از اکسترودر سنتی تا اکسترودر هوشمند: مسیر تحول فناوری اکستروژن در صنعت لاستیک

احمد موذن زاده، محمدصالح نورمندی پور

سرپرست فرایند آماده سازی رادیال باری گروه صنعتی بارز، کارشناس فرایند رادیال باری گروه صنعتی بارز

چکیده

فرایند اکستروژن به عنوان یکی از مراحل کلیدی در تولید محصولات لاستیکی، شامل تایر، تیوب و شیلنگ، نقش بسزایی در کیفیت نهایی محصول و بهره‌وری تولید دارد .اکسترودرهای سنتی با چالش‌هایی متعددی از جمله نوسانات دما و فشار، عدم یکنواختی در ترکیب مواد، سایش مارپیچ و سیلندر، و بروز عیوب سطحی مواجه هستند این مشکلات نه تنها کیفیت محصول را کاهش می‌دهند، بلکه باعث افزایش ضایعات، افزایش هزینه‌های تولید و کاهش بهره‌وری خط تولید می‌شوند با پیشرفت فناوری‌های Industry 4.0، اکسترودرهای هوشمند با بهره‌گیری از سنسورهای پیشرفته، سیستم‌های کنترل پیش‌بینانه و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان مانیتورینگ بدون درنگ فرایند، بهینه‌سازی پارامترهای تولید و پیش‌بینی خطاها را فراهم کرده‌اند .این نوآوری‌ها موجب کاهش چشمگیر عیوب، افزایش یکنواختی کامپاند و ارتقای کیفیت محصولات نهایی می‌شوند و به تولیدکنندگان کمک می‌کنند تا بهره‌وری، صرفه‌جویی در انرژی و ثبات کیفیت را بهبود دهند .مقاله حاضر ضمن بررسی جامع عیوب رایج در اکسترودرهای سنتی، قابلیت‌ها و مزایای اکسترودرهای هوشمند را مورد تحلیل قرار داده، و به بررسی اثرات آن‌ها بر کاهش ضایعات و افزایش بهره‌وری می‌پردازد .همچنین، این مطالعه چشم‌اندازی از مسیر تحول دیجیتال در صنعت لاستیک ارائه می‌دهد و اهمیت هوشمندسازی فرایند اکستروژن را به عنوان یکی از عوامل کلیدی در بهبود کیفیت، کاهش هزینه‌ها و حرکت صنعت لاستیک به سمت تولید پایدار و خودکار نشان می‌دهد .نتایج این بررسی می‌تواند به مهندسان فرایند، مدیران تولید و پژوهشگران در اتخاذ تصمیمات استراتژیک برای ارتقای بهره‌وری و کیفیت محصولات کمک کند.

واژه های کلیدی: صنعت تایرسازی، اکستروژن لاستیک، اکسترودر هوشمند، بهینه سازی فرایند، کاهش عیوب، اینترنت صنعتی اشیاء

محور مقاله : فناوری تولید، هوشمند سازی

مقدمه

فرایند اکستروژن یکی از مراحل اساسی در تولید محصولات لاستیکی، به ویژه تایر، تیوب و شیلنگ، محسوب می‌شود و تأثیر مستقیمی بر کیفیت نهایی محصول، خواص مکانیکی و بهره‌وری خطوط تولید دارد .در این فرایند، کامپاند لاستیکی تحت شرایط دمایی و فشار مشخص از داخل قالب عبور می‌کند تا شکل و ابعاد دقیق محصول بدست آید .کنترل دقیق پارامترهای فرایند از جمله دما، فشار، سرعت و ویسکوزیته کامپاند، نقش حیاتی در کاهش ضایعات و بهبود کیفیت محصولات نهایی دارد [۱].

اکسترودرهای سنتی با چالش‌های متعددی روبه‌رو هستند .نوسانات دما و فشار و عدم یکنواختی در ترکیب مواد، می‌تواند خواص مکانیکی و ظاهری محصول را کاهش دهد [۲] علاوه بر این، سایش مارپیچ و سیلندر، مشکلات تغذیه مواد اولیه و عدم کنترل دقیق سرعت و فشار، موجب بروز عیوب سطحی مانند ترک، حباب و تغییر شکل می‌شوند [۳]این مشکلات نه تنها کیفیت محصول را کاهش می‌دهند، بلکه ضایعات و هزینه‌های تولید را افزایش داده و بهره‌وری خطوط تولید را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۴] با پیشرفت فناوری‌های Industry 4.0، اینترنت صنعتی اشیا (IIoT)، اکسترودرهای هوشمند معرفی شده‌اند که با بهره‌گیری از سنسورهای دقیق، سیستم‌های کنترل پیش‌بینانه و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان مانیتورینگ بدون درنگ و بهینه‌سازی دقیق فرایند اکستروژن را فراهم می‌کنند [۵]این اکسترودرها می‌توانند تغییرات کوچک در ترکیب مواد، دما و فشار را شناسایی و به‌طور خودکار تنظیم کنند، و در نتیجه عیوب محصول به حداقل برسد و یکنواختی کامپاند افزایش یابد [۶].

مروری بر اکسترودرهای سنتی

اکسترودرهای سنتی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین تجهیزات در صنعت لاستیک، نقش حیاتی در تولید تایر، تیوب و شیلنگ ایفا می‌کنند [۱]این دستگاه‌ها مسئول تغییر شکل کامپاند لاستیکی و تبدیل آن به محصول نهایی با ابعاد و خواص مشخص هستند و کیفیت فرایند اکستروژن مستقیماً بر دوام، عملکرد و ظاهر محصول تأثیر می‌گذارد [۲]اکسترودر سنتی معمولاً از اجزای اصلی زیر تشکیل شده است:

۱. مارپیچ : مارپیچ مهم‌ترین بخش اکسترودر است که وظیفه جابه‌جایی، فشرده‌سازی و مخلوط کردن کامپاند لاستیکی را بر عهده دارد .شکل هندسی مارپیچ، زاویه پیچ‌ها، طول و قطر آن تأثیر مستقیمی بر یکنواختی ترکیب، فشار و ویسکوزیته مواد دارد [۳].

۲. سیلندر : سیلندر محیطی است که مارپیچ داخل آن می‌چرخد و کامپاند را هدایت می‌کند .سطح داخلی سیلندر معمولاً با فولاد سخت یا پوشش‌های مقاوم به سایش پوشانده می‌شود تا از فرسایش و آسیب دیدگی در اثر فشار و حرارت جلوگیری شود [۴].

۳. سیستم گرمایشی و سرمایشی :دما یکی از مهم‌ترین پارامترهای فرایند اکستروژن است .سیلندر و مارپیچ معمولاً مجهز به المنت‌های گرمایشی و سیستم‌های خنک‌کننده هستند تا دما در محدوده بهینه حفظ شود و از تخریب حرارتی کامپاند جلوگیری شود [۵].

۴.قالب :قالب شکل نهایی محصول را تعیین می‌کند و خروجی کامپاند از آن عبور می‌کند .کیفیت طراحی قالب و هماهنگی آن با پارامترهای اکسترودر، بر یکنواختی سطح و ابعاد محصول نهایی تأثیر می‌گذارد [۷].

عملکرد اکسترودر سنتی به کنترل دقیق پارامترهای فرایند مانند دما، فشار، سرعت مارپیچ و ویسکوزیته کامپاند وابسته است . هرگونه نوسان یا عدم هماهنگی بین این اجزا می‌تواند منجر به عیوب رایج شود.

اکسترودرهای هوشمند و فناوری‌های نوین

با پیشرفت فناوری‌های صنعت ۴.۰ و افزایش نیاز به کیفیت بالاتر و کاهش ضایعات در تولید تایر، بسیاری از تولیدکنندگان به سمت اکسترودرهای هوشمند حرکت کرده‌اند [۹]این سیستم‌ها مجهز به سنسورها، کنترلرهای پیش‌بینانه و الگوریتم‌های یادگیری ماشین هستند که قادرند پارامترهای فرایند مانند دما، فشار، سرعت مارپیچ و ویسکوزیته را به صورت لحظه‌ای پایش و بهینه‌سازی کنند [۱۰].

اکسترودرهای هوشمند، در مقایسه با سیستم‌های سنتی، نه تنها کیفیت محصول را بهبود می‌دهند، بلکه امکان تصمیم‌گیری سریع و کاهش هزینه‌های عملیاتی را نیز فراهم می‌کنند .این تجهیزات با استفاده از سیستم‌های کنترل پیش‌بینانه و الگوریتم‌های هوش مصنوعی قادرند عیوب رایج مانند حباب، ترک، عدم یکنواختی ترکیب و تغییر شکل ابعادی را پیش‌بینی و اصلاح کنند، پیش از آنکه محصول از قالب خارج شود.

راهکارهای تبدیل اکسترودر سنتی به اکسترودر هوشمند

با توجه به اهمیت کیفیت محصول و کاهش ضایعات، بسیاری از شرکت‌های تایرسازی در جهان، اقدام به ارتقای اکسترودرهای سنتی به سیستم‌های هوشمند کرده‌اند .این تبدیل نه تنها باعث افزایش کارایی و یکنواختی محصول می‌شود، بلکه هزینه‌های عملیاتی و تعمیرات ناگهانی را نیز کاهش می‌دهد [۱۶].

نمودار مقایسه درصد ضایعات در دو اکسترودر هوشمند و سنتی

نمودار درصد بهره‌وری تولید در بازه زمانی سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵

نمودار مقدار انرژی مصرفی بر حسب نوع اکسترودر

همانگونه که در نمودارهای بالا مشاهده می کنید روند بهره وری تولید در گذر زمان از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۲۵ که با پیشرفته شدن اکسترودرها از سنتی به هوشمند به همراه بوده افزایش چشمگیری داشته است. و از طرفی مقدار انرژی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت بر تن در اکسترودر سنتی ۱۲۰ و نیز در اکسترودر هوشمند ۹۵ می باشد که نشان دهنده کاهش مصرف انرژی در این اکسترودرها می باشد.

راهکارهای گذار از اکسترودر سنتی به اکسترودر هوشمند

گذار از اکسترودرهای سنتی به اکسترودرهای هوشمند یکی از مهم‌ترین تحولات صنعت لاستیک‌سازی در دهه اخیر محسوب می‌شود. یکی از نخستین گام‌ها در این مسیر، نصب حسگرهای دقیق دما، فشار، ویسکوزیته و سرعت در بخش‌های کلیدی اکسترودر است .این حسگرها امکان پایش لحظه‌ای شرایط فرایند را فراهم کرده و داده‌های تولیدی را به سیستم‌های کنترلی منتقل می‌کنند [۹]. داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط PLC ها و سیستم‌های SCADA پردازش شده و در قالب داشبوردهای صنعتی در اختیار مهندسان قرار می‌گیرد [۱۱]در مرحله بعد، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌های پیش‌بینی‌کننده به اپراتورها کمک می‌کند تا رفتار مواد درون سیلندر و تغییرات کیفی محصول نهایی را پیش‌بینی کنند [۱۲]. این فناوری به‌ویژه در کنترل ضخامت، یکنواختی کامپاند و کاهش عیوب سطحی بسیار مؤثر است .

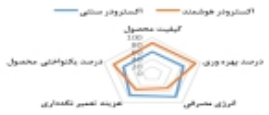
بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به‌کارگیری اکسترودرهای هوشمند در صنعت لاستیک و تایرسازی، تحولی بنیادین در فرایند تولید ایجاد کرده است .از یک سو، کاهش ضایعات تا ۳۰ درصد، بهبود بهره‌وری بین ۱۵ تا ۲۵ درصد و صرفه‌جویی قابل‌توجه در مصرف انرژی از جمله دستاوردهای کلیدی این فناوری هستند [۱۵]، [۱۴]، [۱۲]از سوی دیگر، کنترل دقیق‌تر فرایند، قابلیت پیش‌بینی عیوب و افزایش یکنواختی محصول منجر به ارتقاء کیفیت تایر و کاهش هزینه‌های بازکاری شده است علاوه بر آن، پیاده‌سازی موفق این فناوری نیازمند نیروی انسانی متخصص در زمینه تحلیل داده، نگهداری سیستم‌های اتوماسیون و مدیریت الگوریتم‌های یادگیری ماشین است [۱۴]بنابراین، آموزش و ارتقاء مهارت کارکنان به عنوان یکی از الزامات کلیدی در این مسیر مطرح می‌شود.

نتیجه گیری

تحلیل انجام‌شده در این مقاله نشان داد که اکسترودر به عنوان یکی از حیاتی‌ترین تجهیزات در صنعت لاستیک و تایرسازی، نقشی تعیین‌کننده در کیفیت محصول نهایی و بهره‌وری خط تولید دارد .مقایسه اکسترودرهای سنتی و هوشمند بیانگر آن است که محدودیت‌های مدل‌های سنتی نظیر کنترل ناکافی فرایند، مصرف بالای انرژی، نرخ بالای ضایعات و وابستگی شدید به اپراتور، دیگر پاسخگوی نیازهای روزافزون صنعت نیستند .نتایج گزارش‌شده از شرکت‌های پیشرو نشان می‌دهد که این فناوری‌ها توانسته‌اند به‌طور متوسط باعث کاهش ۳۰ درصدی ضایعات، افزایش ۱۵ تا ۲۵ درصدی بهره‌وری کلی تولید و کاهش ۲۰ درصدی مصرف انرژی شوند .با توجه به روند جهانی در حرکت به سمت صنعت ۴.۰ ، می‌توان نتیجه گرفت که گذار به اکسترودرهای هوشمند نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت استراتژیک برای کارخانه‌های تایرسازی محسوب می‌شود .این تغییر علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، موجب ارتقاء کیفیت، افزایش پایداری تولید و رقابت‌پذیری در بازار جهانی خواهد شد.

در نهایت، می‌توان تأکید کرد که آینده صنعت لاستیک در گرو سرمایه‌گذاری در فناوری‌های هوشمند، آموزش نیروی انسانی متخصص و توسعه زیرساخت‌های دیجیتال است .حرکت در این مسیر می‌تواند صنعت تایرسازی را به سطحی بالاتر از نوآوری، بهره‌وری و پایداری برساند.



نمودار رادار دو نوع اکسترودر سنتی و هوشمند در شاخص های متفاوت

[1] A. Aschemann, "Smart Rubber Extrusion Line Combining Multiple Sensor Technologies for Enhanced Process Control," Advanced Engineering Materials, vol. 27, no. 6, pp. 202401316, 2025. [Online]. Available: https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adem.202401316
[2] "Rubber Extrusion - Common Defects & Troubleshooting," Universal Polymer & Rubber, Jun. 13, 2025. [Online]. Available: https://www.universalpolymer.com/blog/common-defects-in-rubber-extrusion-how-to-prevent them/
[3] "Sustainable Innovations & Technology in Rubber Extrusion," Nufox, Apr. 30, 2025. [Online]. Available: https://www.nufox.com/news/sustainable-innovations-advanced-technologies-ak-rubber-extrusion.
[4] C. M. Jo et al., "In Situ Surface Defect Detection in Polymer Tube Extrusion," Sensors, vol. 24, no. 6, pp. 1791, 2024. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/24/6/1791.
[5] "Innovative AI Solutions for Defect Detection in Rubber Manufacturing Processes," ResearchGate, Jul. 24, 2025.
[6] PIXARGUS, "AI for rubber extrusion: Measurement technology supports researchers in Hannover," [Online]. Available: https://www.pixargus.com/news/article/kuerstliche-intelligenz-fuer-die-kautschukextrusion-messtechnik-von-pixargus-unterstuetzt-forscher-in-hannover/. [Accessed: 22-Sep-2025].
[7] Future Market Insights, "Rubber Extruder Market Size & Forecast 2025 to 2035," [Online]. Available https://www.futuremarketinsights.com/reports/rubber-extrusion-machine-market. [Accessed: 22-Sep-2025].
[8] Future Market Insights, "Rubber Extruder Market Size & Forecast 2025 to 2035," [Online]. Available: https://www.futuremarketinsights.com/reports/rubber-extrusion-machine-market. [Accessed: 22-Sep-2025].
[9] A. Aschemann, "Smart Rubber Extrusion Line Combining Multiple Sensor Technologies," Advanced Engineering Materials, vol. 27, no. 1, pp. 1-10, 2025.
[10] Chem-Trend, "Common Extrusion Defects & How to Resolve Them," [Online]. Available https://in.chemtrend.com/news/common-extrusion-defects-how-to-resolve-them/. [Accessed: 22-Sep-2025].
[11] Continental AG, "Advanced Extrusion Technology in Tire Production," Continental Engineering Journal, vol. 12, pp. 45-53, 2019.
[12] Goodyear, "Predictive Control Systems in Rubber Extrusion," [Online]. Available: https://www.goodyear.com/corporate/news-room/article/predictive-control-rubberextrusion. [Accessed: 22-Sep-2025].
[13] PIXARGUS, "AI for Rubber Extrusion: Measurement Technology Supports Researchers in Hannover," [Online]. Available: https://www.pixargus.com/news/article/kuerstliche-intelligenz-fuer-diekautschukextrusion-messtechnik-von-pixargus-unterstuetzt-forscher-in-hannover/. [Accessed: 22-Sep-2025].
[14] Molex, "Industry 4.0: Where the Rubber Meets the Road," [Online]. Available: https://www.molex.com/en-us/blog/industry-4-0-where-the-rubber-meets-the-road. [Accessed: 22-Sep-2025].
[15] Continental AG, Annual Sustainability Report. Hanover, Germany: Continental Press, 2018.
[16] Goodyear Tire & Rubber Company, Smart Manufacturing and Digitalization Report. Akron, OH, USA: Goodyear, 2020.

1768RIERCO