

پیش‌بینی زمان و ظرفیت‌سنجی تائیرسازی تک‌مرحله‌ای با روش KDD

محمد حیدری فراهانی^{۱*}، امین پاکزاد^۱ و رضا اسدزاده^۲

۱- کارشناس مهندسی صنایع، شرکت کویرتایر

۲- مدیر مهندسی صنایع و برنامه‌ریزی، شرکت کویرتایر

heidary.farahani@gmail.com

چکیده: اندازه‌گیری دقیق زمان و ظرفیت تولید از ارکان اصلی برنامه‌ریزی و بهبود فرایند در صنایع تولیدی است. روش سنتی زمان‌سنجی با استفاده از کرنومتر (Stop-watch)، باوجود کاربرد گسترده، برای محصولات جدید یا شرایط تولید متغیر، فرایندی زمان‌بر و واکنشی است. این پروژه باهدف گذار از روش سنتی به یک مدل پیش‌بین و داده‌محور در ایستگاه تائیرسازی تک‌مرحله‌ای شرکت کویرتایر تعریف شد. با استفاده از تکنیک‌های کشف دانش در پایگاه داده Knowledge Discovery in Databases (KDD) و داده‌کاوی، داده‌های تولید مربوط به ۱۴ ماه جمع‌آوری و تحلیل شد. در این پژوهش، روابط پنهان میان پارامترهای کلیدی تولید (سرعت ماشین، سایز تایر و ابعاد محصول) و زمان خالص تولید شناسایی و به فرمول‌های ریاضی تبدیل شد. این مدل‌ها با موفقیت در یک نرم‌افزار کاربردی به نام TSC (Time Study and Capacity) که با زبان پایتون توسعه‌یافته، پیاده‌سازی شد. نتایج صحت‌سنجی نشان می‌دهد که مدل پیش‌بین با دقت بالای ۹۸٪ قادر به تخمین زمان تولید است که این امر برنامه‌ریزی تولید را به شکل چشمگیری بهبود بخشیده است.

واژه‌های کلیدی: کشف دانش در پایگاه داده (KDD)، داده‌کاوی، زمان‌سنجی، ظرفیت‌سنجی، صنعت تایر، پایتون

مقدمه

و داده‌کاوی در یکی از گلوگاه‌های اصلی تولید، یعنی ایستگاه تائیرسازی در شرکت کویرتایر تعریف شد. هدف اصلی، جایگزینی روش زمان‌سنجی سنتی با یک مدل پیش‌بین بود که قادر است با دریافت مشخصات فنی محصول (سایز) و تنظیمات فرایند (پارامترهای سرعت)، زمان و ظرفیت تولید را با دقت بالا تخمین بزند.

بخش تجربی

برای تحلیل و پیش‌بینی داده‌ها از مدل رگرسیون خطی استفاده شد. دلیل اصلی انتخاب این مدل، سادگی و قابلیت تفسیر بالای آن بود که در کاربردهای مهندسی یک مزیت کلیدی محسوب می‌شود. برخلاف مدل‌های پیچیده‌تر "جعبه سیاه"، رگرسیون خطی به مهندسان اجازه می‌دهد تا تأثیر هر متغیر ورودی (مانند سرعت یا ابعاد) را بر خروجی (زمان تولید) به‌وضوح درک و تحلیل کنند. این شفافیت برای اعتبارسنجی مدل توسط کارشناسان فرایند و جلب اعتماد آن‌ها ضروری بود. اگرچه مدل‌سازی سری‌های زمانی کامل در این پژوهش به‌کار گرفته نشد، اما اصول تحلیل داده‌های وابسته به زمان، که در تحلیل سری‌های زمانی مورد بحث قرار می‌گیرند، برای درک دینامیک فرایند تولید راهگشا بود [۳]. پس از تدوین مدل اولیه، نتایج با نظرات و مشاوره‌های خبرگان و کارشناسان صنعت تائیرسازی بازنگری و تأیید نهایی شد. ابتدا داده‌ها به‌صورت جداگانه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت؛ سپس برای دسته‌بندی داده‌های ورودی، زمان‌های ساخت تایر اعم از زمان خالص (مجموع زمان‌های مونتاژ کوشین و سایدوال، لایه یک و دو، جایگذاری بید، استیچرزی ترد و بازرسی گرین تایر) و زمان ناسالم (استیچرزی دستی اپراتور روی کوشین، سایدوال، لایه یک و دو) براساس سایز و ماشین مرتب شد. پس از زمان‌سنجی‌های متعدد طی بازه زمانی ۱۴ ماهه الگوریتم قابل‌درکی از زمان ساخت تایر و نحوه تغییر آن باتوجه به رینگ، عرض ترد، ماشین، پارامترهای سرعت، تک یا دولایه بودن سایز موردنظر رسیدیم. پس از آن با استفاده از نظرات و مشاوره‌های خبرگان و کارشناسان در زمینه تائیرسازی، داده‌ها موردبازنگری قرار گرفته و تأییدیه نهایی روش اخذ شد. در نهایت اعتبارسنجی با داده‌های تاریخی انجام شد؛ به این صورت که نتایج به‌دست‌آمده از فرمول‌های موردنظر را با زمان‌سنجی واقعی مورد مقایسه قرار دادیم و درستی فرمول‌ها مسجل شد.

استخراج مدل و فرمول‌بندی

پس از تحلیل داده‌ها، روابط کلیدی شناسایی و به فرمول‌های ریاضی برای پیش‌بینی زمان هر یک از مراحل اصلی فرایند تبدیل شدند. این فرمول‌ها شامل پیش‌بینی

در محیط رقابتی امروز، بهینه‌سازی فرایندهای تولید برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها امری حیاتی است. در دهه‌های گذشته، مهندسی صنایع به‌شدت بر روش‌های مشاهده مستقیم و دستی، مانند زمان‌سنجی با کرنومتر متکی بوده است. این روش‌ها، علی‌رغم دقت بالا در شرایط کنترل‌شده، در مواجهه با پیچیدگی روزافزون خطوط تولید، تنوع بالای محصولات و نیاز به تصمیم‌گیری سریع، دچار محدودیت‌های جدی هستند و ماهیتی واکنشی دارند تا پیش‌بین. با ظهور انقلاب صنعتی چهارم (Industry 4.0)، کارخانه‌ها به محیط‌هایی هوشمند و داده‌محور تبدیل شده‌اند. امروزه حجم عظیمی از داده‌ها به‌صورت لحظه‌ای از طریق حسگرهای اینترنت اشیا (IoT)، سیستم‌های کنترل تولید (MES) و پایگاه داده‌های سازمانی تولید می‌شود. این تحول، فرصتی بی‌نظیر برای گذار از رویکردهای سنتی به سمت مدل‌سازی‌های پیشرفته و تحلیلی فراهم کرده است [۱]. زمان‌سنجی Stop-watch به‌عنوان یک ابزار دقیق و کارآمد برای اندازه‌گیری زمان، به‌کاربران این امکان را می‌دهد تا زمان را به‌صورت دقیق و فوری اندازه‌گیری و آن را تحت کنترل داشته باشند. با در نظر گرفتن اهمیت زمان‌سنجی در فرایندهای تولیدی مدرن، درک بهتر از این ابزار می‌تواند به بهبود کارایی و برنامه‌ریزی در تولید کمک کند. فرایند کشف دانش در پایگاه داده (KDD) یک چارچوب نظام‌مند برای استخراج دانش مفید، معتبر و قابل اقدام از مجموعه داده‌های بزرگ است. داده‌کاوی (DataMin-) به‌عنوان قلب این فرایند، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تکنیک‌های آماری برای ساخت مدل‌های توصیفی و پیش‌بین بهره می‌برد [۲]. در مهندسی صنایع مدرن، کاربرد این مدل‌ها از کنترل کیفیت پیش‌بینانه و پیش‌بینی خرابی تجهیزات (Predictive Maintenance) تا بهینه‌سازی زنجیره تأمین و برنامه‌ریزی تولید گسترش یافته است. توانایی پیش‌بینی دقیق زمان تولید براساس پارامترهای ورودی، یک مزیت رقابتی کلیدی محسوب شده و به کاهش زمان معرفی محصول به بازار و افزایش انعطاف‌پذیری تولید کمک شایانی می‌کند. فرایند KDD شامل مراحل چون انتخاب داده، پیش‌پردازش، تبدیل داده، استخراج ویژگی‌ها و استخراج دانش است. این مراحل به تحلیل‌گران و دانشمندان داده کمک می‌کند تا با استفاده از تکنیک‌های مختلف مانند یادگیری ماشین، داده‌کاوی و آمار، الگوها و روندهای پنهان در داده‌ها را شناسایی کنند. هدف نهایی KDD این است که به‌کاربران اطلاعاتی ارزش‌ارائه دهد که بتوانند در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و بهینه‌سازی فرایندها مورد استفاده قرار گیرند. در همین راستا، این پروژه باهدف به‌کارگیری اصول KDD

است که به کاربر اجازه می‌دهد با وارد کردن پارامترهای سرعت، سایز و ماشین، زمان خالص، زمان کل و ظرفیت تولید را به سرعت محاسبه کند. انتخاب پایتون برای توسعه این ابزار، یک تصمیم استراتژیک بود که فراتر از یک انتخاب فنی صرف عمل می‌کند. این انتخاب، پروژه را با استانداردهای مدرن علوم داده و محاسبات علمی همسو می‌سازد. پایتون به‌عنوان یک زبان برنامه‌نویسی همه‌منظوره، انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری بسیار بیشتری نسبت به ابزارهای سنتی مانند اکسل ارائه می‌دهد و قادر است مجموعه داده‌های بزرگ را به‌طور کارآمد پردازش کند. برای اطمینان از صحت و قابلیت اطمینان مدل پیش‌بین، یک فرایند اعتبارسنجی دقیق طراحی و اجرا شد. در این فرایند، نتایج پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار TSC با داده‌های زمان‌سنجی واقعی که به‌صورت مستقل جمع‌آوری شده بودند، مقایسه شد. این اعتبارسنجی بر روی بیش از بیست حالت مجزا شامل ماشین‌ها، سایزهای تایر و تنظیمات سرعت متفاوت انجام شد تا عملکرد مدل در طیف وسیعی از سناریوهای تولیدی ارزیابی شود.

شکل ۱- نمای ورودی نرم‌افزار

نتیجه‌گیری

پس از مطالعه روی ماشین‌های تایرسازی، انجام زمان‌سنجی‌های واقعی و محاسبه زمان ساخت توسط نرم‌افزار به نتایج قابل توجهی دست یافتیم. به‌عنوان نمونه، نتایج مقایسه زمان‌های پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار با زمان‌های واقعی ثبت‌شده برای یک ماشین تایرسازی خاص در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱- مقایسه زمان‌های واقعی با زمان پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار

سایز	زمان خالص واقعی	زمان پیش‌بینی خالص	درصد صحت زمان خالص	زمان کل واقعی	زمان کل پیش‌بینی	درصد صحت زمان کل
235/65 R17	۶۷٫۴۸	۶۶٫۹۳	۹۹٪	۸۲٫۷۹	۸۲٫۶۲	۱۰۰٪
205/55 R16	۵۸٫۶۲	۵۵٫۴۲	۹۵٪	۶۸٫۸۷	۶۸٫۴۲	۹۹٪
205/50 R17	۵۶٫۵۱	۵۷٫۳۳	۹۹٪	۷۲٫۶۶	۷۰٫۷۸	۹۷٪
215/60 R16	۶۶٫۹۳	۶۲٫۴۸	۹۳٪	۸۱٫۳۷	۷۷٫۱۳	۹۵٪
215/55 R18	۶۳٫۵۵	۶۵٫۶۳	۹۷٪	۸۰٫۵۴	۸۱٫۰۲	۹۹٪
میانگین			۹۷٪			۹۸٪

باتوجه به جدول، میانگین صحت مدل برای ماشین تایرسازی مذکور در محاسبه زمان خالص ۹۷٪ و در محاسبه زمان کل ۹۸٪ بوده است. این پروژه با موفقیت دانش ضمنی موجود در داده‌های تولید را به یک مدل ریاضی صریح و یک ابزار کاربردی تبدیل کرد. این دستاورد به واحد مهندسی صنایع امکان می‌دهد تا به‌جای زمان‌سنجی‌های مکرر و واکنشی، به‌صورت پیش‌بین و سریع، ظرفیت‌سنجی دقیقی برای محصولات جدید و سناریوهای مختلف تولید ارائه دهد. درنهایت می‌توان برای ادامه روند پیش‌بینی زمان و ظرفیت ایستگاه‌های مختلف تولید در شرکت مورد مطالعه و شرکت‌های دیگر، با مطالعات آتی در این جهت گام‌های مهمی برداشت.

زمان‌های مونتاژ کوشین و سایدوال، لایه یک و دو، جایگذاری بید، استیچرزی ترد و زمان ناسالم (استیچرزی دستی کوشین، لایه یک و دو توسط اپراتور) می‌شوند.

۱- زمان مونتاژ کوشین و سایدوال (PA): این زمان تابعی از سرعت مونتاژ PA و رینگ سایز موردنظر است.

• زمان پایه: ۳۰۴ ثانیه برای یک سایز با رینگ ۱۵ inch و سرعت ۴۰ rpm

• تأثیر سرعت: در رینگ‌های یکسان، افزایش سرعت به میزان ۱۰ rpm، زمان مونتاژ را ۳٪ کاهش می‌دهد.

• تأثیر سایز: در سرعت‌های یکسان، افزایش رینگ به میزان ۱ inch، زمان مونتاژ را ۴٪ افزایش می‌دهد.

$$T_{PA} = 3.4 * (1 - \left(\frac{V_{PA} - 40}{10} \right) * 0.03) + ((R - 15) * 0.04) \quad (1)$$

۲- زمان مونتاژ لایه یک: این زمان تابعی از سرعت مونتاژ لایه یک و رینگ سایز موردنظر است.

• زمان پایه: ۸۰۲ ثانیه برای یک سایز با رینگ ۱۵ inch و سرعت ۵۰ rpm

• تأثیر سرعت: در رینگ‌های یکسان، افزایش سرعت به میزان ۱۰ rpm، زمان مونتاژ را ۴٪ کاهش می‌دهد.

• تأثیر سایز: در سرعت‌های یکسان، افزایش رینگ به میزان ۱ inch، زمان مونتاژ را ۳٪ افزایش می‌دهد.

$$T_{P1} = 8.2 * (1 - \left(\frac{V_{P1} - 50}{10} \right) * 0.04) + ((R - 15) * 0.03) \quad (2)$$

۳- زمان جایگذاری بید (Bead): این زمان به‌صورت شرط زیر قابل تعریف است:

• اگر سرعت بید ترنسفر (V) بزرگ‌تر یا مساوی ۱۲۰۰ mm/s باشد، زمان جایگذاری بید برابر ۱۴۰۵ ثانیه است.

• اگر سرعت بید ترنسفر (V) کمتر از ۱۲۰۰ mm/s باشد، زمان جایگذاری بید برابر ۱۴۰۷ ثانیه است.

۴- زمان استیچرزی ترد (Tread): این زمان به سه متغیر سرعت، رینگ سایز و عرض ترد وابسته است.

• زمان پایه: ۱۹۸ ثانیه برای یک سایز با رینگ ۱۶ inch، سرعت ۱۲۰ rpm و عرض ترد ۲۰۵ mm

• تأثیر سرعت: در رینگ‌های یکسان با عرض ترد ثابت، افزایش سرعت به میزان ۱۰ rpm، زمان استیچرزی را ۳٪ کاهش می‌دهد.

• تأثیر عرض: در رینگ‌های یکسان با سرعت ثابت، کاهش عرض ترد به میزان ۱۰ mm، زمان استیچرزی را ۲٪ کاهش می‌دهد.

• تأثیر سایز: در سرعت‌های یکسان با عرض ترد ثابت، کاهش رینگ به میزان ۱ inch، زمان استیچرزی را ۱٪ کاهش می‌دهد.

$$T_s = 19.8 * (1 - \left(\frac{V_s - 120}{10} \right) * 0.03 + \left(\frac{W_T - 205}{10} \right) * 0.02 + (R - 16) * 0.01) \quad (3)$$

۵- زمان مونتاژ لایه دو: برای تایرهای دولایه، زمان مونتاژ لایه دو ۸۰ درصد زمان مونتاژ لایه یک محاسبه می‌شود.

۶- زمان بازرسی گرین تایر: این زمان توسط اپراتور انجام‌شده و با بسته شدن فک ترنسفر، انتقال بید ترنسفرها و پایین آمدن کانوایر کوشین و سایدوال، به‌صورت هم‌زمان صورت می‌گیرد و معادل ۱۲ ثانیه به طول می‌انجامد.

۷- زمان ناسالم: زمان‌های اجتناب‌ناپذیری که طبق دستورالعمل‌های اصلاحی واحد تکنولوژی هستند. این زمان در هر سیکل ساخت از قاعده خاصی پیروی می‌کند که به عوامل مختلفی وابسته است: تک لایه و یا دولایه بودن سایز موردنظر، اپراتور، نیم ساخته، ماشین و شیفت.

توسعه نرم‌افزار TSC

برای عملیاتی‌سازی مدل و تسهیل استفاده از آن توسط مهندسان صنایع، فرمول‌های استخراج‌شده در قالب یک نرم‌افزار کاربردی به نام TSC پیاده‌سازی شد. این نرم‌افزار با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون توسعه یافت و دارای یک رابط کاربری ساده مراجع

[1] He, W. & Xu, L. D. (2015). "A Survey on Data Mining and Knowledge Discovery in Cyber Physical Systems". IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 45(6), 1118-1132.

[2] Han, J. Kamber, M. & Pel, J. (2011). "Data Mining: Concepts and Techniques". Morgan Kaufmann.

[3] Keller, J. M. & Kuhlmann, M. (2018). "Time Series Analysis: A Comprehensive Guide". Wiley Blackwell.