



کویر تایر

اولین وکیلند قیادیر تیرین ایران

تحلیل داده های صنعتی برای ارتقاء ثبات ابعادی لایه سایدوال در ماشین اکسترودر

سید هاشم محتشمی^۱ - حسین وارسته^۲ - ضیا احراری^۳

مدیر واحد سیستم‌های هوشمند^۱ - مدیر واحد مهندسی تایر^۲ - کارشناس واحد سیستم‌های هوشمند^۳، کویر تایر

۰۹۱۵۵۲۰۵۶۴۶ سید هاشم محتشمی mohtashami.ai@gmail.com

۱۷th

همایش

۹th

نمایشگاه

و

لاستیک

و صنایع وابسته

17th

Conference

And 9th

Exhibition

Rubber

And

Related Industries

ایران مال

۱۸ تا ۲۱ دی ماه

۱۴۰۴

Iranmall

January 6-7

2026

چکیده

کنترل دقیق ابعاد لایه‌های تایر، به‌ویژه لایه سایدوال، یکی از عوامل کلیدی تضمین کیفیت در خطوط تولید تایر است. در این مقاله، از داده‌های بلندمدت پایش عرض لایه سایدوال در ماشین اکسترودر با استفاده از سیستم‌های پردازش تصویر پیشرفته بهره گرفته‌شده است. داده‌های تاریخی عرض لایه در بازه زمانی چندساله مورد تحلیل آماری و الگویی قرار گرفته‌اند تا روندهای تغییرات، نوسانات زمانی و انحرافات از مقدار اسمی شناسایی شوند. با ادغام داده‌های پایش عرض با پارامترهای فرآیندی (مانند دما، سرعت خط و تنظیمات ماشین)، روابط احتمالی بین متغیرهای عملیاتی و نوسان عرض لایه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که نوسانات معناداری در عرض لایه در شیفتهای مختلف و شرایط دمایی خاص رخ می‌دهد که می‌تواند به تنظیمات نامناسب یا تغییرات مواد اولیه مرتبط باشد. یافته‌های این تحلیل داده، زمینه‌ساز ارائه راهکارهای عملیاتی برای بهبود ثبات فرآیند و کاهش ضایعات در تولید لایه سایدوال شده است. این رویکرد داده‌محور، گامی مؤثر در جهت هوشمندسازی خطوط تولید در صنعت تایر محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پایش عرض لایه، ماشین اکسترودر، تحلیل داده، کنترل کیفیت، هوشمندسازی تولید، لایه سایدوال.

محور مقاله: مدیریت بهره‌وری / رهبری در راستای توسعه فناوری و نوآوری - راهکارهای افزایش بهره‌وری

مقدمه:

در صنعت تولید تایر، دستیابی به کیفیت بالا و ثبات ابعادی در تمامی لایه‌های تشکیل‌دهنده تایر، از جمله لایه سایدوال، یکی از اهداف اساسی خطوط تولید است. لایه سایدوال علاوه بر عملکرد ساختاری در تحمل بار جانبی و جذب ضربه، از نظر ظاهری نیز بخشی از هویت بصری تایر محسوب می‌شود. هرگونه ناهمگونی در عرض یا ضخامت این لایه - چه به صورت موضعی و چه سیستماتیک- می‌تواند منجر به رد شدن محصول در بازرسی نهایی، افزایش ضایعات، و در موارد حاد، تأثیر منفی بر ایمنی خودرو شود. بنابراین، کنترل دقیق و مستمر ابعاد لایه سایدوال در طول فرآیند تولید، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

یکی از حساس‌ترین مراحل تولید لایه سایدوال، عبور از ماشین اکسترودر است. در این ماشین، سه لایه لاستیک (دو لایه پوشش نرم و یک لایه میانی با خواص تقویتی) به‌صورت هم‌زمان اکسترودر شده و در قالب یکپارچه می‌شوند. این فرآیند تحت تأثیر پارامترهای متعددی از جمله دمای قالب، سرعت خط تولید، فشار پیش‌خور، و ویسکوزیته مواد اولیه قرار دارد. هر تغییر جزئی در این پارامترها می‌تواند منجر به نوسان در عرض لایه نهایی شود. در گذشته، کنترل این نوسانات عمدتاً مبتنی بر بازرسی دستی و نمونه‌برداری دوره‌ای بود که علاوه بر تأخیر در تشخیص، امکان شناسایی روندهای زمانی یا الگوهای پیچیده را محدود می‌کرد.

با پیشرفت فناوری تصویری و پردازش تصویر، سیستم‌های پایش عرض لایه مبتنی بر دوربین به‌تدریج جایگزین روش‌های سنتی شده‌اند. در کارخانه ما، از چندین سال گذشته، سیستم‌های دوربینی با دقت زیرمیلیمتری در نقاط کلیدی خط تولید - از جمله خروجی اکسترودر - نصب شده‌اند که به‌صورت پیوسته و بدون توقف، عرض لایه سایدوال را اندازه‌گیری و ثبت می‌کنند. این سیستم‌ها روزانه حجم گسترده‌ای از داده‌های زمان‌واقعی و تاریخی تولید می‌کنند که اگر به‌درستی تحلیل شوند، می‌توانند منبع ارزشمندی برای شناسایی الگوهای پنهان، پیش‌بینی انحرافات و بهبود فرآیند باشند.

با این حال، داشتن داده به‌تنهایی کافی نیست. چالش اصلی، تبدیل این داده‌های خام به بینش‌های عملیاتی است. بسیاری از واحدهای تولید، از جمله کارخانه مورد مطالعه، در مرحله «نیاشت داده» موفق هستند، اما در مرحله «تحلیل هوشمند» و «اقدام مبتنی بر داده» با کندی مواجه هستند. در این مقاله، به تحلیل داده‌های بلندمدت پایش عرض لایه سایدوال در ماشین اکسترودر می‌پردازیم. با استفاده از روش‌های آماری و بصری‌سازی داده، به دنبال شناسایی روندها، نوسانات فصلی، انحرافات از مقدار اسمی و همبستگی آن‌ها با پارامترهای فرآیندی هستیم. هدف نهایی، ارائه راهکارهای عملی برای تنظیم بهتر ماشین، کاهش نوسانات و بهبود ثبات کیفیت تولید است.

این تحقیق، بخشی از فعالیت‌های واحد هوشمندسازی کارخانه در جهت دیجیتال‌سازی خطوط تولید و حرکت به سمت تولید هوشمند یا Smart Manufacturing محسوب می‌شود. نتایج آن نه‌تنها برای بهینه‌سازی فرآیند در ماشین اکسترودر، بلکه به‌عنوان الگویی قابل تعمیم برای سایر بخش‌های خط تولید تایر نیز قابل استفاده است.

مرور اجمالی ادبیات

در سال‌های اخیر، توسعه فناوری‌های نوین در کنترل کیفیت و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید تایر اهمیت ویژه‌ای یافته است. یکی از این فناوری‌ها، سامانه‌های پایش غیرتماسی برای اندازه‌گیری ابعاد لایه‌های لاستیکی است که امکان ثبت دقیق پروفیل و تحلیل آماری برخط را فراهم می‌کنند. گزارش‌ها نشان می‌دهد که چنین سامانه‌هایی در خطوط تولید تایر به‌طور گسترده پیاده‌سازی شده و توانسته‌اند کیفیت ابعادی را با دقت بالا تضمین کنند [۱].

در حوزه بینایی ماشین، استفاده از حسگرهای سه‌بعدی و لیزری برای پایش پروفیل عرضی و سطحی تایر رواج یافته است. به‌عنوان نمونه، حسگرهای Gocator در صنعت به کار گرفته شده‌اند تا با اسکن لبه‌ها و سایدوال، انحرافات هندسی را در همان خط تولید شناسایی و ثبت کنند. افزون بر این، پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که ترکیب الگوریتم‌های یادگیری عمیق با بینایی ماشین می‌تواند دقت تشخیص عیوب ابعادی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد و امکان اتوماسیون کامل بازرسی کیفیت تایر را فراهم آورد [۲ و ۳]. از سوی دیگر، ابزارهای آماری همچون کنترل فرایند آماری (SPC) به‌عنوان یک رویکرد کلاسیک اما همچنان پرکاربرد، در پایش داده‌های تولیدی اهمیت دارند. نمودارهای کنترلی و شاخص‌های قابلیت فرایند، ابزارهایی هستند که به مهندسان امکان می‌دهند نوسانات غیرعادی در داده‌های حاصل از پایش ابعادی را شناسایی و تحلیل کنند. این روش‌ها به‌ویژه زمانی ارزشمند هستند که

داده‌های حجیم و مستمر خطوط تولید مورد بررسی قرار گیرند [۴ و ۵].

در کنار این تحولات، فناوری‌های اندازه‌گیری هندسی تایر مانند استفاده از لیزر Sheet-of-Light و سیستم‌های استایلووس تماسی نیز توسعه یافته‌اند و به‌صورت عملی در ماشین‌های تست یکنواختی تایر برای کنترل ویژگی‌های هندسی و ابعادی به کار می‌روند [۶]. در مجموع، مروری بر ادبیات موجود نشان می‌دهد که ترکیب سامانه‌های غیرتماسی، بینایی ماشین پیشرفته و روش‌های آماری کلاسیک، چارچوبی جامع برای پایش داده‌محور کیفیت تایر فراهم می‌کند. اغلب مطالعات قبلی یا در محیط‌های آزمایشگاهی انجام شده‌اند یا از داده‌های کوتاه‌مدت استفاده کرده‌اند. استفاده از داده‌های واقعی و بلندمدت خطوط صنعتی، همانند پژوهش حاضر، می‌تواند شکاف موجود را پر کرده و بینش‌های عملیاتی ارزشمندی برای ارتقای کیفیت و کاهش ضایعات فراهم سازد.

بخش تجربی:

در این پژوهش، از داده‌های تاریخی عرض لایه سایدوال ثبت‌شده توسط سیستم پایش تصویری در خروجی ماشین اکسترودر استفاده شده است. داده‌ها در بازه زمانی دو ساله (۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳) جمع‌آوری شده‌اند و شامل اندازه‌گیری‌های پیوسته از عرض لایه با فواصل زمانی تقریباً هر ۳۰ ثانیه هستند. در مجموع، بیش از ۲۵۰,۰۰۰ نقطه داده معتبر برای تحلیل در دسترس بود.

علاوه بر داده‌های عرض، اطلاعات مربوط به پارامترهای فرآیندی نیز از سیستم SCADA و ثبت‌برگرهای خط تولید استخراج شد.

این پارامترها شامل:

- دمای قالب اکسترودر (در سه نقطه: بالا، پایین، کنار)
- سرعت خط تولید (متر بر دقیقه)
- نوع محصول (کد لایه)
- شیفتهای کاری (صبح، عصر، شب)
- شناسه بیج مواد اولیه

داده‌ها ابتدا تحت فرآیند پاکسازی و همگون‌سازی قرار گرفتند تا مقادیر پرت یا Outliers، خطاها و داده‌های گم‌شده حذف یا تخمین زده شوند. سپس، داده‌های عرض و پارامترهای فرآیندی بر اساس زمان هم‌زمان‌سازی شدند تا امکان تحلیل همبستگی فراهم شود.

در مرحله بعد، از روش‌های تحلیل آماری توصیفی و بصری‌سازی داده استفاده شد:

- محاسبه میانگین، انحراف معیار و دامنه تغییرات عرض لایه
- رسم هیستوگرام توزیع عرض برای شناسایی الگوهای غالب
- استفاده از کنترل چارت برای شناسایی نقاط خارج از حد کنترل
- ترسیم میانگین متحرک یا Moving Average برای شناسایی روندهای زمانی (روانه، هفتگی، فصلی)

همچنین، برای بررسی رابطه بین عرض لایه و پارامترهای فرآیندی، از تحلیل همبستگی پیرسون و مقایسه گروهی (مانند میانگین عرض در شیفتهای مختلف) استفاده شد. در نهایت، یافته‌های تحلیلی به‌صورت بینش‌های عملیاتی خلاصه شدند و راهکارهای بهبود پیشنهاد گردید.

نتایج و بحث:

تحلیل داده‌های عرض لایه سایدوال در ماشین اکسترودر طی دو سال گذشته، الگوهای معناداری را در رفتار فرآیند آشکار کرد. در این بخش، به ارائه یافته‌های کلیدی و بحث در مورد پیامدهای عملیاتی آن‌ها می‌پردازیم.

۱. توزیع عرض لایه و ثبات فرآیند

تحلیل داده‌های پایش عرض لایه سایدوال نشان می‌دهد که فرآیند تولید در ماشین اکسترودر از ثبات بالایی برخوردار است. توزیع داده‌ها حول مقدار اسمی عرض لایه بسیار متمرکز است و انحرافات مشاهده‌شده در محدوده بسیار خوبی قرار دارند. این امر حاکی از عملکرد مطلوب سیستم اکسترودر و دقت بالای سیستم پایش تصویری است. با این حال، تحلیل دقیق‌تر نشان داد که نوسانات جزئی و قابل پیش‌بینی در عرض لایه وجود دارد که از نظر آماری قابل شناسایی است. این نوسانات، اگرچه تأثیری قابل توجه بر کیفیت محصول ندارند، اما فرصتی برای بهینه‌سازی بیشتر فرآیند و دستیابی به دقت بالاتر فراهم می‌کنند. شناسایی این الگوهای جزئی، اولین قدم برای حرکت به سمت تولید هوشمند و پیش‌بینی‌محور است.

۲. نوسانات زمانی و روندهای فصلی

با رسم میانگین متحرک عرض لایه به‌ازای هر هفته، روندی صعودی در فصول گرم سال (بهار و تابستان) مشاهده شد. به‌طور میانگین، عرض لایه در تابستان ۰.۳ میلی‌متر بیشتر از زمستان بود. این روند با تغییرات دمای محیط و اتاق ماشین همبستگی قوی داشت (ضریب همبستگی پیرسون = ۰.۷۳)، که نشان می‌دهد افزایش دمای محیطی ممکن است بر ویسکوزیته مواد و رفتار جریان در قالب تأثیر بگذارد.

۳. تأثیر شیفتهای کاری

مقایسه میانگین عرض لایه در شیفتهای مختلف نشان داد که شیفتهای شب به‌طور میانگین ۰.۱ میلی‌متر عرض بیشتری نسبت به شیفتهای صبح دارد. (p-value < 0.05) بررسی بیشتر نشان داد که این افزایش با کاهش فرکانس بازدید اپراتور و تأخیر در تنظیمات اولیه ماشین در ابتدای شیفتهای شب مرتبط است.

۴. ارتباط با مواد اولیه

بررسی داده‌های تولید در ارتباط با دسته‌های مختلف مواد اولیه نشان داد که تغییرات جزئی در ویژگی‌های مواد می‌تواند منجر به نوسانات قابل پیش‌بینی در ابعاد لایه سایدوال شود. این رابطه، گواهی بر حساسیت بالای سیستم پایش و دقت فرآیند تولید است که قادر به ثبت تأثیرات ظریف مواد اولیه است.

این یافته، فرصتی ارزشمند برای تقویت همکاری بین بخش تولید و تأمین‌کنندگان مواد فراهم می‌کند. با اشتراک‌گذاری این بینش‌های داده‌محور، می‌توان به سمت استانداردسازی کیفیت مواد و دستیابی به سطح بالاتری از یکنواختی در تولید حرکت کرد. این رویکرد، نمونه‌ای از ارتقای سطح کنترل کیفیت از بازرسی پس از تولید به نظارت پیش‌بینی‌محور است.

۵. پیامدهای عملیاتی و راهکارهای پیشنهادی

یافته‌های فوق، چندین راهکار عملی برای بهبود فرآیند معرفی می‌کنند:

- کالیبراسیون دوره‌ای سیستم اکسترودر در فصول گرم برای جبران اثر دما
- استانداردسازی روتین‌های شروع شیفتهای شب و افزایش نظارت اپراتوری
- همکاری با تأمین‌کنندگان مواد اولیه برای کاهش ناهمگونی دسته‌ها
- پیاده‌سازی سیستم هشدار زودهنگام بر اساس کنترل چارت برای کاهش ضایعات

این نتایج نشان می‌دهد که تحلیل داده‌های موجود، بدون نیاز به سرمایه‌گذاری جدید، می‌تواند به بهبود کیفیت و کاهش نوسانات فرآیند منجر شود.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تحلیل داده‌های بلندمدت پایش عرض لایه سایدوال در ماشین اکسترودر نشان می‌دهد که فرآیند تولید در کارخانه از ثبات بالا و دقت قابل توجهی برخوردار است. سیستم‌های پایش تصویری نصب‌شده به‌خوبی قادر به ثبت تغییرات جزئی در ابعاد لایه بوده‌اند و داده‌های تاریخی جمع‌آوری‌شده، منبع ارزشمندی برای درک عمیق‌تر از رفتار فرآیند محسوب می‌شوند.

شناسایی نوسانات جزئی و قابل پیش‌بینی در عرض لایه، فرصتی برای بهینه‌سازی بیشتر فرآیند فراهم کرده است. این نوسانات که به عواملی مانند شرایط محیطی، زمان‌های مختلف تولید و ویژگی‌های مواد اولیه مرتبط هستند، اگرچه تأثیری معنادار بر کیفیت محصول ندارند، اما می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای حرکت به سمت تولید پیش‌بینی‌محور و هوشمند مورد استفاده قرار گیرند.

یافته‌های این پژوهش، زمینه‌ساز ارائه راهکارهای عملیاتی برای ارتقای فرآیند شده‌اند، از جمله: هماهنگی بیشتر با تأمین‌کنندگان مواد اولیه، استانداردسازی روتین‌های عملیاتی در شیفتهای مختلف، و استفاده از داده برای کالیبراسیون به‌موقع ماشین. این رویکرد، گامی مؤثر در جهت هوشمندسازی خط تولید و انتقال از بازرسی پس از وقوع به کنترل پیشگیرانه است.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که حتی در فرآیندهایی که از قبل دارای کیفیت بالایی هستند، تحلیل داده‌های موجود می‌تواند به درک عمیق‌تر، بهبود مستمر و افزایش بهره‌وری منجر شود. پیشنهاد می‌شود در مراحل آینده، این تحلیل‌ها به‌صورت زنده و با قابلیت هشدار زودهنگام توسعه یابند تا بتوان به‌جای اصلاح انحرافات، از وقوع آن‌ها جلوگیری کرد.

مراجع:

- [1] Tire Technology International, “Ensuring quality in tire production with non-contact measurement solutions,” Aug. 25, 2025.
- [2] LMI3D, “Rubber & Tire Inspection Sensors | Smart 3D Vision Systems,” 2021.
- [3] T. Mignot, “An automatic inspection system for the detection of tire defects using deep learning and machine vision,” Journal of Intelligent Manufacturing, Springer, 2024.
- [4] ASQ, “Control Chart,” American Society for Quality, Online Resource, 2023.
- [5] Wikipedia, “Statistical process control,” updated 2024.
- [6] Wikipedia, “Tire uniformity,” updated 2024.