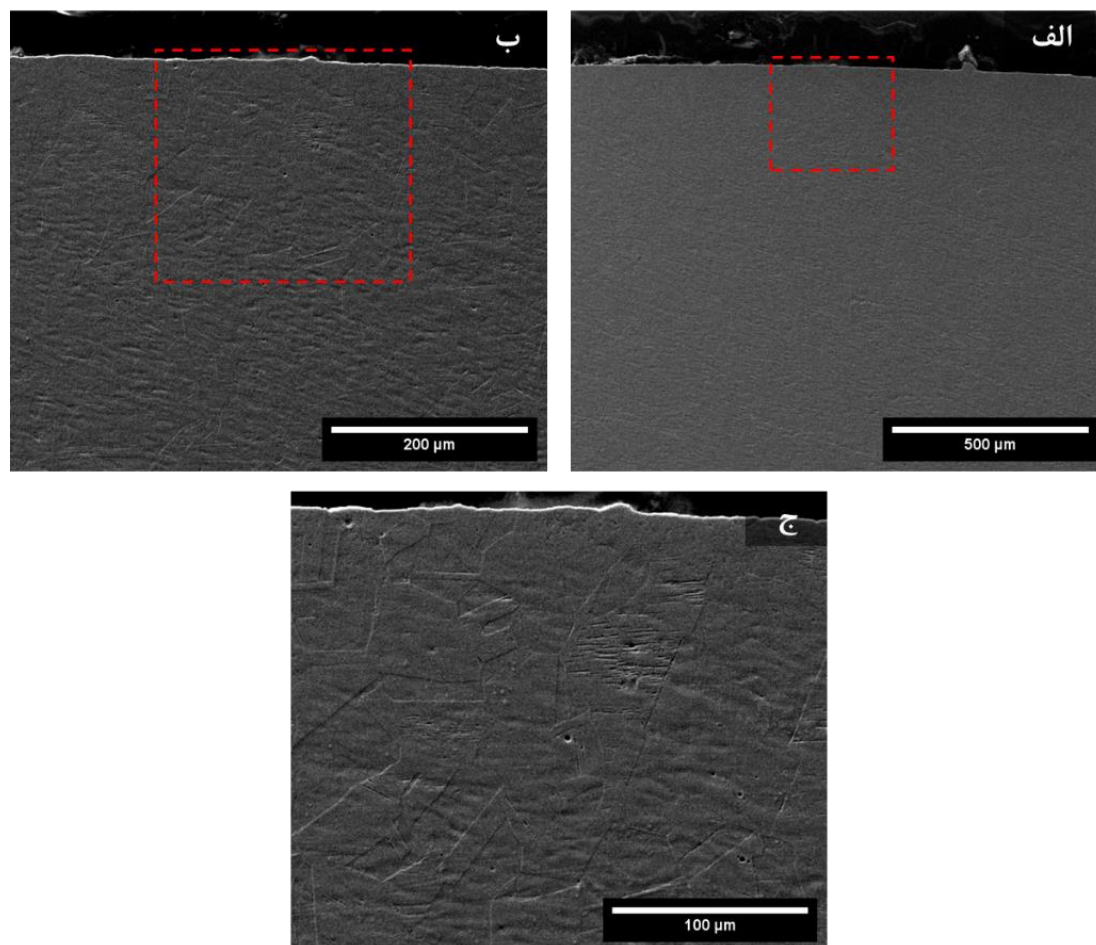
جدول ۳- نتایج حاصل از کوانتومتری نمونه فولاد ST52 دارای پوشش کروم سخت و مقایسه با حالت استاندارد

نمونه	ترکیب شیمیایی (%wt)				
	S	P	Mn	Si	C
DIN St52	<۰/۰۲۵	<۰/۰۲۵	<۱/۶	<۰/۵۵	<۰/۲۲
St52 Roller	۰/۰۴۵	۰/۰۴۵	۱/۶۱	۰/۶۳	۰/۲۳

۲-۳- کوانتومتری نمونه‌ها

نتایج حاصل از بررسی ترکیب شیمیایی نمونه‌های مورد استفاده که طبق آزمون کوانتومتری انجام شده است، در جداول (۱) تا (۳) ارائه شده است.

بود. بررسی سطحی نمونه با استفاده از نرم افزار ImageJ، نشان داد که قطر متوسط عیوب ورقه‌ای شدن در حدود ۵/۹ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۶).



شکل ۷- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی^۴ از نمونه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در بزرگ‌نمایی‌های مختلف.

طیف‌سنجی پرتو انرژی اشعه ایکس^۵ استفاده شده است که در ادامه نتایج حاصل ارائه شده است.

نتایج آنالیز EDS برای ترکیب شیمیایی نمونه، مشابه نتایج حاصل از کوانتومتری است و اختلاف جزئی ناشی از عدم توانایی و خطای روش EDS در اندازه‌گیری مقادیر بسیار کم مواد است. نتایج آنالیز عنصری از سطح به سمت عمق نمونه، تغییرات بسیار ناچیزی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده عدم استفاده از پوشش یا به‌کارگیری روش‌های عملیات حرارتی روی نمونه است. تصاویر مربوط به آنالیز در شکل (۸) قابل مشاهده است.

با توجه به اینکه فرایند ساخت این نمونه به بهترین نحو صورت گرفته است و هیچ‌گونه آثاری از عیوب و آخال در آن مشاهده نمی‌شود، علت تخریب این نمونه‌ها وجود گشتاور ثانویه بوده که بر نمونه اعمال شده و به علت تنش تسلیم پایین فولاد

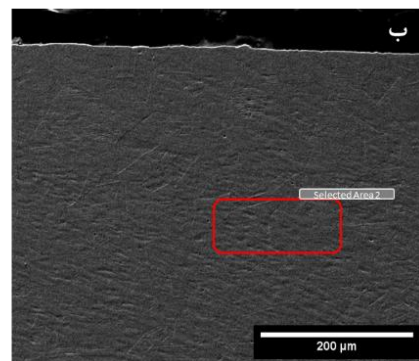
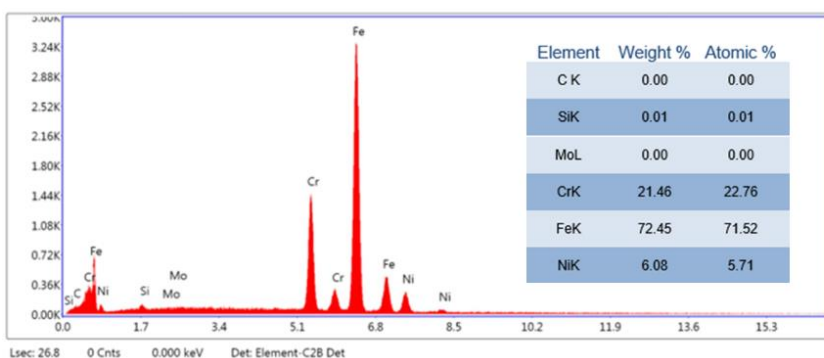
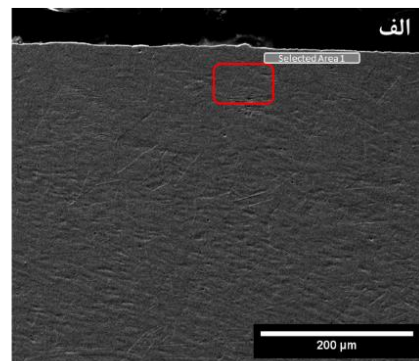
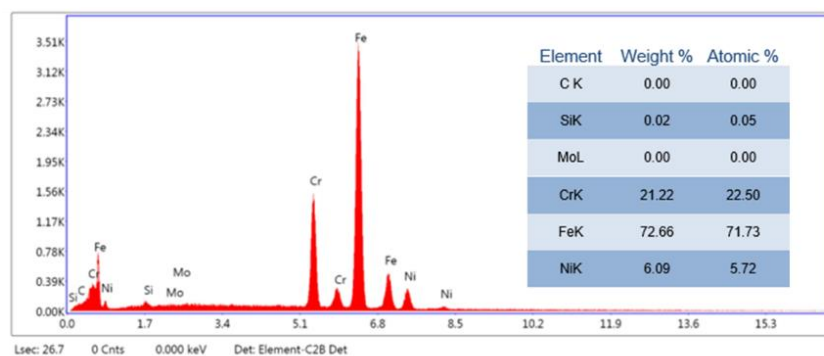
نتایج حاصل از کوانتومتری نمونه‌های مورد آزمایش با استاندارد مربوط به هر یک از این نمونه‌ها مقایسه شد و مشخص شد که نمونه‌ها در تطابق کامل با استانداردها بودند.

۳-۳- بررسی‌های میکروسکوپی الکترونی

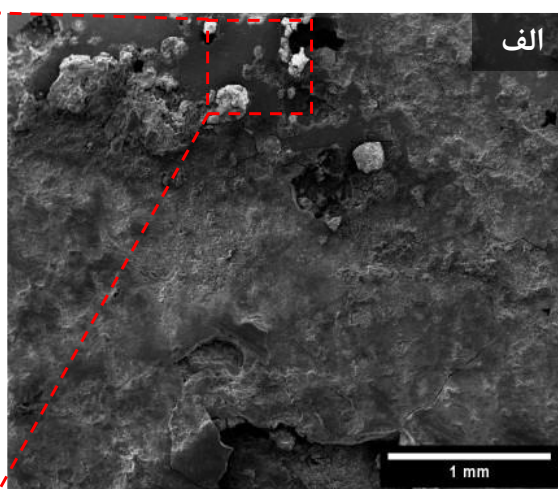
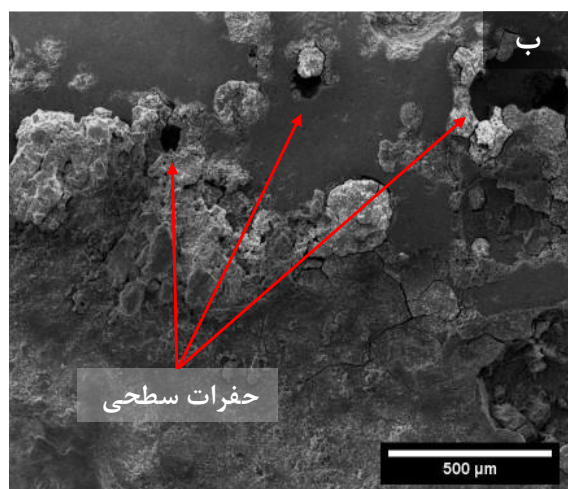
بررسی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

در بررسی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، ابتدا بررسی‌های ریزساختاری انجام شد. مطابق شکل (۷)، تصویری از ریزساختار نمونه در بزرگ‌نمایی‌های متفاوت قابل مشاهده است.

همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپی این نمونه‌ها مشاهده می‌شود، هیچ‌گونه عیبی در داخل ساختار وجود ندارد و تولید نمونه به بهترین صورت انجام گرفته است. به‌منظور بررسی حضور فازهای مختلف و توزیع عناصر گوناگون از آنالیز



شکل ۸- نتایج حاصل از آنالیز EDS ناحیه‌ای در نمونه فولاد زنگ‌زن ۳۰۴.



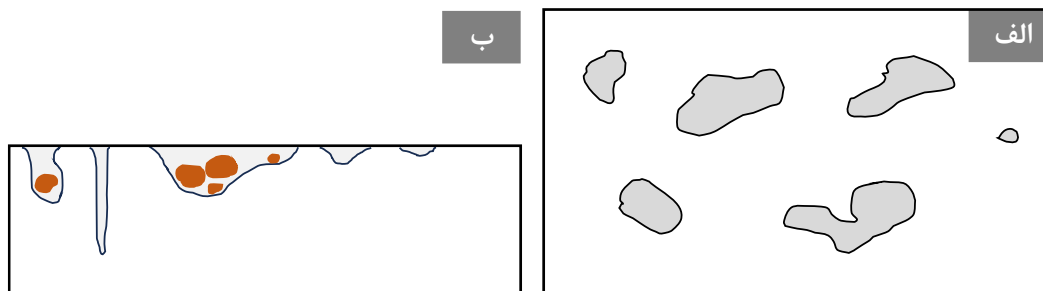
شکل ۹- تصویر SEM از سطح نمونه فولاد ۱.۴۳۱۳ که مشاهده می‌شود حفرات روی سطح تشکیل شده‌اند.

حفرات متعدد روی سطح نمونه است. حفرات موجود روی سطح، در ابعاد و اندازه‌های مختلفی روی سطح نمونه وجود داشته و عمق هریک نیز متفاوت می‌باشد. تصویر میکروسکوپی الکترونی از حفرات در بزرگ‌نمایی‌های مختلف را می‌توان در شکل (۹) مشاهده کرد.

زنگ‌زن ۳۰۴، عیب گلولی شدن در آن‌ها رخ می‌دهد و این عیب می‌تواند متأثر از مشکلات بهره‌برداری باشد.

بررسی فولاد ۱.۴۳۱۳

در بررسی این نمونه، تصاویر میکروسکوپی نشان‌دهنده وجود



شکل ۱۰- طرح‌واره (الف) حفرات با اندازه‌های مختلف، (ب) عمق مختلف حفرات تشکیل شده روی سطح.

بزرگ‌نمایی‌های بالاتر، داخل و کنار برخی از حفرات تشکیل شده روی سطح، میکروتترک‌هایی در حال تشکیل هستند. حضور مواد شارژ در داخل حفرات، موجب وقوع سایش در نمونه می‌شود که به واسطه خوردگی که روی سطح قطعه در حال تشکیل است، این پدیده اثر هم‌افزایی پیدا کرده و موجب تشدید این موضوع می‌شود (۱۳).

جهت بررسی اینکه وقوع خوردگی حفره‌ای عوامل تشدیدکننده‌ای نیز دارد یا خیر، مقطع نمونه‌ها نیز مورد ارزیابی آنالیز EDS قرار گرفت. در شکل (۱۳) که مرکز یک حفره نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که مقادیر آهن بسیار کم شده است و زمینه فولادی در این ناحیه وجود ندارد و جدایش کروم اتفاق افتاده است. حضور عناصر منگنز، سیلیسیم و اکسیژن نیز مؤید این است که نقطه انتخاب شده، آخال است. با توجه به این موضوع، این فرضیه مطرح می‌شود که یکی از عواملی که می‌تواند منجر به وقوع خوردگی حفره‌ای به‌صورت همگن در نمونه باشد، وجود مشکلات ساختاری است. به‌منظور بررسی مشکلات ساختاری بر رخ دادن خوردگی حفره‌ای، ساختار این فولاد نیز مورد بررسی قرار گرفت.

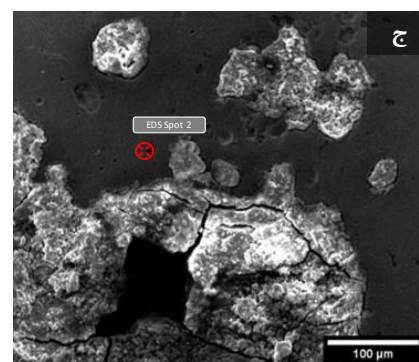
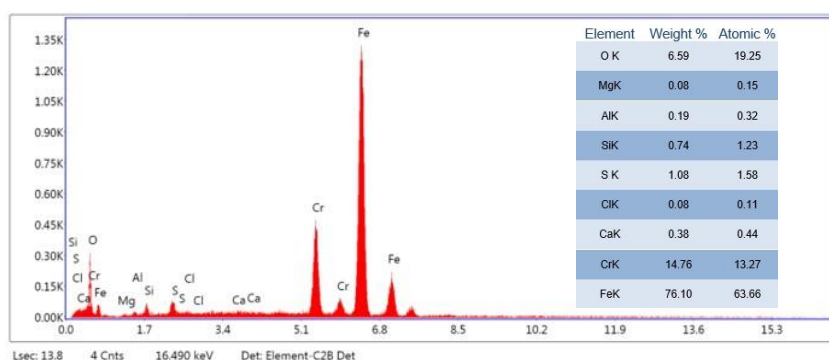
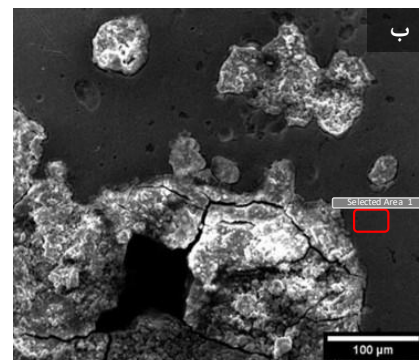
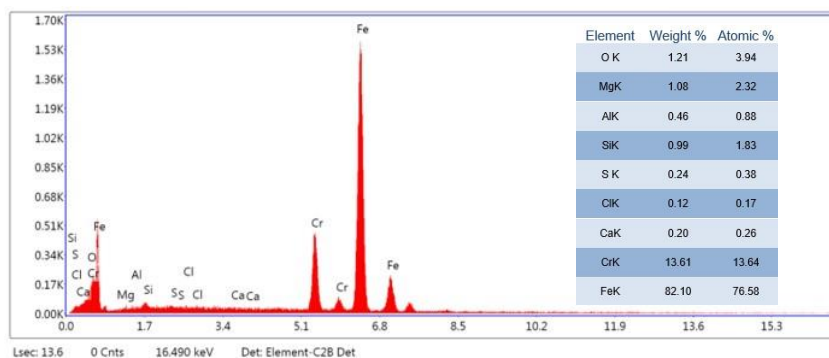
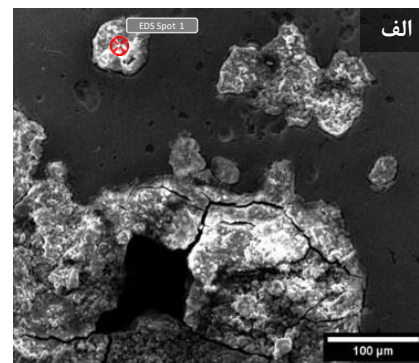
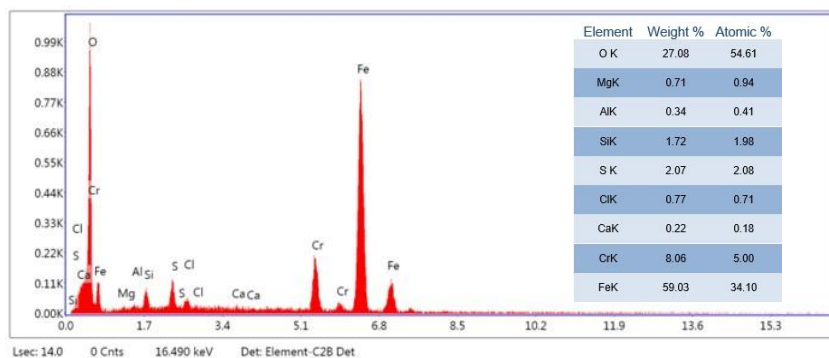
همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، در کنار این ناحیه، آخال‌های متعدد دیگری نیز قرار گرفته‌اند و مناطق مستعد جهت ایجاد حفرات را تشکیل می‌دهند. در همین راستا نواحی‌ای در نمونه مشاهده شد که به‌نوعی جدایش در آن‌ها رخ داده است. به‌منظور بررسی این پدیده، آنالیز EDS از نقاط مربوطه انجام شد که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در مناطقی که حفرات تشکیل شده‌اند، ذراتی در داخل حفرات قرار گرفته‌اند که مواد شارژ نامیده می‌شوند. این ذرات حتی پس از قراردادن نمونه در دستگاه التراسونیک نیز از داخل حفره خارج نشده‌اند که در ادامه به بررسی بیشتر این ذرات پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که حفرات تشکیل شده روی سطح دارای قطر متوسط ۱۴۰ میکرومتر بوده و عمق مختلفی دارند که طرح‌واره آن‌ها در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.

وجود حفرات با عمق و قطرهای متفاوت و همچنین وجود مواد شارژ داخل آن‌ها، نشان می‌دهد که فرایند تشکیل حفرات فعال بوده و تکرار می‌شود. در بررسی مواد شارژ داخل حفرات، آنالیز EDS روی نقاط و مناطق مختلف انجام شده است که در شکل (۱۱) به بررسی آن پرداخته شده است.

مطابق شکل (۱۱-الف)، آنالیز EDS روی رسوب انجام شده است که براساس بررسی‌های انجام شده، حضور عناصر منیزیم، آلومینیوم و آهن، نشان‌دهنده حضور کنسانتره می‌باشد و حضور عناصر کلر، گوگرد و پتاسیم مربوط به نقش محیط در داخل آن می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در شکل (۱۱-ب)، آنالیز EDS از ناحیه زمینه انجام شده و نتایج حاصل شده در تطابق با آزمون کوانتومتری انجام شده می‌باشد. در شکل (۱۱-ج) نیز قابل ملاحظه است که با توجه به اینکه درون حفره انتخابی تمیز بوده و هیچ‌گونه ذره‌ای در داخل آن قرار ندارد، آنالیز EDS نزدیک به آنالیز زمینه به دست آمده است.

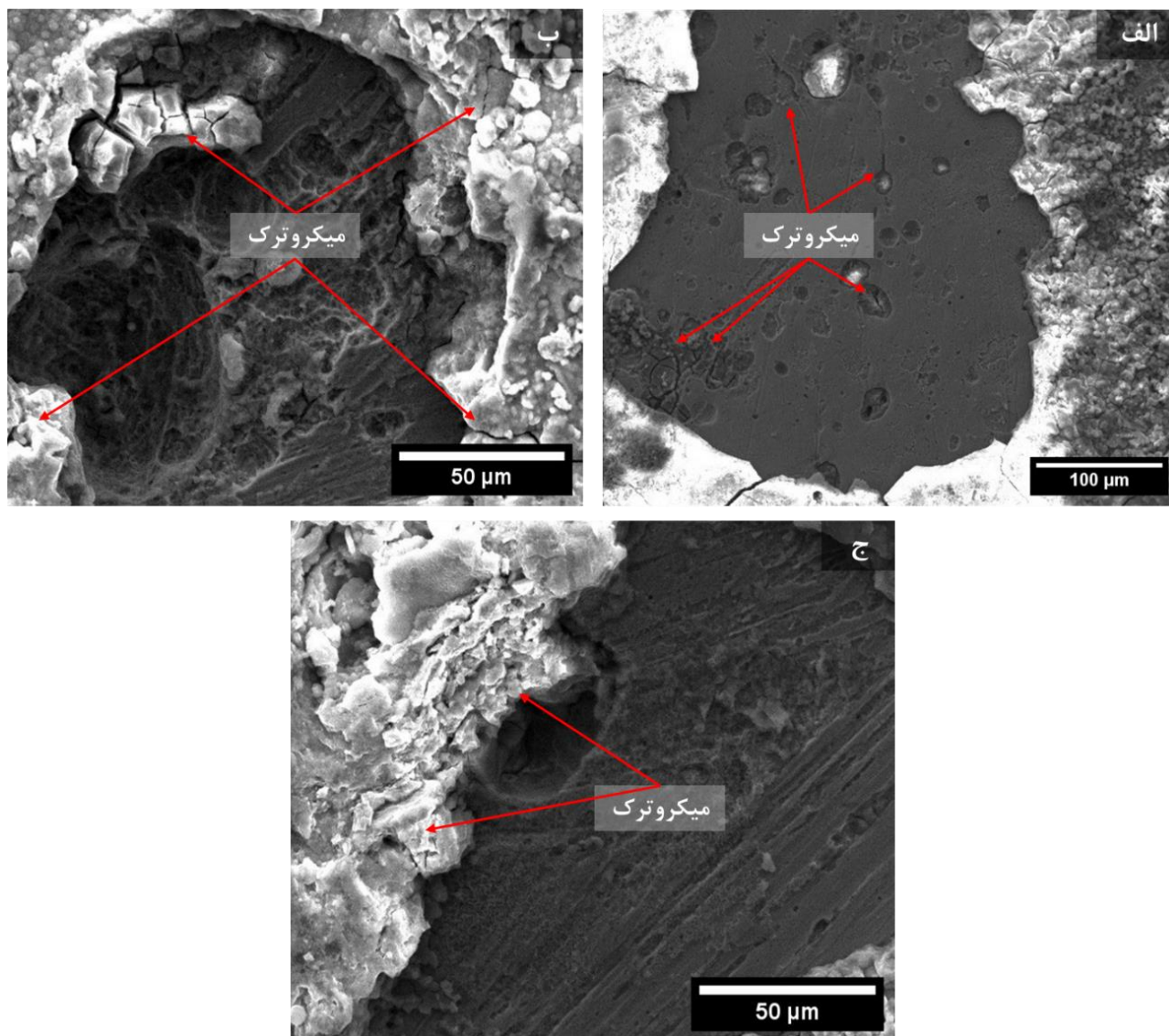
همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، در



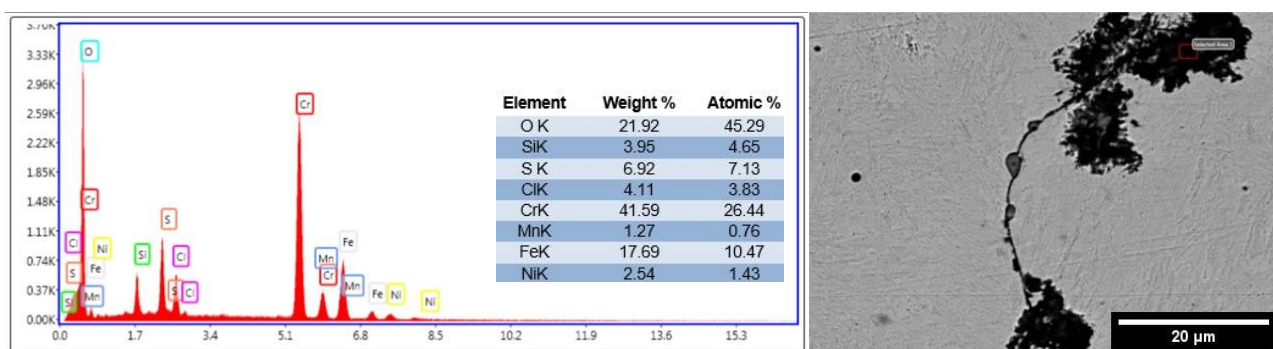
شکل ۱۱- تصاویر آنالیز EDS از نقاط مختلف نمونه: (الف) رسوب داخل حفره، (ب) سطح تمیز نمونه و (ج) سطح داخل حفره تمیز.

آنالیز خطی نشان می‌دهد که کروم داخل زمینه کاهش یافته و در محل جدایش به شدت افزایش پیدا کرده است. همچنین افزایش مقدار اکسیژن نیز نشان می‌دهد که برخی ترکیبات اکسیدی نیز در این ناحیه تشکیل شده‌اند. این مورد می‌تواند به علت مشکلات ناشی از فرایند ساخت نمونه باشد. جهت بررسی اینکه این ناحیه به لحاظ خوردگی ناحیه فعالی می‌باشد، نقشه پراکندگی عناصر نیز مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۶). همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تجمع عنصر کلر در منطقه وجود آخال و حفره بسیار شدید می‌باشد و ناحیه‌ای است که توانایی

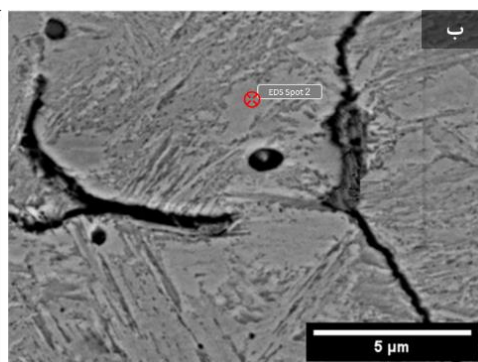
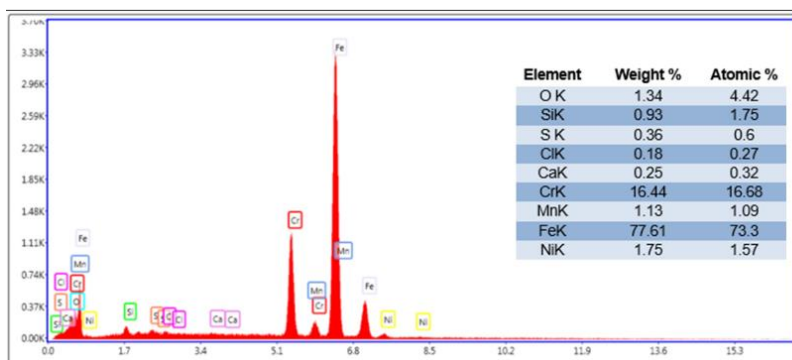
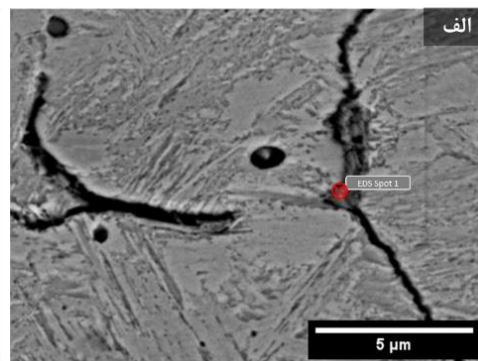
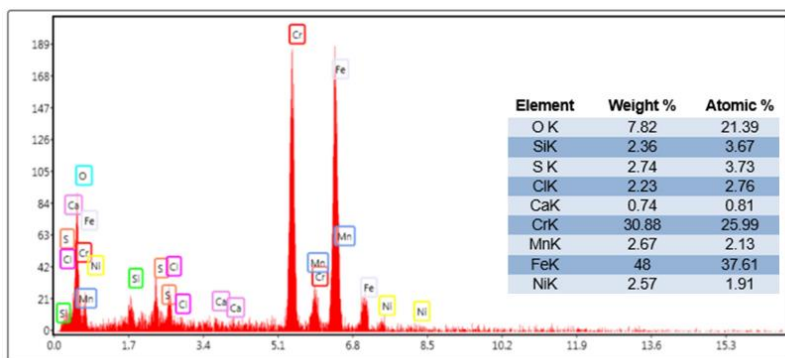
ملاحظه می‌شود که در نقطه اول (شکل ۱۴-الف)، کروم به بیش از ۳۰ درصد وزنی رسیده است؛ درحالی‌که در زمینه این مقدار ۱۶ درصد می‌باشد و مطابق با نتایج آزمون کوانتومتری است. همین موضوع نشان‌دهنده جدایش کروم است که منجر به ایجاد سایت‌های آندی در محل‌های فقیر از کروم شده و نمونه مستعد به ایجاد ترک خوردگی و خوردگی محیطی می‌شود (۱۴). جدایش کروم نیز در نواحی متعددی به صورت تکرارشونده در نمونه مشاهده شده است. جهت بررسی جدایش در این ناحیه، آنالیز خطی نیز مطابق شکل (۱۵) انجام شد.



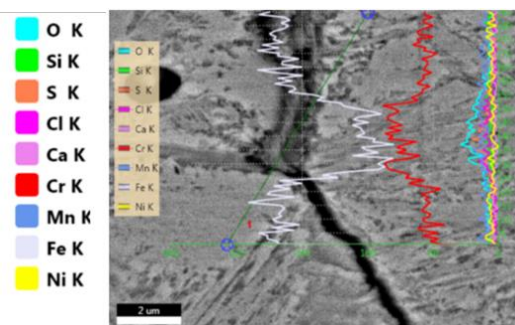
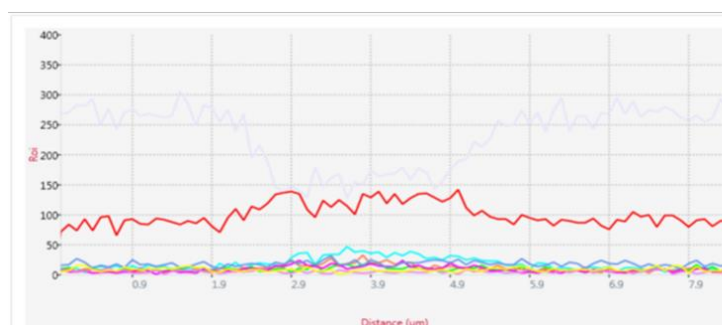
شکل ۱۲- تشکیل میکروترک‌ها در کنار و داخل نواحی خوردگی حفره‌ای که موجب اثرگذاری به صورت هم‌افزایی در نمونه می‌شود.



شکل ۱۳- آنالیز EDS انجام شده روی سطح مقطع فولاد ۱.۴۳۱۳.



شکل ۱۴- آنالیز شیمیایی از ناحیه‌ای که جدایش کروم در آن اتفاق افتاده است.



شکل ۱۵- آنالیز خطی انجام شده روی ناحیه دارای جدایش.

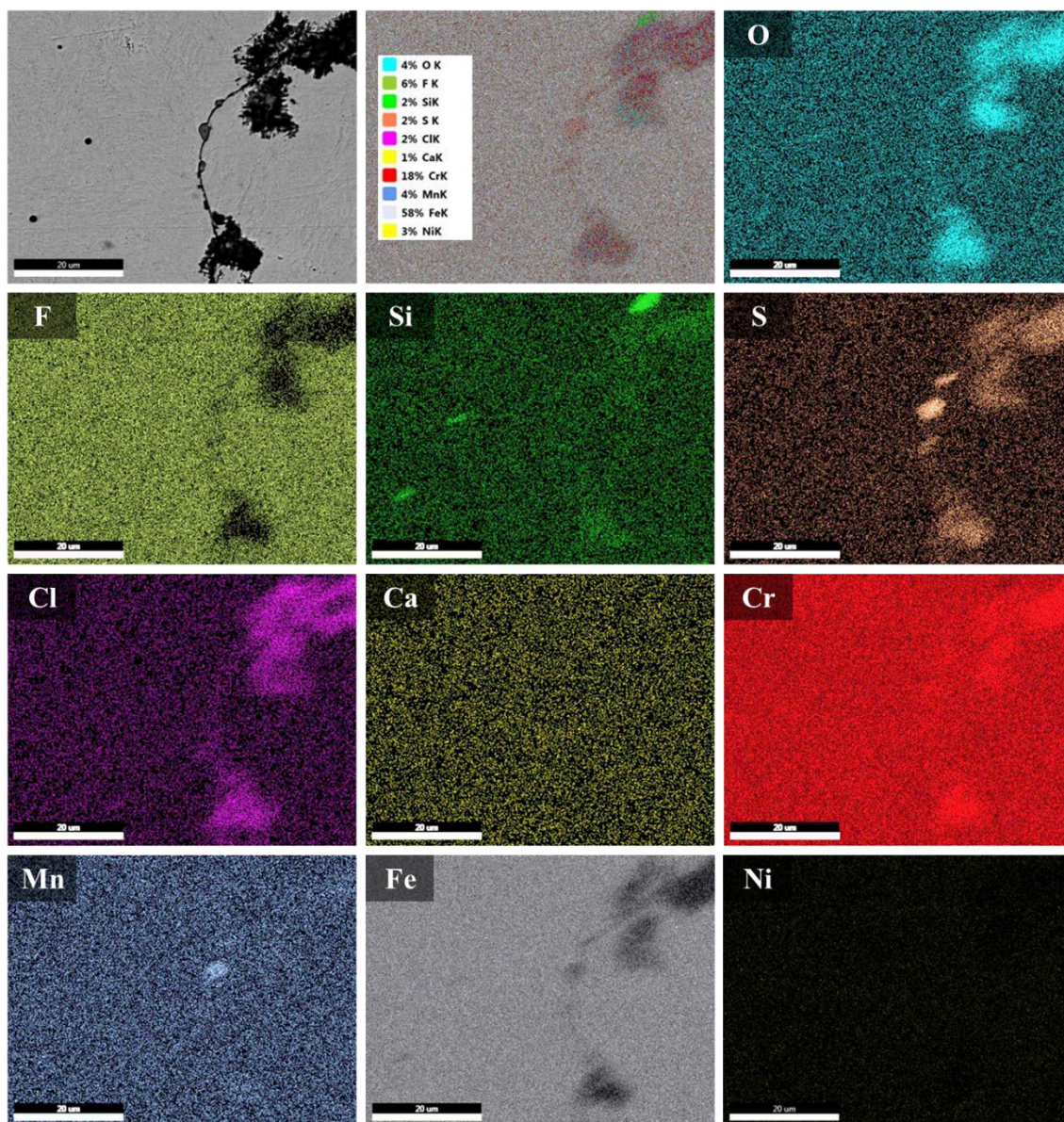
مشکلات موجب خوردگی و همچنین ایجاد سایش در نمونه می‌شود که از علل تخریب این نوع ماده می‌باشد (۱۵). از این ماده به علت وقوع خوردگی و سایش در سرتاسر نمونه نمی‌توان در مدت طولانی استفاده کرد.

بررسی فولاد St52 دارای پوشش کروم سخت

فولاد St52، مقاومت به خوردگی متوسطی دارد که عمدتاً ناشی از ترکیب شیمیایی آن است. حضور سیلیسیم تا حدی مقاومت به

جوانه‌زنی حفرات در آن وجود دارد. پس از شکل‌گیری حفره، وجود مواد شارژ در داخل آن می‌تواند موجب تشدید و بزرگ‌شدن حفره گردد و حفره ماهیت فعال‌بودن داشته باشد.

علی‌رغم اینکه فولاد ۱.۴۳۱۳ یک فولاد مقاوم به خوردگی محسوب می‌شود، اما نقایص ساختاری که در فرایند ساخت ایجاد می‌شوند، این فولاد را نسبت به خوردگی حساس می‌کنند. در نتیجه، با تشکیل حفرات خوردگی، مواد شارژ در داخل این حفرات به دام می‌افتند. همان‌طور که مشاهده شد، وجود این

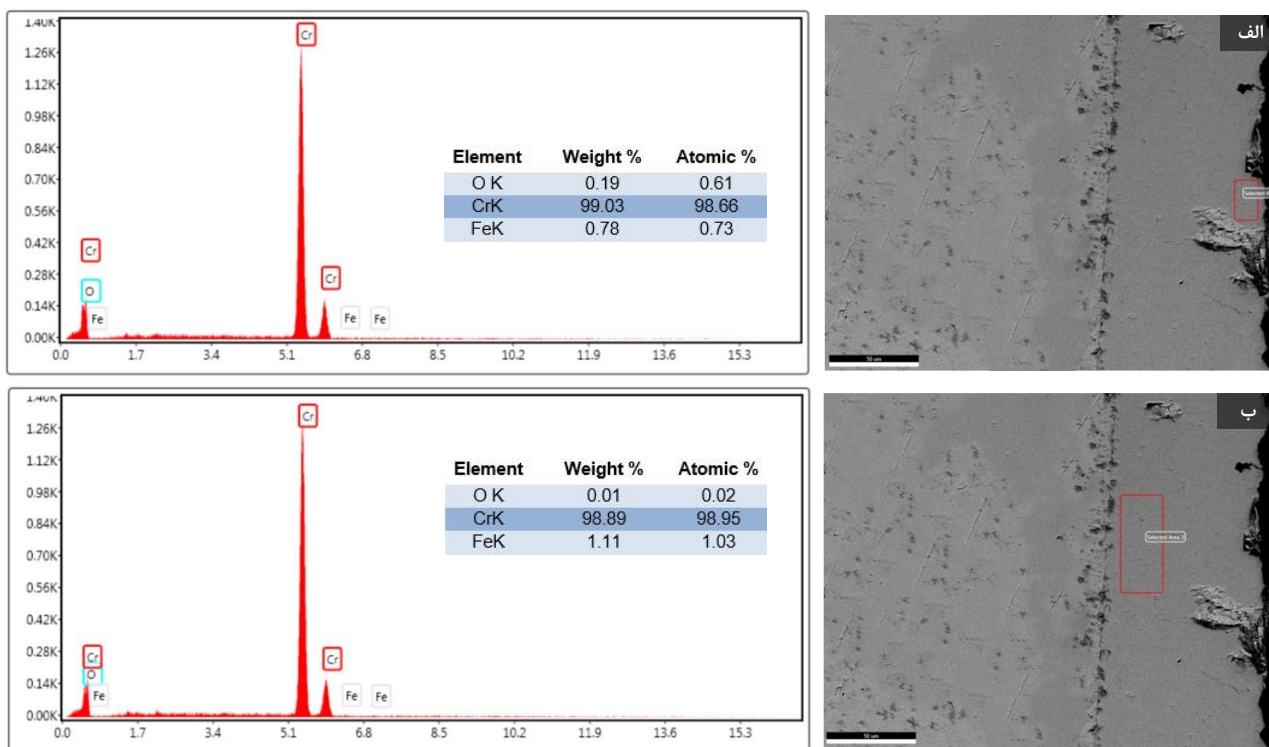


شکل ۱۶- نقشه پراکندگی عناصر موجود در ناحیه تشکیل آخال در فولاد ۱.۴۳۱۳.

قابل توجهی افزایش دهد (۱۶).

برای اعمال پوشش کروم‌سخت روی فولاد St52، آماده‌سازی دقیق سطح شامل مراحل مکانیکی (سنگ‌زنی، سنباده‌زنی یا شات بلاست) و شیمیایی (چربی‌زدایی و اسیدشویی) ضروری است تا ناصافی‌ها، زنگ‌زدگی‌ها و آلودگی‌ها حذف شوند؛ عدم رعایت این مراحل می‌تواند منجر به مشکلاتی مانند عدم چسبندگی، زنگ‌زدگی زیرپوشش، پوسته‌شدن و ترک‌خوردگی شود که کیفیت و عمر مفید پوشش را کاهش می‌دهد.

خوردگی را بهبود می‌بخشد. اما وجود منگنز تأثیر دوگانه‌ای دارد و بسته به محیط مورد استفاده می‌تواند مفید یا مضر باشد. در مجموع، این فولاد در محیط‌های خنثی و کم‌تهاجمی، عملکرد قابل‌قبولی دارد؛ اما در محیط‌های اسیدی، قلیایی یا حاوی کلر، مقاومت محدودی دارد. جهت غلبه بر این مشکل در این نوع فولاد، استفاده از عملیات سطحی مانند پوشش‌دهی پیشنهاد شده است که کروم‌سخت یکی از این پوشش‌ها می‌باشد. پوشش کروم‌سخت می‌تواند مقاومت به خوردگی فولاد St52 را به‌طور



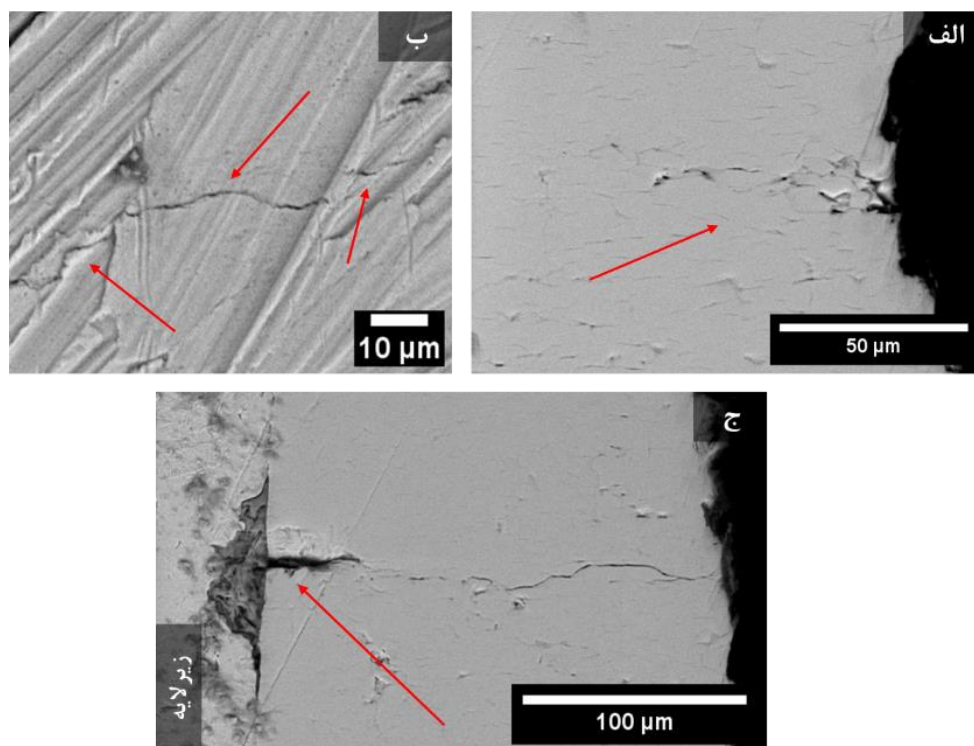
شکل ۱۷- آنالیز EDS انجام شده بر سطح مقطع پوشش کروم سخت اعمال شده بر زیرلایه ST52.

همان‌طور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود، پوشش اعمالی دارای ۹۹ درصد کروم بوده که با توجه به مستعمل بودن نمونه، این میزان خلوص موید کیفیت بالای پوشش می‌باشد. در بررسی میزان ضخامت پوشش اعمال شده، طی بررسی میکروسکوپی این ضخامت به صورت میانگین ۲۰۰ میکرومتر اندازه‌گیری شد. سطح پوشش نیز مورد بررسی قرار گرفت که در شکل (۱۸) نمایش داده شده است. همان‌طور که در قسمت‌های (الف و ب) این شکل مشخص است وجود ریزترک در سطح پوشش و در عمق آن مشهود می‌باشد. در برخی از مناطق مورد بررسی از سطح مقطع نمونه، مشاهده شده است که ترک کل مسیر پوششی را طی کرده و به زمینه رسیده است (شکل ۱۸-ج).

ترک‌های سطحی معمولاً نشان‌دهنده شکنندگی در پوشش‌ها هستند؛ بنابراین می‌توان عملکرد پوشش را ترد در نظر گرفت. با توجه به اینکه خواص ذاتی فولاد St52 با پوشش کروم سخت بسیار متفاوت می‌باشد و طراحی غلتک و پوشش به نحوی است که در محلی به کار گرفته شود که به سازه گشتاور وارد شود (که

یکی از مشکلاتی که در این نوع پوشش‌ها وجود دارد، این است که بتوان سختی مدنظر را در پوشش اعمال کرد؛ چراکه اگر سختی نمونه به اندازه کافی نباشد، در اثر برخورد غلتک‌ها به یکدیگر سطح به سرعت صاف می‌شود. به همین علت، در این پژوهش نمونه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت که دارای سطح صاف نباشد تا از کیفیت پوشش اعمالی اطمینان حاصل شود.

مطابق آنچه در بخش مشاهدات میکروسکوپی بررسی شد، ترک یکی از عیوبی بود که در سرتاسر نمونه قابل رویت بود. همچنین عیوب دیگری نیز روی سطح غلتک‌ها مشاهده شد که به علت تکرارشونده نبودن آن‌ها و عدم تأثیر در بررسی‌های آماری، بررسی نشدند. با توجه به اینکه ترک‌ها به صورت میکروسکوپی قابل مشاهده بودند، این احتمال مطرح می‌شود که ترک‌های در اندازه میکروسکوپی داخل قطعه وجود داشته باشند. به همین علت این موارد توسط میکروسکوپ الکترونی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در اولین مرحله از بررسی این نمونه، کیفیت پوشش مورد بررسی قرار گرفت.



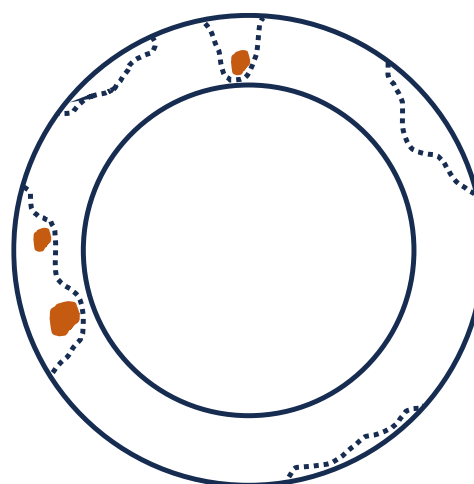
شکل ۱۸- تصویر SEM از پوشش کروم سخت در (الف) سطح مقطع پوشش، (ب) سطح پوشش و (ج) نمونه ترک گسترش یافته تا زیر لایه.

بسیار زیادی ترک در پوشش به وجود آید، دو اتفاق محتمل است:
(۱) ترک‌هایی که به صورت طولی از سطح مقطع عبور کرده و به زیر لایه می‌رسند،

(۲) به هم پیوستن ترک‌ها و ایجاد جدایش در سطح نمونه.
در بررسی جدایش‌ها مشاهده شد که جدایش در عمق‌های مختلفی از نمونه اتفاق افتاده است و در برخی به علت عمق زیاد، مواد شارژ در داخل آن قرار گرفته است و مشابه با فولاد ۱.۴۳۱۳ سایش رخ داده است. طرح‌واره این مورد در شکل (۱۹) آورده شده است.

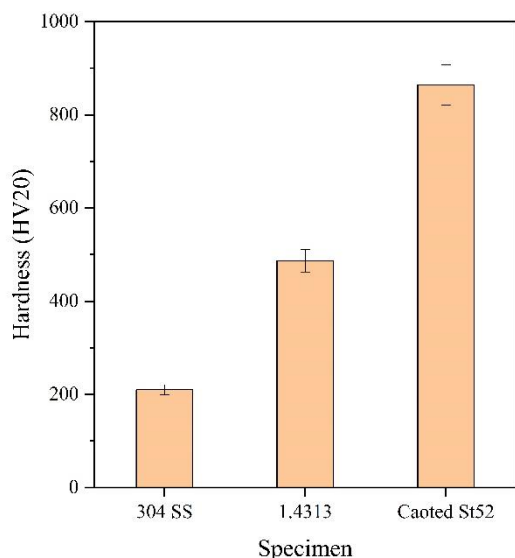
با توجه به این موارد، علت تخریب این ماده سه عامل اصلی دارد:
(۱) ضخامت پوشش برای این نمونه بیشتر از حدی است که نمونه تحمل داشته باشد و ریز ترک‌هایی در آن تشکیل می‌شود؛
(۲) آماده‌سازی سطح با دقت بالایی انجام نشده است که قفل‌های مکانیکی بین سطح و پوشش تشکیل شوند تا چسبندگی به بهترین صورت اتفاق افتد؛

(۳) تمایز زیاد خواص زیر لایه و پوشش، باعث ایجاد عدم تجانس شده است.



شکل ۱۹- طرح‌واره جدایش اتفاق افتاده روی سطح و قرار گرفتن مواد شارژ در داخل برخی از این موارد.

به عنوان یک عامل تخریب در فولاد ۳۰۴ دیده شد، ضخامت پوشش اعمال شده یکی از عوامل بسیار مؤثر بر نمونه خواهد بود. اگر ضخامت زیادتر باشد، به علت تغییر شکل زیر لایه و عدم تغییر شکل در پوشش ترک در آن تشکیل می‌شود. زمانی که تعداد



شکل ۲۰- نتایج حاصل از سختی‌سنجی نمونه‌ها.

۲. در فولاد ۱.۴۳۱۳، وقوع خوردگی حفره‌ای مشاهده شده که ناشی از وجود آخال و عیوب ناشی از فرآیند تولید است. در این فولاد، گیرکردن ذرات شارژ در محل حفرات، به‌عنوان عامل اصلی مشکلات خوردگی و سایش شناسایی شده است. به دلیل عدم یکنواختی در ساختار و جدایش کروم در محل‌های فقیر از کروم، این نوع فولاد در معرض خوردگی قرار دارد. جهت جلوگیری از این مشکلات، باید از فرآیند تولید دقیق‌تری استفاده کرد و نظارت‌های بیشتری بر تولید و کنترل کیفیت صورت گیرد تا مشکلاتی که در بهره‌برداری به وجود می‌آید به حداقل برسد.

۳. فولاد St52 با پوشش کروم‌سخت، در این بررسی با مشکلاتی از جمله ورقه‌ای شدن پوشش و تشکیل میکروترک‌های سطحی روبرو شده است. این ترک‌ها، به دلیل تنش‌های وارد شده به پوشش و عدم تجانس مناسب بین زیرلایه و پوشش ایجاد شده‌اند. ضخامت نامناسب پوشش و عدم آماده‌سازی صحیح سطح زیرلایه نیز از عوامل تشدیدکننده این مشکلات بوده است.

۴. در میان سه گزینه مورد بررسی، فولاد ۱.۴۳۱۳، در شرایط عملکردی مشابه، رفتار پایدارتری از خود نشان داده است. اگرچه در این نمونه‌ها، تخریب به‌صورت خوردگی حفره‌ای مشاهده شده است، اما پیشرفت این نوع آسیب به‌مراتب کندتر و موضعی‌تر از گلوئی شدن ناشی از تغییر شکل پلاستیک در فولاد

با توجه به این موضوع می‌توان جهت غلبه بر این، راه‌حل استراتژی اعمال پوشش را تغییر داد. همچنین با توجه به تمایز ویژگی‌های پوشش و زیرلایه، پیشنهاد می‌شود از فولادی با استحکام بالاتر از فولاد St52 استفاده شود که از نظر ویژگی‌ها با پوشش همخوانی بیشتری داشته باشد و وقوع ترک‌خوردگی در اثر اعمال گشتاور بر آن کاهش یابد.

۳-۴- سختی‌سنجی

نتایج حاصل از سختی‌سنجی که روی نمونه‌های مختلف انجام شده است در شکل (۲۰) قابل مشاهده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمونه دارای پوشش کروم‌سخت از سختی بسیار بالایی برخوردار است. سختی نمونه فولاد ۱.۴۳۱۳ در مقیاس HV20، ۴۸۷ و ویکرز اندازه‌گیری شده است که طبیعتاً کمتر از سختی نمونه دارای پوشش کروم‌سخت می‌باشد. همچنین سختی سطحی نمونه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ نیز ۲۱۰ و ویکرز اندازه‌گیری شده است. برای این نمونه، سختی در عمق‌های مختلف نیز انجام شد که نتایج حاصل از سختی‌سنجی از سطح به عمق، یکسان بوده و حاکی از آن است که روی نمونه عملیات حرارتی انجام نشده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی و تحلیل تخریب سه نوع فولاد پرداخته شد که با توجه به روش بررسی‌های انجام‌شده، موارد زیر نتایج این پژوهش می‌باشند:

۱. در فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، میکروترک‌هایی روی سطح مشاهده شد که به دلیل تنش تسلیم پایین در این نوع فولاد به وجود آمده‌اند. این نوع فولاد، به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی، به‌ویژه خوردگی حفره‌ای، استفاده می‌شود، اما ممکن است در شرایطی که تنش‌های مکانیکی بالا وجود دارند دچار مشکلاتی از جمله گلوئی شدن نمونه شود. برای جلوگیری از این مشکل، پیشنهاد می‌شود از فولادهایی با تنش تسلیم بالاتر استفاده شود تا از وقوع مشکلات در هنگام بهره‌برداری جلوگیری شود.

اگرچه هزینه اولیه ماده ممکن است کمی بیشتر باشد، اما با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌های پوشش‌دهی، افزایش عمر مفید و کاهش هزینه‌های عملیاتی، استفاده از فولاد ۱.۴۳۱۳ از منظر اقتصادی توجیه‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه ارزیابی می‌شود.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از شرکت نظم آوران به‌خاطر همکاری و پشتیبانی فنی ارزشمندشان در انجام این پژوهش اعلام می‌دارند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافع با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

سهم نویسندگان

مریم کرباسی: جمع‌آوری داده‌ها، اعتبارسنجی نتایج، مدیریت منابع، راهنمایی پروژه. **امیر کریمی:** جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر داده‌ها، نوشتن مقاله. **سبحان سعادت:** طراحی و ایده‌پردازی مطالعه. **حمید طالبی زاده سردری:** طراحی و ایده‌پردازی مطالعه. **علی میرزایی:** مطالعه.

۳۰۴ بوده است. همچنین، در مقایسه با ورقه‌ای شدن ترد و جدایش‌گی پوشش در غلتک‌های کروم‌سخت‌شده، تخریب مشاهده‌شده در فولاد ۱.۴۳۱۳ از شدت و گستردگی کمتری برخوردار بوده است؛ بنابراین، با در نظر گرفتن میزان و نوع تخریب، تکرارپذیری آماری شواهد و نیز رفتار سازه‌ای ماده در شرایط بهره‌برداری صنعتی، می‌توان نتیجه گرفت که فولاد ۱.۴۳۱۳ در این مطالعه به‌عنوان گزینه‌ای مناسب‌تر از سایر مواد مورد بررسی مطرح است.

۵. با توجه به ماهیت کاربردی پژوهش و پیشنهاد استفاده از فولاد ۱.۴۳۱۳ به‌جای فولاد St52 (با پوشش کروم‌سخت)، بررسی ابعاد اقتصادی این جایگزینی امری ضروری و قابل توجه است. هرچند قیمت اولیه فولاد ۱.۴۳۱۳ ممکن است اندکی بالاتر از فولاد کربنی متداول باشد، اما حذف نیاز به عملیات پوشش‌دهی کروم‌سخت، که فرآیندی پرهزینه و زمان‌بر محسوب می‌شود، در عمل موجب کاهش هزینه‌های تولید می‌گردد. علاوه‌برآن، تحلیل‌های تخریب نشان داده‌اند که غلتک‌های ساخته‌شده از فولاد ۱.۴۳۱۳ دارای پایداری بالاتر، طول عمر بیشتر و نرخ تخریب پایین‌تری نسبت به سایر گزینه‌ها هستند. در نتیجه، استفاده از این فولاد می‌تواند به‌طور ملموس باعث کاهش دفعات توقف تولید برای تعمیر یا تعویض غلتک، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و افزایش بهره‌وری خطوط تولید گردد. در مجموع،

واژه‌نامه

- | | |
|------------|---|
| 1. deck | 4. scanning electron microscope (SEM) |
| 2. necking | 5. energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) |
| 3. passive | |

مراجع

- | | |
|---|---|
| 1. Javaheri M, Jafari A, Baradaran GH, Saidi A. Effects of rollers speed regime on the roller screen efficiency. Miner Process Extr Metall Rev. 2022;43(5):648-55. https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1916926 | 3. de Moraes SL, de Lima JRB, Ribeiro TR. Iron ore pelletizing process: An overview. In: Arvas A, editor. Iron ores and iron oxide materials. London: IntechOpen; 2018. p. 41-59. http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73164 |
| 2. Jafari A, Javaheri M, Baradaran G. Computer simulation to optimize roller screen settings providing higher efficiency in green pellets classification. Comput Chem Eng. 2022; 161: 107767. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107767 | 4. Andrade AG, Beaudin S, Athayde M. Impact of key parameters on the iron ore pellets roller screening performance. Metall Res Technol. 2022;119(3):311. https://doi.org/10.1051/metal/2022045 |

5. e Silva BB, da Cunha ER, de Carvalho RM, Tavares LM. Improvement in roller screening of green iron ore pellets by statistical analysis and discrete element simulations. *Miner Process Extr Metall Rev*. 2020;41(5):323-34. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1635473>
6. Yang X-D, Zhao L-L, Li H-X, Liu C-S, Hu E-Y, Li Y-W, et al. DEM study of particles flow on an industrial-scale roller screen. *Adv Powder Technol*. 2020; 31(11):4445-56. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.09.020>
7. Mohammadi M, Baharloo A, Salemi H. Investigation of the causes of iron ore adhesion to the rollers of the screening unit in the pelletizing plant. In: 7th International Conference on Materials Engineering and Metallurgy & 12th National Joint Symposium of the Iranian Metallurgical and Materials Engineering Society and the Iranian Casting Society; 2018 May 15–17; Tehran, Iran.
8. Walidi M, Samudra HB, Leksana AMA, Prajitno DH, Tjahaya H. Cyclic Oxidation Behavior of HVOF Thermally Sprayed WC Cermet Based on AISI 1045 Steel. *Maj Ilm Pengkaj Indust; J Indust Res Innov*. 2022;16(2):73-80. <https://doi.org/10.29122/mipi.v16i2.5311>
9. Zhang Q, Wang J, Shen W, Huang F, Zhao Y. Failure Analysis of Chromium Plating Layer on the Surface of the Piston Rod of the Hydraulic Jack. *Coat*. 2022;12(6):774. <https://doi.org/10.3390/coatings12060774>
10. Bai H-d, Zheng B-c, Li W, Tu X-h. Failure analysis of ring die of a feed pellet machine. *China Foundry* 2020;17:167-72. <https://doi.org/10.1007/s41230-020-9104-8>
11. Makhlof ASH, Aliofkhazraei M. *Handbook of Materials Failure Analysis: With Case Studies from the Electronic and Textile Industries*: Elsevier Science; 2019.
12. Shi Z, Liu J, Chen Z, Shao Y, editors. Vibration analysis of a roller bearing with a bump defect. In: *Proceedings of the ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2018)*; 2018 Aug 26–29; Quebec City, Canada. New York (NY): American Society of Mechanical Engineers; 2018. <https://doi.org/10.1115/DETC2018-85060>
13. Huth S. Metallic materials for tribocorrosion systems. In: Mischler S, editor. *Tribocorrosion of passive metals and coatings*. Cambridge: Elsevier; 2011. p. 265–95. <https://doi.org/10.1533/9780857093738.2.265>
14. Kanjanaprayut N, Siripongsakul T, Promdirek P. Intergranular Corrosion Analysis of Austenitic Stainless Steels in Molten Nitrate Salt Using Electrochemical Characterization. *Metals* 2024; 14(1):106. <https://doi.org/10.3390/met14010106>
15. Jansen E, Sloof W, de Wit J. Inclusions in stainless steels—their role in pitting initiation. In: Landolt D, Marcus P, editors. *Modifications of passive films*. Boca Raton (FL): CRC Press; 2023. p. 290–5.
16. Yusron R, Bisoño R, Pramudia M. Effect of electrolyte temperature and electrode distance on electroplating hard chrome on medium-carbon steel. In: *Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series*; 2020. Bristol (UK): IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/4/042007>