هوشمندسازی فرایند تولید تایر با تمرکز بر کاهش ضایعات

محمدصالح نورمندی پور، میثم شیخ حسینی

کارشناس فرایند رادیال باری گروه صنعتی بارز، مدیر فرایند رادیال باری گروه صعنتی بارز

چکیده

صنعت تایرسازی ترکیبی از فرایندهای ناپیوسته و پیوسته شامل اختلاط، کلندرینگ، اکسترژن، کاتینگ، ساخت تایر، پخت و بازرسی نهایی تشکیل شده است که ذاتا فرایندهایی پیچیده، متغیر و انرژی بر هستند. با پیشرفت فناوری های نوین در حوزه صنعت، تولید کنندگان تایر به دنبال استفاده از راهکارهای هوشمند برای ارتقای کیفیت، کاهش ضایعات و بهبود بهره‌وری هستند. این مقاله به بررسی ضرورت ها، مزایا و چالش های پیاده سازی فناوری های دیجیتال نظیر اینترنت صنعتی اشیاء، یادگیری ماشین و سیستم های پایش لحظه ای در صنعت تایرسازی می پردازد. همچنین نقش این فناوری ها در (IIOT) کاهش هزینه های عملیاتی و افزایش رقابت پذیری شرکت ها تحلیل می شود.

واژه های کلیدی: صنعت تایرسازی، هوشمندسازی، اینترنت صنعتی اشیاء، کاهش ضایعات، تولید هوشمند، بهره‌وری انرژی

محور مقاله : فناوری تولید، هوشمندسازی

مقدمه

صنعت تایرسازی به‌عنوان یکی از بخش‌های کلیدی صنایع خودروسازی، همواره با چالش‌هایی چون کیفیت، هزینه و ضایعات تولیدی مواجه بوده است. در فرایند پیچیده تولید تایر، کوچک‌ترین خطا در ترکیب مواد، شکل‌دهی، یا پخت می‌تواند منجر به تولید تایر معیوب شود و در نتیجه هزینه‌های سنگینی را از نظر مالی و زیست‌محیطی به کارخانه تحمیل کند.

با پیشرفت فناوری‌های نوین در حوزه صنعت، راهکارهایی همچون اینترنت صنعتی اشیا(IIoT) ، دیجیتال‌توئین، هوش مصنوعی و بینایی ماشین وارد عرصه تولید تایر شده‌اند. هدف اصلی این فناوری‌ها کاهش ضایعات، افزایش بهره‌وری و تضمین کیفیت محصول نهایی است. هوشمندسازی فرایند تولید تایر پاسخی استراتژیک به این چالش‌هاست. با اتصال حسگرها و تجهیزات به شبکه های IIOT و استفاده از الگوریتم های پیشرفته تحلیل داده، امکان تشخیص زود هنگام انحرافات فرایندی و مداخله به موقع برای جلوگیری از تولید تایرهای معیوب فراهم می شود. برای مثال، پایش لحظه‌ای دمای پرس های پخت می تواند جلوی تولید دسته‌ای از تایرهای نامنطبق را بگیرد. همچنین با بهره‌گیری از بینایی ماشین در خطوط بازرسی می توان کیفیت تایر را در همان لحظه تولید تایید کرد و ضایعات را به حداقل رساند. از سوی دیگر، سامانه های یکپارچه سازی نرم افزاری داده ها به کارخانه اجازه می دهد تا مسیر هر تایر از مواد اولیه تا محصول نهایی را ردیابی کرده و نقاطی را که بیشترین سهم در ضایعات را دارند شناسایی و اصلاح کند. بنابراین کاهش ضایعات نه به صورت واکنشی، بلکه به شکل پیشگیرانه و مبتنی بر داده محصص خواهد شد.

بخش تجربی

بمنظور تحلیل اثرات هوشمندسازی، داده‌های یک کارخانه تایرسازی مورد بررسی قرار گرفت. این داده‌ها شامل شاخص‌های کلیدی تولید قبل و بعد از پیاده‌سازی سیستم‌های هوشمند بودند.

داده‌های مورد بررسی سه شاخص اصلی انتخاب شد:

- نرخ ضایعات تولیدی (Defect Rate)
- مدت توقفات خط تولید (Downtime)
- بهره‌وری کلی تجهیزات(OEE)

مقایسه شاخص های کلیدی قبل و بعد از هوشمندسازی

شاخص	قبل از هوشمندسازی	بعد از هوشمندسازی	میزان تغییرات
نرخ ضایعات	٪۷	٪۳	٪۵۷ کاهش
توقفات خط تولید در ماه	۱۰ ساعت	۷ ساعت	٪۳۰ کاهش
بهره‌وری کلی تجهیزات	٪۸۰	٪۹۴	٪۱۷ افزایش

از تحلیل نتایج مشاهده می شود که بیشترین بهبود مربوط به کاهش ضایعات که به دلیل استفاده از حسگرها والگوریتم های یادگیری ماشین برای شناسایی سریع نقص ها می باشد. کاهش توقفات خط تولید عمدتا ناشی از قابلیت پیش بینی و نگهداری پیشگیرانه بوده است و افزایش ۱۷ درصدی بهره‌وری کلی تجهیزات نشان دهنده بهبود جامع در عملکرد تجهیزات در خطوط تولید است[۱] ، [۵].

فناوری‌های کلیدی در کاهش ضایعات

الف) بینایی ماشین و هوش مصنوعی

سیستم‌های بینایی ماشین با استفاده از دوربین‌های پرسرعت و الگوریتم‌های یادگیری عمیق، قادر به شناسایی سریع عیوب در تایر هستند. تشخیص ترک‌ها و شکاف ها، شناسایی حباب‌ها و هواهای حبس شده و نیز یافتن نقص‌های ساختاری این قابلیت‌ها در مراحل میانی تولید یا پس از پخت باعث کاهش دوباره‌کاری و افزایش کیفیت می‌شوند [۲] ، [۳].

ب) دیجیتال‌توئین و شبیه‌سازی

دیجیتال‌توئین (Digital Twin) با شبیه‌سازی کل فرایند تولید، امکان پیش‌بینی و کنترل شرایط بحرانی مانند دمای پخت یا توزیع فشار در قالب تایر را فراهم می‌سازد. در این فناوری با کاهش خطاهای ناشی از تنظیمات نادرست و بهینه‌سازی مداوم خطوط تولید باعث افزایش بهره‌وری و کاهش ضایعات تولید می شود [۹] ، [۱۰].

ج) یکپارچه سازی نرم افزاری داده ها

اینترنت صنعتی اشیا (IIoT)با اتصال حسگرها، ماشین‌آلات و سیستم‌های کنترلی، امکان جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها را فراهم می‌آورد. پروتکل‌هایی مانند OPC UAکه یک استاندارد ارتباطی (مجموعه‌ای از چند پروتکل) ماشین به ماشین ایمن و به‌روز برای انتقال داده‌های سنسوری، وضعیت عملکرد تجهیزات و دستورات کنترلی میان دستگاه‌ها و سیستم‌های اتوماسیون صنعتی است و نیز MQTTکه یک پروتکل پیام رسانی ساده و مناسب برای ارتباط بین دستگاه های IIoTاست نقش مهمی در تبادل داده و یکپارچگی سیستم‌ها دارند [۶] ، [۷].

د) امنیت سایبری و قابلیت اطمینان

با افزایش سطح هوشمندسازی، امنیت سایبری به یک اولویت مهم تبدیل می‌شود. استاندارد ISA/IEC 62443چارچوبی برای محافظت از خطوط تولید در برابر حملات سایبری فراهم می‌آورد و از صحت داده‌ها و تداوم عملیات اطمینان می‌دهد [۸].

کاربردهای عملی در صنعت تایرسازی

مرحله اختلاط (Banbury): پایش آنلاین دما، فشار و گشتاور موجب جلوگیری از انحراف فرایند و کاهش تولید مخلوط معیوب می‌شود [۱] ، [۵].

مرحله شکل‌دهی (TBM): سیستم‌های بینایی ماشین جایگزین کنترل کیفیت چشمی سنتی شده و دقت تشخیص عیوب را افزایش می‌دهند [۲] ، [۳].

مرحله پخت (Curing): شبیه‌سازی دیجیتال‌توئین امکان پیش‌بینی الگوهای توزیع دما و فشار را فراهم می‌سازد و به کاهش لاستیک‌های معیوب کمک می‌کند [۹] ، [۱۰].

بازرسی نهایی: استفاده از X-Rayو الگوریتم‌های یادگیری عمیق، ضایعات ناشی از عیوب پنهان تایر را کاهش می‌دهد [۲] ، [۴].

مزایا و چالش‌های پیاده‌سازی

۱- مزایا:

کاهش ضایعات تولیدی و افزایش راندمان استفاده از مواد اولیه

افزایش قابلیت ردیابی داده‌ها و بهبود مدیریت کیفیت

کاهش هزینه‌های ناشی از دوباره‌کاری و اسقاط تایر

ارتقای ایمنی و قابلیت اطمینان خطوط تولید

۲- چالش‌ها:

نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا برای خرید تجهیزات و نرم‌افزارهای پیشرفته

پیچیدگی در یکپارچه‌سازی فناوری‌های IIoT، دیجیتال‌توئین و بینایی ماشین [۶] ، [۷].

مخاطرات امنیت سایبری و نیاز به پیاده‌سازی استانداردهای جامع [۸]

کمبود نیروی انسانی متخصص در زمینه تحلیل داده و هوش مصنوعی

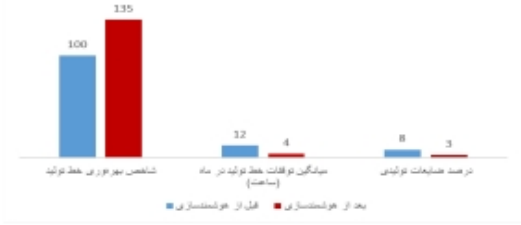
پیچیدگی پیاده‌سازی نگهداری پیش‌بینانه (PdM)در محیط‌های واقعی [۱۱] ، [۱۲]

جمع‌بندی و آینده‌پژوهی

هوشمندسازی فرایند تولید تایر نه‌تنها باعث کاهش ضایعات و هزینه‌ها می‌شود، بلکه کیفیت و پایداری فرآیند را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. استفاده از بینایی ماشین، دیجیتال‌توئین، IIoTو سیستم‌های امنیتی صنعتی، مسیر حرکت کارخانه های تایرسازی را به سمت کارخانه‌های هوشمند و خودمختار هموار می‌سازد [۹] ، [۱۰].

در آینده نزدیک، انتظار می‌رود که ادغام کامل هوش مصنوعی، نگهداری پیش‌بینانه (PdM)و دیجیتال‌توئین، امکان مدیریت داده ها و تصمیم‌گیری خودکار را در خطوط تایرسازی فراهم کند [۱۱] ، [۱۲].

در نهایت بمنظور تحلیل اثرات هوشمندسازی، داده‌های فرضی از کارخانه تایرسازی (فرضی اما مبتنی بر داده‌های صنعتی معتبر) مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به این نمودار استفاده از سیستم‌های هوشمند باعث کاهش چشمگیر ضایعات و افزایش بهره‌وری تولید می‌شود و همچنین نگهداری پیش‌بینانه (Predictive Maintenance)توسعه زمان خواب خط تولید رو بیش از ٪۶۵ کاهش بدهد.



مراجع

[1]C. Zhao, A. Cao, L. Wang, and M. Gao, "Analysis of effect on temperature field of tire curing process by initial temperatures and condensate discharging," Applied Thermal Engineering, vol. 257, 124424, 2024.

[2]A. Cozma, L. Harris, H. Qi, P. Ji, W. Guo, and S. Yuan, "Defect Detection in Tire X-Ray Images: Conventional Methods Meet Deep Structures," arXiv:2402.18527, 2024.

[3]R. A. A. Saleh et al., "End-to-end tire defect detection model based on transfer learning," Neural Computing and Applications, 2024.

[4]S.-L. Lin, Z.-C. Jiang, and C.-H. Chang, "Research on tire crack detection using image deep learning," Scientific Reports, vol. 13, 2023.

[5]M. Hynek, "Thermal analysis of tyre curing process," in Proc. Engineering Mechanics, 2011, pp. 46–49.

[6]OPC Foundation, "OPC 10000-1: UA Part 1—Overview and Concepts," ver. 1.05.04, 2024.

[7]OASIS, "MQTT Version 5.0," OASIS Standard, 2019.

[8]ISA/IEC 62443 Series, "Security for Industrial Automation and Control Systems," ISA/IEC 62443, 2021–2024.

[9]Y. Lu, C. Liu, I. J. Xu, H. Wang, and X. Liang, "Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues," Journal of Manufacturing Systems, vol. 58, pp. 346–361, 2020.

[10]K. Iranshahi, A. Mosavi, and P. Ghamisi, "Digital twins: Recent advances and future directions in manufacturing," Digital Chemical Engineering, 2025.

[11]C. Krupitzer et al., "A Survey on Predictive Maintenance for Industry 4.0," arXiv:2002.08224, 2020.

[12]D. Neupane, M. R. Bouadjenek, R. Dazeley, and S. Aryal, "Data-driven Machinery Fault Detection: A Comprehensive Review," arXiv:2405.18843, 2024.