

پیاده‌سازی سامانه اینترنت اشیا صنعتی (IoT) و سنسورهای پیشرفته برای پایش لحظه‌ای و هوشمند فرایندهای کلیدی تولید تایر

علیرضا مرادی پور* و جواد زنگویی
کارشناس مهندسی برق قدرت، شرکت کویر تایر
Moradi7607@gmail.com

چکیده: صنعت تولید تایر، با پیچیدگی‌های ذاتی در فرایندهای شیمیایی-فیزیکی خود، همواره در جست‌وجوی راه‌کارهایی برای افزایش بهره‌وری، کاهش ضایعات و تضمین کیفیت بی‌نقص محصول نهایی بوده است. این مقاله به بررسی طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه یکپارچه پایش لحظه‌ای مبتنی بر اینترنت اشیا صنعتی (IoT) می‌پردازد که با بهره‌گیری از شبکه‌ای از سنسورهای پیشرفته، پردازش لبه و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، چهار فرایند حیاتی اختلاط، اکستروژن، ولکانیزاسیون و تایرسازی را تحت نظارت دائمی قرار می‌دهد. داده‌های حجیم و با فرکانس بالا از پارامترهای کلیدی همچون دما، فشار، گرانش و ارتعاش، در لحظه جمع‌آوری، تحلیل و برای تصمیم‌سازی در اختیار اپراتورها و سیستم‌های کنترل قرار می‌گیرند. نتیجه‌های به‌دست آمده از یک سناریوی نمونه‌سازی شده و برآورد اولیه در یک واحد تولیدی نشان‌دهنده کاهش ۱۸ درصدی ضایعات، صرفه‌جویی ۱۲ درصدی در مصرف انرژی و افزایش ۲۵ درصدی زمان بهره‌برداری مفید (OEE) تجهیزات است. این مقاله معماری فنی سامانه، انواع سنسورهای به‌کاررفته، پروتکل‌های ارتباطی و مکانیسم‌های تحلیلی را به تفصیل شرح می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اینترنت اشیا صنعتی، پایش لحظه‌ای، پردازش لبه، سنسورهای پیشرفته، هوش مصنوعی، تولید تایر، نگهداری پیش‌گویانه

مقدمه

فرایند تولید تایر یکی از پیچیده‌ترین و حساس‌ترین عملیات در صنایع پلیمری و شیمیایی به‌شمار می‌رود. چهار مرحله اصلی این فرایند - اختلاط، اکستروژن، ولکانیزاسیون و مونتاژ (تایرسازی) - هر کدام به‌دقت بالا و کنترل دقیق دما، فشار و پارامتر عملیاتی وابسته هستند. کوچک‌ترین انحراف در دما، فشار یا زمان در هر یک از این مراحل می‌تواند منجر به تولید محصولی با کیفیت نامناسب، افزایش چشم‌گیر ضایعات و توقف‌های پرهزینه خط تولید شود. روش‌های سنتی کنترل کیفیت که مبتنی بر نمونه‌برداری دستی و آزمایش‌های دوره‌ای در آزمایشگاه هستند، به دلیل تأخیر ذاتی در بازخورد، قادر به جلوگیری از تولید محصول معیوب در لحظه نیستند.

انقلاب صنعت ۴.۰ و ظهور فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا صنعتی (IIoT)، داده‌های کلان و هوش مصنوعی (AI)، پارادایم جدیدی را در مدیریت و کنترل فرایندهای صنعتی ایجاد کرده‌اند. این فناوری‌ها امکان دیده‌بانی بی‌وقفه و کنترل پیشگیرانه را فراهم می‌آورند. هدف این مقاله، ارائه یک چارچوب عملیاتی و بررسی نتیجه‌های به‌دست آمده از پیاده‌سازی یک سامانه IIoT برای پایش لحظه‌ای و هوشمند فرایندهای تولید تایر است.

بخش تجربی

مواد و روش‌ها: معماری سامانه پایش هوشمند

۱- لایه‌بندی سامانه: از سنجش تا بینش
معماری پیشنهادی این سامانه در پنج لایه به‌هم‌پیوسته طراحی شده است که در نمودار ۱ به تصویر کشیده شده است.

۲- سنسورهای پیشرفته: چشم‌ها و گوش‌های سامانه در خط تولید

برای هر فرایند، سنسورهای خاصی با دقت و سرعت نمونه‌برداری بالا انتخاب و نصب شدند:

الف) فرایند اختلاط (مخلوط‌کن داخلی):

۰ سنسورهای فروسرخ (IR) بی‌تماس: برای اندازه‌گیری دمای سطح مخلوط در حال اختلاط با نرخ نمونه‌برداری ۱۰۰ هرتز.

۰ سلول بار و سنسور گشتاور: برای پایش مداوم مصرف انرژی و تشخیص

پایان واکنش اختلاط براساس الگوی گشتاور-زمان.

۰ هدف: اطمینان از دست‌یابی به گرانش و پراکندگی یکنواخت ذرات.

ب) فرایند اکستروژن:

۰ لیزر میکرومتر: برای پایش لحظه‌ای ابعاد پروفیل خروجی (عرض و ضخامت) با دقت میکرونی.

۰ سنسور فشار مذاب: نصب‌شده در دماغه اکسترودر برای کنترل کیفیت مذاب.

۰ دوربین تصویربرداری حرارتی: برای نظارت بر توزیع دمایی

۰ هدف: جلوگیری از اعوجاج ابعادی و اطمینان از یکنواختی مقطع.

ج) فرایند ولکانیزاسیون (پرس گرم):

۰ آرایه‌ای از ترموکوپل‌های تعبیه‌شده در قالب: برای پایش گرادیان دمایی در نقاط مختلف سنسور فشار پیزوالکتریک: برای اندازه‌گیری فشار لحظه‌ای اعمال‌شده بر روی قالب.

۰ هدف: اطمینان از تکمیل یکنواخت واکنش ولکانیزاسیون در تمامی نقاط تایر و

۳- الگوریتم‌های هوشمند: مغز تحلیلی سامانه

داده‌های خام پس از پیش‌پردازش در لبه، برای تحلیل عمیق‌تر به ابر ارسال می‌شوند:

• مدل‌های تشخیص ناهنجاری بلادرنگ الگوریتم‌های Isolation Forest و Autoencoders برای شناسایی faults در کسری از ثانیه.

• مدل‌های پیش‌بینی‌کننده کیفیت: استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق (LSTM) برای پیش‌بینی خواص نهایی تایر (مانند سفتی و استحکام) براساس داده‌های فرایندی.

• بهینه‌سازی چندهدفه: استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک برای یافتن بهترین تنظیمات پارامترهای عملیاتی به‌منظور هم‌زمانی کاهش مصرف انرژی و افزایش کیفیت محصول.

نتیجه‌ها و بحث

تحلیل داده‌های عملیاتی

پیاده‌سازی این سامانه منجر به ایجاد حجم عظیمی از داده‌های بارز شد که تحلیل آن‌ها نتایج کمی و کیفی زیر را به همراه داشت.

۱- بهبودهای کمی: ارقام گویا هستند

لازم به ذکر است که اعداد ارائه شده در جدول ۱ به عنوان مقادیر پیشنهادی و تخمینی براساس شبیه‌سازی و سناریوی نمونه ذکر شده‌اند و صرفاً جهت روشن‌سازی پتانسیل بهبود سامانه هستند.

جدول ۱- خلاصه نتایج کمی فرضی حاصل از سناریوی نمونه پیاده‌سازی سامانه IoT

شاخص عملکرد کلیدی (KPI)	دوره پایه (پیش از پیاده‌سازی)	دوره عملیاتی (پس از پیاده‌سازی)	میزان بهبود (%)
نرخ ضایعات تولید	۷۵٪	۶۱٫۵٪	کاهش ۱۸٪
مصرف انرژی ویژه (kWh/تایر)	۳٫۲۵	۲٫۸۶	کاهش ۱۲٪
بازده کلی تجهیزات (OEE)	۷۲٪	۹۰٪	افزایش ۲۵٪
توقف‌های برنامه‌ریزی نشده (ماهانه)	۱۵	۶	کاهش ۶۰٪
نرخ شناسایی faults پیش از وقوع	۲۰٪	۸۵٪	افزایش ۳۲۵٪

۲- بهبودهای کیفی: بینش‌های عملیاتی

موارد زیر براساس یک سناریوی عملیاتی فرضی و نتایج شبیه‌سازی بیان شده‌اند. این مثال‌ها صرفاً برای توضیح قابلیت‌های سامانه آورده شده‌اند.

افزون بر اعداد فوق، خروجی‌های کیفی قابل توجهی نیز حاصل شد:

- نگهداری پیش‌گویانه: با تحلیل داده‌های ارتعاشی موتورهای اکسترودر،

خرابی قریب‌الوقوع یاتاقان‌ها یک هفته قبل از وقوع پیش‌بینی و از توقف اضطراری جلوگیری شد.

- شفافیت کامل فرایندی: مدیران از طریق داشبوردهای تحت وب به داده‌های لحظه‌ای تمام خط تولید دسترسی پیدا کردند. شکل ۱ روند بهبود شاخص OEE را در طول زمان نشان می‌دهد.

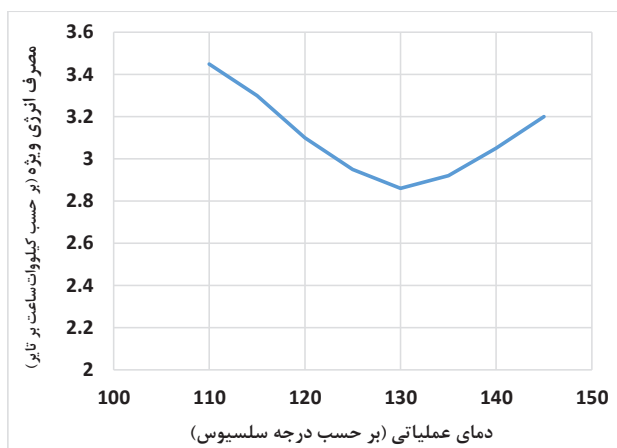
کنترل فرایند مبتنی بر داده: سیستم قادر به شناسایی الگوهای بهینه عملیاتی شد. برای مثال، شکل ۲ رابطه بین دمای اختلاط و مصرف انرژی ویژه را نشان می‌دهد که به بهینه‌سازی دما منجر شد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

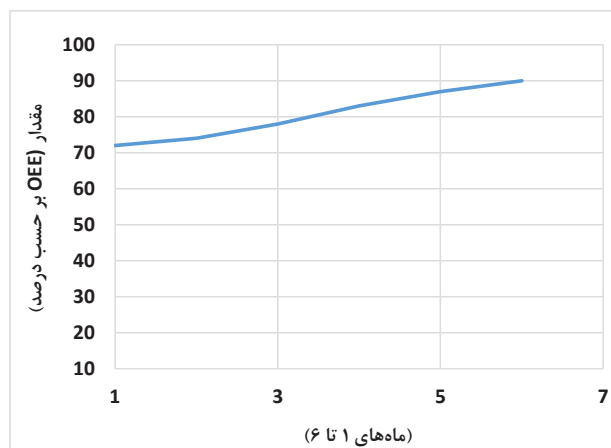
پیاده‌سازی پیشنهادی این سامانه IoT، براساس تحلیل‌های شبیه‌سازی و مثال‌های عددی، نشان داد که ادغام سنسورهای پیشرفته، پردازش لبه و هوش مصنوعی می‌تواند بهره‌وری و کیفیت در صنایع پیچیده‌ای مانند تولید تایر را متحول کند. این سامانه با تبدیل داده‌های خام به بینش عملیاتی قابل‌اجرا، نه تنها به بهبود شاخص‌های کمی منجر شد، بلکه امکان تصمیم‌گیری پیش‌دستانه و مدیریت استثنائات را فراهم آورد.

کارهای آینده شامل یکپارچه‌سازی کامل‌تر با سیستم‌های برنامه‌ریزی منابع سازمانی (ERP)، بهبود مدل‌های پیش‌بینی‌کننده با استفاده از یادگیری تقویتی و افزایش امنیت سایبری سامانه در برابر تهدیدات احتمالی خواهد بود. بدون شک، حرکت به سمت چنین سامانه‌های هوشمندی، کلید رقابت در بازار جهانی و گذار موفق به صنعت ۴.۰ است.

اعداد و شاخص‌های ذکر شده در این مقاله ماهیت پیشنهادی و فرضی دارند و هدف آن‌ها نمایش پتانسیل ارتقاء بوده است؛ ارزیابی واقعی نیازمند اجرا در محیط عملیاتی و گردآوری داده‌های واقعی است.



شکل ۲- رابطه بین دمای عملیاتی فرایند اختلاط و مصرف انرژی ویژه (داده‌های واقعی از پایلوت)



شکل ۱- روند بهبود تدریجی شاخص بازده کلی تجهیزات (OEE) پس از پیاده‌سازی سامانه

مراجع

- [1] Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. Computers in Industry, 101, 1-12.
- [2] Wan, J., Tang, S., Shu, Z., Li, D., Wang, S., Imran, M., & Vasilakos, A. V. (2016). Software-defined industrial internet of things in the context of industry 4.0. IEEE Sensors Journal, 16(20), 7373-7380.
- [3] Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. IEEE Access, 6, 3585-3593.
- [4] Wang, J., Ma, Y., Zhang, L., Gao, R. X., & Wu, D. (2018). Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. Journal of Manufacturing Systems, 48, 144-156.
- [5] Davis, J., Edgar, T., Porter, J., Bernaden, J., & Sarli, M. (2012). Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. Computers & Chemical Engineering, 47, 145-156.