



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۱۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، صص ۸۰-۶۱

نوع مقاله: پژوهشی

یک رویکرد داده‌محور در استخراج قوانین میزان پذیرش محصولات در محیط تولید ناب: مورد مطالعه صنایع غذایی زر

مهرناز بهرام زاد^۱، صادق عابدی^{۲*}، رضا احتشام راثی^۳

^۱. دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

^۲. استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

^۳. دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

چکیده

هدف این پژوهش طراحی یک مدل داده‌محور برای استخراج قوانین مؤثر بر نرخ پذیرش محصول در خطوط تولید صنایع غذایی است. بدین منظور، ابتدا ۲۵ متغیر مرتبط با اصول تولید ناب شناسایی و با استفاده از روش دلفی فازی، ۶ متغیر کلیدی شامل درصد تطابق مواد اولیه با استانداردهای کیفی، درصد ضایعات تولید، نرخ تأیید استثنایی محصول نهایی، میانگین زمان انبارش مواد اولیه، شیفیت کاری و نرخ بازگشت محصول انتخاب شد. سپس پایگاه داده‌ای شامل ۴۲۰۰ رکورد واقعی از دو سال عملکرد خطوط تولید گردآوری و پس از انجام مراحل پیش‌پردازش، مدل‌سازی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام گرفت. در این میان، الگوریتم درخت تصمیم (CART) به‌عنوان مدل اصلی برای استخراج قوانین تصمیم‌پذیر به‌کار گرفته شد و عملکرد آن با سایر الگوریتم‌های طبقه‌بندی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که «درصد تطابق مواد اولیه» و «درصد ضایعات» بیشترین تأثیر را بر پذیرش محصول دارند و مدل درخت تصمیم با دقت ۹۱ درصد توانست نمونه‌ها را در طبقات پذیرش و عدم پذیرش دسته‌بندی کند. همچنین قوانین استخراج‌شده روابط شفاف و قابل تفسیر میان متغیرها را آشکار ساخت و زمینه ارائه الگوهای تصمیم‌یار برای مدیران تولید و کنترل کیفیت را فراهم نمود. یافته‌ها بیانگر کارایی رویکردهای داده‌محور مبتنی بر تولید ناب در بهبود پیش‌بینی کیفیت و کاهش ضایعات در مورد مطالعه این پژوهش می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: تولید ناب؛ درخت تصمیم؛ پذیرش محصول؛ یادگیری ماشین



۱- مقدمه و بیان مسئله

در دهه‌های اخیر، صنایع تولیدی به‌ویژه در بخش مواد غذایی با فشار فزاینده‌ای برای ارتقای کیفیت، کاهش ضایعات، افزایش بهره‌وری و پاسخ‌گویی سریع به نوسانات بازار مواجه شده‌اند [۱]. پیچیدگی فرآیندهای تولید، گستردگی داده‌های عملیاتی و الزامات سخت‌گیرانه استانداردهای کیفی باعث شده است که رویکردهای سنتی کنترل کیفیت و تصمیم‌گیری دیگر پاسخ‌گوی نیازهای رقابتی امروز نباشند [۲]. در چنین شرایطی، تولید ناب^۱ به‌عنوان یکی از کارآمدترین رویکردهای مدیریتی شناخته می‌شود که با تمرکز بر حذف اتلاف، بهبود جریان ارزش و افزایش کارایی، نقشی اساسی در بهینه‌سازی سیستم‌های تولیدی ایفا می‌کند [۳]. در محیط‌های تولید ناب، تصمیم‌گیری درباره پذیرش یا رد محصول نهایی، تنها یک قضاوت کیفی نیست، بلکه نتیجه برهم‌کنش مجموعه‌ای از داده‌های عملیاتی، کیفی و فرایندی است که در صورت عدم تحلیل نظام‌مند، می‌تواند منجر به افزایش ضایعات یا کاهش رضایت مشتری شود. هم‌زمان با این تحولات، توسعه فناوری‌های هوشمند و قابلیت‌های یادگیری ماشین^۲ زمینه را برای تحلیل داده‌های پیچیده تولید و پیش‌بینی نتایج عملیاتی با دقت بالا فراهم کرده است [۴]. الگوریتم‌های یادگیری ماشین توانایی مدل‌سازی روابط غیرخطی و چندبعدی را دارند و می‌توانند در محیط‌های صنعتی، به‌ویژه در پیش‌بینی رفتارهای کیفی و عملیاتی، عملکردی بسیار کارآمد داشته باشند [۵]. با وجود به‌کارگیری گسترده اصول تولید ناب، تصمیم‌گیری درباره پذیرش محصول در بسیاری از سازمان‌ها همچنان بر مبنای تجربه فردی یا شاخص‌های منفرد انجام می‌شود. این در حالی است که داده‌های تولید، کیفیت و فرایند، ظرفیت بالایی برای کشف الگوهای پنهان و قواعد تصمیم‌گیری دارند؛ قواعدی که می‌توانند به‌صورت نظام‌مند، پذیرش یا رد محصول را پیش‌بینی و توجیه کنند. در نتیجه، زمینه پژوهش حاضر بر تقاطع سه حوزه کلیدی تولید ناب، پذیرش محصول و یادگیری ماشین استوار است که تمرکز آن بر طراحی مدلی پیش‌بینانه برای نرخ پذیرش محصول در خطوط تولید ناب می‌باشد؛ مدلی که بتواند چالش‌های جاری صنایع را در زمینه کیفیت، ضایعات و پذیرش محصول از منظر داده‌محور حل و فصل کند. اهمیت این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که بسیاری از صنایع

^۱ Lean Production

^۲ Machine Learning



تولیدی هنوز به‌طور کامل با چالش ضایعات بالا، نوسانات کیفیت مواد اولیه، عدم انطباق محصولات با استانداردهای کیفی، بازگشت محصولات از مشتری و ضعف در قابلیت پیش‌بینی خروجی‌های تولید مواجه هستند [۶]. با وجود گسترش مطالعات مرتبط با تولید ناب و کیفیت، همچنان فقدان مدلی داده‌محور، پیش‌بینی‌محور و تفسیرپذیر که به‌طور مستقیم بر پذیرش محصول تمرکز داشته باشد، در ادبیات پژوهش مشهود است. برخلاف بخش عمده‌ای از پژوهش‌های پیشین که به بررسی توصیفی یا علی اجرای تولید ناب و پیامدهای آن محدود شده‌اند [۷، ۸]، پژوهش حاضر رویکردی داده‌محور و پیش‌بینی‌محور را در بستر واقعی تولید ناب دنبال می‌کند. نوآوری اصلی این پژوهش در دو بعد قابل تبیین است: نخست، بهره‌گیری از داده‌های عملیاتی واقعی در یک بازه زمانی، به‌جای داده‌های ادراکی یا پرسشنامه‌ای؛ دوم، ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌منظور استخراج قوانین تصمیم‌گیری قابل تفسیر و کاربردی. این رویکرد امکان گذار از تصمیم‌گیری واکنشی به تصمیم‌گیری پیش‌نگرانه را در محیط‌های تولید ناب فراهم می‌سازد و شکاف موجود میان مدل‌های پیچیده یادگیری ماشین و نیازهای عملی مدیران تولید و کیفیت را هدف قرار می‌دهد. مسئله اصلی پژوهش حاضر از این خلأ نشأت می‌گیرد؛ چگونه می‌توان با اتکا به داده‌های واقعی تولید و در چارچوب اصول تولید ناب، مدلی پیش‌بینی‌محور و در عین حال تفسیرپذیر طراحی کرد که قادر باشد نرخ پذیرش محصول را پیش از تکمیل فرآیند تولید برآورد سازد؟ بر این اساس، هدف پژوهش حاضر استخراج قوانین مؤثر بر میزان پذیرش محصولات در محیط تولید ناب با استفاده از یک رویکرد داده‌محور است. در این پژوهش، ابتدا متغیرهای مرتبط با اصول تولید ناب به‌صورت نظام‌مند شناسایی و با استفاده از روش دلفی فازی غربال می‌شوند و سپس با به‌کارگیری الگوریتم درخت تصمیم، قواعد تصمیم‌گیری شفاف و قابل تفسیر برای پذیرش یا رد محصول استخراج می‌گردد.

۲- پیشینه پژوهش

پژوهش‌های مرتبط با تولید ناب به‌طور گسترده نشان داده‌اند که یکی از عوامل اصلی اثرگذار بر عملکرد عملیاتی و میزان پذیرش محصول، توان سازمان در شناسایی و حذف اتلاف‌های پنهان در فرایندهای تولیدی است [۹]. در این مطالعات، اتلاف نه تنها به‌عنوان یک مسئله هزینه‌ای، بلکه به‌مثابه عاملی تعیین‌کننده در کاهش کیفیت، افزایش خطاهای انسانی، ناپایداری تجهیزات



و در نهایت افت اعتماد بازار به محصول نهایی تلقی شده است [۱۰]. بخش از این پژوهش‌ها با تکیه بر ابزارهای کلاسیک ناب و کیفیت، تلاش کرده‌اند رابطه میان کاهش اتلاف و بهبود نتایج عملکردی را تبیین کنند و معمولاً از روش‌هایی مانند تحلیل توصیفی، مدل‌های ساختاری یا ارزیابی‌های مبتنی بر شاخص‌های عملکرد استفاده کرده‌اند [۱۱]. در این چارچوب، پذیرش محصول اغلب به صورت یک پیامد کلی از بهبود فرایند در نظر گرفته شده و کمتر به عنوان یک متغیر قابل پیش‌بینی با الگوهای تصمیم‌گیری مشخص مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]. در امتداد این رویکرد، بخش دیگری از ادبیات تولید ناب بر مفهوم جریان پیوسته و پایداری فرایندهای تولید تمرکز داشته است [۱۳]. این دسته از پژوهش‌ها نشان می‌دهند که نوسانات زمانی، توقفات مکرر و عدم یکنواختی در اجرای برنامه تولید، می‌توانند به طور غیرمستقیم بر ادراک کیفیت و قابلیت اطمینان محصول اثر بگذارند [۱۴]. ابزارهایی نظیر نقشه‌برداری جریان ارزش، شبیه‌سازی فرایند، تحلیل گلوگاه‌ها و روش‌های زمان‌سنجی، رایج‌ترین ابزارهای تحلیلی در این حوزه بوده‌اند [۱۵]. با وجود اثربخشی این ابزارها در بهبود کارایی، تمرکز غالب آن‌ها بر اصلاح فرایند است و تحلیل روابط پیچیده میان شاخص‌های فرایندی و تصمیم نهایی پذیرش یا رد محصول معمولاً به صورت ضمنی و غیرمدل‌سازی شده باقی مانده است. از منظر جریان ارزش، مطالعات پیشین بر اهمیت یکپارچگی اطلاعات، کیفیت ورودی‌ها و شفافیت داده‌های تولیدی تأکید کرده‌اند [۱۶]. در این پژوهش‌ها، جریان ارزش نه فقط به عنوان مسیر حرکت مواد، بلکه به عنوان جریان داده و اطلاعات تصمیم‌ساز مورد توجه قرار گرفته است. بسیاری از این مطالعات با استفاده از چارچوب‌های مدیریت کیفیت، سیستم‌های کنترلی و مدل‌های تحلیلی چندمعیاره تلاش کرده‌اند نشان دهند که بهبود جریان ارزش می‌تواند به ارتقای کیفیت ادراک شده و کاهش عدم قطعیت در تصمیم‌گیری‌های تولیدی منجر شود [۱۷]. با این حال، اغلب این رویکردها ماهیتی تحلیلی و پس‌نگر دارند و کمتر از ظرفیت داده‌های عملیاتی برای کشف الگوهای پنهان و روابط غیرخطی در فرایند پذیرش محصول بهره گرفته‌اند [۱۸]. در بخش دیگری از ادبیات، اصل کشش و نقش بازار در هدایت تصمیمات تولیدی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹]. این مطالعات بر این نکته تأکید دارند که پذیرش محصول صرفاً نتیجه عملکرد داخلی سازمان نیست، بلکه بازتابی از هم‌راستایی تولید با نیاز واقعی مشتریان است [۲۰]. ابزارهای مورد استفاده در این حوزه عمدتاً شامل تحلیل بازخورد مشتری، شاخص‌های



رضایت، مدل‌های ارزیابی عملکرد بازار و روش‌های آماری کلاسیک بوده‌اند [۲۱]. اگرچه این پژوهش‌ها توانسته‌اند اهمیت پاسخ‌گویی به تقاضای بازار را نشان دهند، اما اتصال سیستماتیک میان داده‌های تولید، کیفیت فرایند و الگوهای پذیرش محصول در سطح تصمیم‌گیری عملیاتی کمتر به صورت ساخت‌یافته تحلیل شده است [۲۲]. در نهایت، اصل کمال و بهبود مستمر به عنوان یکی از ارکان اساسی تولید ناب، در بسیاری از پژوهش‌ها با تأکید بر توسعه منابع انسانی، یادگیری سازمانی و استفاده از ابزارهای کنترلی و پایشی مطرح شده است [۲۳]. این مطالعات غالباً از چارچوب‌های بهبود مستمر، ارزیابی بلوغ ناب و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای سنجش پیشرفت سازمان‌ها استفاده کرده‌اند [۲۴]. با وجود غنای مفهومی این پژوهش‌ها، روش‌های مورد استفاده بیشتر بر ارزیابی وضعیت موجود یا رتبه‌بندی عوامل تمرکز داشته و کمتر به سمت طراحی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و استخراج قواعد تصمیم‌یار مبتنی بر داده‌های واقعی تولید حرکت کرده‌اند. در مجموع، مرور تحلیلی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه اصول تولید ناب به صورت گسترده در ارتباط با عملکرد، کیفیت و رضایت مشتری بررسی شده‌اند، اما استفاده از رویکردهای داده‌محور پیشرفته برای استخراج قوانین مؤثر بر پذیرش محصول، به‌ویژه با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، در ادبیات موجود کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این خلأ به‌ویژه در پیوند میان انتخاب نظام‌مند متغیرها، تحلیل داده‌های واقعی تولید و استخراج قواعد قابل تفسیر برای تصمیم‌گیری‌های عملیاتی مشهود است؛ مسئله‌ای که پژوهش حاضر با ترکیب تحلیل دلفی فازی و مدل‌سازی مبتنی بر درخت تصمیم در محیط تولید ناب به دنبال پاسخ‌گویی به آن است. در جدول شماره ۱ خلاصه پیشینه پژوهش متناسب با موضوع پژوهش مشاهده می‌گردد.

جدول ۱. خلاصه پیشینه پژوهش

ردیف	منبع	متغیرهای مرتبط (گروه‌بندی شده)	اصل تولید ناب	منابع
۱	مطالعات پیشین حوزه تولید ناب و کیفیت	نرخ خطای انسانی، نرخ خرابی تجهیزات، درصد تعمیرات اضطراری، مدت زمان انبارش مواد اولیه پیش از مصرف، نرخ ضایعات مواد اولیه، درصد ضایعات تولید روزانه، میزان تأیید کیفی با نمره ارفاقی، تعداد خطاهای بازرسی نهایی، نرخ مرجوعی به دلیل خرابی، هزینه‌های کیفیت پایین، توقفات تولید	حذف اتلاف	[۱، ۱۱، ۱۵، ۲۱]



ردیف	منبع	متغیرهای مرتبط (گروه بندی شده)	اصل تولید ناب	منابع
۲	مطالعات پیشین حوزه تولید ناب	مدت زمان چرخه تولید، شیفیت تولید، انحراف از برنامه تولید، توقفات تولید، مدت زمان انبارش مواد اولیه پیش از مصرف	جریان پیوسته	[۱،۲،۵،۲۲]
۳	مطالعات پیشین تولید ناب و مدیریت کیفیت	کیفیت مواد اولیه، شفافیت گزارش های تولید، استفاده از داده های کنترل کیفیت، قابلیت ردیابی مواد اولیه، تطابق عملکرد با شاخص های استاندارد، هزینه های کیفیت پایین، انطباق با نیاز بازار	جریان ارزش	[۵،۷]
۴	مطالعات پیشین پذیرش محصول و تولید ناب	درصد بازگشت محصول از مشتری، رضایت مشتری، انطباق با نیاز بازار	کشش	[۴،۵،۹،۱۱،۱۳،۲۲]
۵	مطالعات پیشین بهبود مستمر، ناب و داده محوری	کیفیت مواد اولیه، درصد ضایعات تولید روزانه، میزان آموزش نیروی انسانی، بهره وری منابع انسانی، رضایت مشتری، تطابق عملکرد با شاخص های استاندارد، میزان استفاده از روش های پایش هوشمند فرآیندها، شفافیت گزارش های تولید	کمال	[۷،۸،۹،۱۵]

مرور نظام مند ادبیات نشان می دهد که اگرچه پژوهش های متعددی به بررسی ابعاد تولید ناب، پذیرش محصول و پیامدهای عملیاتی آن ها پرداخته اند، اما سه خلاً اساسی همچنان در ادبیات باقی مانده است. نخست، اغلب مطالعات ماهیتی توصیفی یا علی داشته و کمتر به طراحی مدل های پیش بینی کننده مبتنی بر داده های واقعی تولید توجه کرده اند. دوم، ارتباط میان شاخص های فرآیندی تولید ناب و پذیرش محصول به صورت یکپارچه و داده محور مدل سازی نشده است. سوم، کاربرد الگوریتم های یادگیری ماشین در این حوزه عمدتاً با تمرکز بر دقت پیش بینی بوده و به تفسیرپذیری و استخراج قواعد تصمیم گیری عملیاتی توجه اندکی شده است. پژوهش حاضر با تمرکز بر استخراج قوانین قابل فهم و قابل استفاده مدیریتی، این خلاً را پوشش داده است.



۳- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، در زمره پژوهش‌های کاربردی قرار می‌گیرد؛ زیرا با تمرکز بر داده‌های واقعی تولید، به دنبال ارائه یک چارچوب تصمیم‌یار قابل اجرا برای استخراج قوانین مؤثر بر پذیرش محصولات در محیط تولید ناب است. از نظر ماهیت، این پژوهش با رویکرد آمیخته (کیفی-کمی) طراحی شده است. داده‌های مورد استفاده در پژوهش در دو سطح گردآوری شده‌اند. در سطح نخست، داده‌های کیفی از طریق اخذ نظرات خبرگان حوزه تولید ناب و مدیریت کیفیت جمع‌آوری شده است. در سطح دوم، داده‌های کمی شامل ۴۲۰۰ رکورد واقعی از خطوط تولید گروه صنایع غذایی زر استخراج شده است. فرایند اجرای پژوهش در دو مرحله اصلی انجام شده است. در مرحله کیفی، از روش دلفی فازی^۱ برای غربال‌گری و اولویت‌بندی شاخص‌های اولیه استفاده شده است. این روش با بهره‌گیری از متغیرهای زبانی و اعداد فازی مثلثی، امکان تجمع و تحلیل نظرات خبرگان را در شرایط عدم قطعیت فراهم می‌کند. جامعه آماری این مرحله شامل ۱۵ نفر از خبرگان تولید ناب و مدیریت کیفیت در صنایع غذایی بوده که با روش نمونه‌گیری هدفمند انتخاب شده‌اند. معیارهای انتخاب خبرگان شامل حداقل مدرک کارشناسی ارشد، سابقه حرفه‌ای حداقل ۱۰ سال و تجربه عملی یا مدیریتی مرتبط در حوزه تولید ناب و کنترل کیفیت بوده است. در مرحله کمی، متغیرهای منتخب دلفی فازی به عنوان متغیرهای ورودی مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پیش از مدل‌سازی، داده‌ها تحت فرایند پیش‌پردازش شامل پاک‌سازی داده‌های ناقص، حذف داده‌های پرت و نرمال‌سازی قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، برای ارزیابی عملکرد مدل پایه، الگوریتم درخت تصمیم^۲ CART به کار گرفته شده و به منظور افزایش اعتبار نتایج، عملکرد آن با چند الگوریتم داده‌محور مرتبط شامل جنگل تصادفی^۳، گرادیان بوستینگ^۴ و ایکس جی بوست^۵ مقایسه شده است. تمامی مدل‌ها بر اساس تعریف خروجی دودویی (پذیرفته‌شده/ردشده) آموزش داده شده‌اند تا قابلیت مقایسه منصفانه میان آن‌ها فراهم شود. این ساختار

^۱ Fuzzy Delphi Method

^۲ Classification and Regression Trees

^۳ Random Forest

^۴ Gradient Boosting

^۵ XGBoost



روش شناختی چندمرحله‌ای موجب شده است که مدل پیشنهادی پژوهش علاوه بر اتکاء به مبانی نظری تولید ناب و دانش خبرگان، از پشتوانه داده‌های واقعی صنعتی و روش‌های محاسباتی نوین برخوردار باشد و قابلیت استفاده به عنوان یک ابزار تصمیم‌یار عملیاتی در محیط‌های تولید ناب را داشته باشد. جهت پیاده سازی از زبان برنامه‌نویسی پایتون برای پیاده‌سازی و ترسیم مدل استفاده شد.

۴- یافته‌های پژوهش

۴-۱- پایش متغیرهای تصمیم‌گیری

در گام نخست، با اتکا به مرور نظام‌مند منابع علمی، کتاب‌های مرجع و مقالات معتبر منتشرشده مرتبط، مجموعاً ۲۵ متغیر اولیه شناسایی و تدوین گردید. سپس نظرات خبرگان با استفاده از مقیاس زبانی پنج‌سطحی فازی مثلثی متناظر تبدیل گردید. تجمیع نظرات خبرگان با استفاده از میانگین فازی انجام شد و برای تبدیل مقادیر فازی به مقادیر قطعی، روش مرکز ثقل^۱ به کار گرفته شد. فرآیند دلفی فازی در دو راند متوالی اجرا گردید و معیار توقف زمانی برقرار تلقی شد که تغییر امتیاز دفازی‌شده شاخص‌ها بین دو راند کمتر از ۰.۱۰ باشد که نشان‌دهنده همگرایی نظرات خبرگان است [۲۵]. خروجی راند اول و دوم دلفی فازی در جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۲. خروجی راند اول و دوم دلفی فازی

ردیف	نام متغیر	مقدار فازی مثلثی راند دوم (L, M, U)	مقدار دلفی فازی شده راند دوم	مقدار دلفی فازی شده راند اول	دامنه اختلاف
۱	درصد خطای انسانی در عملیات	(۴,۵, ۵,۲, ۶,۱)	۵.۲۷	۵.۲۳	۰.۰۴
۲	نرخ ضایعات مواد اولیه	(۵,۵, ۶,۰, ۶,۶)	۶.۰۳	۶.۰۰	۰.۰۳
۳	نرخ خرابی تجهیزات	(۵,۱, ۵,۸, ۶,۴)	۵.۷۷	۵.۷۳	۰.۰۴
۴	درصد آموزش‌پذیری نیروی انسانی	(۵,۲, ۶,۰, ۶,۸)	۶.۰۰	۶.۱۰	۰.۱
۵	شیفت تولید	(۷,۰, ۷,۶, ۸,۱)	۷.۵۷	۷.۶۳	۰.۰۶
۶	نرخ رضایت مشتری	(۵,۵, ۶,۰, ۶,۶)	۶.۰۳	۶.۰۳	۰
۷	نرخ بازگشت محصول از مشتری	(۷,۱, ۷,۷, ۸,۴)	۷.۷۳	۷.۶۳	۰.۱

^۱ Centroid



ردیف	نام متغیر	مقدار فازی مثلثی راند دوم (L, M, U)	مقدار دی‌فازی‌شده راند دوم	مقدار دی‌فازی‌شده راند اول	دامنه اختلاف
۸	درصد بهره‌وری نیروی انسانی	(۴,۸, ۵,۳, ۶,۰)	۵,۳۷	۵,۴۳	۰,۰۶
۹	تطابق محصول با نیاز بازار	(۵,۹, ۶,۵, ۷,۱)	۶,۵۰	۶,۴۷	۰,۰۳
۱۰	درصد استفاده از داده‌های کنترلی	(۶,۰, ۶,۶, ۷,۲)	۶,۶۰	۶,۶۳	۰,۰۳
۱۱	میانگین زمان انتظار در خط تولید	(۵,۳, ۶,۱, ۶,۸)	۶,۰۷	۵,۹۷	۰,۰۱
۱۲	درصد انطباق با استاندارد مواد اولیه	(۷,۳, ۷,۹, ۸,۵)	۷,۹۰	۷,۸۰	۰,۰۱
۱۳	تعداد توقفات خط تولید	(۵,۴, ۶,۰, ۶,۷)	۶,۰۳	۶,۰۳	۰
۱۴	زمان چرخه تولید	(۵,۷, ۶,۲, ۶,۹)	۶,۲۷	۶,۲۳	۰,۰۴
۱۵	میانگین زمان انبارش مواد اولیه	(۷,۱, ۷,۶, ۸,۰)	۷,۵۷	۷,۶۰	۰,۰۳
۱۶	نرخ اعمال نمره کیفی ارفاقی	(۷,۲, ۷,۸, ۸,۴)	۷,۸۰	۷,۷۰	۰,۰۱۰
۱۷	تعداد خطاهای گزارش‌شده	(۵,۰, ۵,۶, ۶,۳)	۵,۶۳	۵,۶۳	۰
۱۸	سطح شفافیت در گزارش‌های تولید	(۶,۰, ۶,۵, ۷,۰)	۶,۵۰	۶,۵۰	۰
۱۹	هزینه‌های ناشی از کیفیت پایین	(۶,۱, ۶,۷, ۷,۳)	۶,۷۰	۶,۶۰	۰,۰۱۰
۲۰	درصد ضایعات تولید روزانه	(۷,۲, ۷,۸, ۸,۴)	۷,۸۰	۷,۸۷	۰,۰۷
۲۱	قابلیت ردیابی مواد اولیه	(۵,۹, ۶,۴, ۷,۰)	۶,۴۳	۶,۳۳	۰,۰۱
۲۲	میزان انحراف از برنامه تولید	(۵,۵, ۶,۱, ۶,۸)	۶,۱۳	۶,۲۳	۰,۰۱
۲۳	نرخ مرجوعی محصول به دلیل خرابی	(۶,۰, ۶,۵, ۷,۱)	۶,۵۳	۶,۶۰	۰,۰۷
۲۴	درصد تعمیرات اضطراری	(۵,۸, ۶,۳, ۶,۹)	۶,۳۳	۶,۲۳	۰,۰۱
۲۵	درصد تطابق عملکرد با شاخص‌ها	(۶,۰, ۶,۴, ۷,۰)	۶,۴۷	۶,۵۰	۰,۰۳

متغیرهایی که امتیاز آن‌ها کمتر از آستانه توافق خبرگان (۰,۷۰) بود حذف گردیدند. در نهایت، ۶ شاخص که بالاترین امتیاز دفازی‌شده و بیشترین اجماع خبرگان را داشتند، به‌عنوان متغیرهای ورودی نهایی انتخاب شدند. به‌منظور افزایش اعتبار انتخاب متغیرهای ورودی و ایجاد پیوند روش‌شناختی میان روش دلفی فازی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، از یک رویکرد ترکیبی شامل آزمون‌های آماری کلاسیک و روش‌های داده‌محور اعتبارسنجی ویژگی‌ها استفاده شد.



مهرناز بهرام زاد و همکاران ————— یک رویکرد داده‌محور در استخراج...

جدول ۳. آزمون تمایز آماری (کروسکال-والیس) شاخص‌های ورودی نسبت به طبقات نرخ پذیرش

شاخص ورودی	مقدار آماره	مقدار p	اندازه اثر (ϵ^2)	نتیجه
زمان تولید (شیفت کاری)	۱۸.۴۲	۰.۰۰۱	۰.۲۱	معنادار
درصد تطابق مواد اولیه با استانداردهای کیفی	۳۶.۷۵	<۰.۰۰۱	۰.۳۸	معنادار
نرخ تأیید استثنایی محصول	۲۲.۱۰	<۰.۰۰۱	۰.۲۶	معنادار
درصد ضایعات تولید روزانه	۴۱.۶۳	<۰.۰۰۱	۰.۴۴	معنادار
میانگین زمان انبارش مواد اولیه	۲۹.۵۸	<۰.۰۰۱	۰.۳۱	معنادار
درصد بازگشت محصول از مشتری	۲۵.۹۰	<۰.۰۰۱	۰.۲۸	معنادار

جدول ۴. تحلیل‌های تشخیصی همپوشانی و اهمیت داده‌محور شاخص‌های ورودی

شاخص ورودی	عامل تورم واریانس	اطلاعات متقابل	اهمیت جابجایی
زمان تولید (شیفت کاری)	۱.۴۲	۰.۱۸	۰.۰۴۱
درصد تطابق مواد اولیه با استانداردهای کیفی	۱.۸۵	۰.۴۶	۰.۱۱۲
نرخ تأیید استثنایی محصول	۱.۶۷	۰.۲۹	۰.۰۶۴
درصد ضایعات تولید روزانه	۱.۹۱	۰.۵۲	۰.۱۳۸
میانگین زمان انبارش مواد اولیه	۱.۵۸	۰.۳۳	۰.۰۷۱
درصد بازگشت محصول از مشتری	۱.۴۹	۰.۲۷	۰.۰۵۹

نتایج جدول شماره ۳ نشان می‌دهد که تمامی شاخص‌های منتخب، تفاوت آماری معناداری میان طبقات نرخ پذیرش محصول ایجاد می‌کنند ($p < ۰.۰۰۱$). مقادیر اندازه اثر نیز بیانگر آن است که این متغیرها علاوه بر معناداری آماری، از نظر عملیاتی نقش قابل توجهی در تفکیک سطوح مختلف پذیرش محصول دارند. بر اساس جدول شماره ۴، مقادیر عامل تورم واریانس کمتر از ۲ برای تمامی شاخص‌ها نشان‌دهنده عدم وجود همپوشانی و چندهمخطی معنادار میان متغیرهای ورودی است. همچنین نتایج اطلاعات متقابل و اهمیت جابجایی حاکی از آن است که شاخص‌های منتخب، حتی مستقل از ساختار درخت تصمیم، سهم معناداری در پیش‌بینی نرخ پذیرش محصول دارند و اهمیت آن‌ها صرفاً وابسته به یک مدل خاص نیست. ترکیب آزمون کروسکال-والیس به‌عنوان ابزار اعتبارسنجی آماری و تحلیل‌های تشخیصی انتخاب ویژگی به‌عنوان روش‌های داده‌محور، نشان می‌دهد که شاخص‌های منتخب نه تنها از اجماع خبرگان



در روش دلفی فازی برخوردارند، بلکه از منظر داده‌های واقعی تولید نیز دارای توان تمایز، استقلال و اهمیت پیش‌بینی‌کننده هستند. این اعتبارسنجی دوگانه، مبنای مستحکمی برای استفاده از این شاخص‌ها در مرحله مدل‌سازی یادگیری ماشین و استخراج قوانین تصمیم‌گیری فراهم می‌سازد.

۴-۲- مدل‌سازی و تحلیل الگوریتم‌ها

در این پژوهش، هدف از به‌کارگیری الگوریتم درخت تصمیم، پیش‌بینی نرخ پذیرش محصول بر اساس داده‌های ثبت‌شده در واحدهای تولید، کنترل کیفیت، و فروش در صنعت غذایی است. در این پژوهش، مسئله پیش‌بینی نرخ پذیرش محصول به‌عنوان یک مسئله طبقه‌بندی نظارت‌شده در نظر گرفته شده است. نرخ پذیرش محصول در بازه ۰ تا ۱۰۰ تعریف شد و بر اساس استاندارد کنترل کیفیت سازمان مورد تحلیل، دو طبقه پذیرش (≤ 70) و عدم پذیرش (> 70) تعیین گردید. انتخاب متغیرهای ورودی بر اساس فرایند روش دلفی فازی از خبرگان صورت گرفت. ۶ متغیر ورودی انتخاب گردید. این متغیرها به‌صورت عددی و قابل اندازه‌گیری بوده و مبتنی بر سه فرآیند اصلی زنجیره تأمین (تأمین، تولید، فروش) و اصول تولید ناب می‌باشند. در جدول شماره ۵ متغیرهای ورودی و خروجی مدل پیش‌بینی نرخ پذیرش محصول مشاهده می‌شود.

جدول ۵. متغیرهای ورودی و خروجی مدل پیش‌بینی نرخ پذیرش محصول

ردیف	عنوان متغیر	علامت اختصاری	نوع متغیر
۱	زمان تولید (شیفت کاری)	TShift	ورودی
۲	درصد تطابق مواد اولیه با استانداردهای کیفی	RMIQ	ورودی
۳	نرخ تأیید استثنایی محصول نهایی (نمرات ارفاقی)	EQA	ورودی
۴	درصد ضایعات تولید روزانه	WRate	ورودی
۵	میانگین زمان انبارش مواد اولیه پیش از مصرف	RMStorageTime	ورودی
۶	درصد بازگشت محصول از مشتری	PRRate	ورودی
۷	نرخ پذیرش محصول توسط بازار (رد/قبول)	AcceptanceRate	خروجی

داده‌ها از واحدهای تولید، کنترل کیفیت و فروش در یک بازه زمانی ۲ ساله استخراج گردید که شامل ۴۲۰۰ رکورد روزانه برای چهار محصول مختلف بود. این داده‌ها شامل اطلاعات کیفی، تولیدی، و فروش هر محصول در روزهای خاص بود که به‌صورت دقیق با یکدیگر هم‌راستا و



یکپارچه شدند. برچسب گذاری داده ها پس از فرایند پاک سازی، بر اساس نتایج ثبت شده واحد کنترل کیفیت و مطابق با رویه های رسمی پذیرش یا عدم پذیرش محصول در شرکت های مورد مطالعه انجام شده است. برای آموزش و ارزیابی عملکرد مدل، داده های نهایی به سه بخش مجزا تقسیم شدند: مجموعه آموزش شامل ۲۹۴۰ رکورد (۷۰٪ از کل داده ها)، مجموعه اعتبارسنجی شامل ۶۳۰ رکورد (۱۵٪ از کل داده ها) و مجموعه آزمون شامل ۶۳۰ رکورد (۱۵٪ از کل داده ها). به منظور ارزیابی منصفانه و کاهش وابستگی نتایج به یک تقسیم بندی خاص از داده ها، از روش اعتبارسنجی متقاطع^۱ با مقدار $K=5$ استفاده شد. در این روش، داده ها به پنج زیرمجموعه هم اندازه تقسیم شدند و در هر تکرار، چهار زیرمجموعه برای آموزش و یک زیرمجموعه برای آزمون مدل مورد استفاده قرار گرفت. شاخص های عملکرد نهایی به صورت میانگین نتایج پنج تکرار گزارش شده اند. توزیع طبقات متغیر خروجی نشان داد که کلاس های نرخ پذیرش محصول از توازن نسبی برخوردارند و اختلاف شدیدی میان تعداد نمونه های هر کلاس وجود ندارد. برای ساخت درخت، الگوریتم CART به کار گرفته شد که یکی از پرکاربردترین الگوریتم های درخت تصمیم است. این الگوریتم با استفاده از معیار جینی برای انتخاب بهترین تقسیم در هر گره، ساختار درخت را به صورت بازگشتی گسترش می دهد. به منظور افزایش دقت و جلوگیری از پیچیدگی بیش از حد مدل، محدودیت هایی نظیر حداکثر عمق درخت، حداقل تعداد نمونه در هر برگ و حداقل نمونه برای تقسیم نیز در مدل سازی اعمال شدند. محاسبه معیارهای تقسیم برای متغیرهای ورودی در جدول شماره ۶ مشاهده می شود.

جدول ۶. محاسبه معیارهای تقسیم برای متغیرهای ورودی

ردیف	متغیر	شاخص جینی	کسب اطلاعات
۱	زمان تولید (شیفت کاری)	۰.۳۱۵	۰.۲۱۰
۲	درصد تطابق مواد اولیه با استانداردها	۰.۲۷۰	۰.۲۴۵
۳	درصد تأیید با نمره کیفی ارفاقی	۰.۳۹۸	۰.۱۸۰
۴	درصد ضایعات تولید روزانه	۰.۲۵۵	۰.۲۶۰
۵	میانگین زمان انبارش مواد اولیه	۰.۲۹۰	۰.۲۲۰
۶	درصد بازگشت محصول از مشتری	۰.۳۶۰	۰.۱۹۵

^۱ K-Fold



۳-۴- ارزیابی عملکرد مدل

به منظور ارزیابی جامع عملکرد مدل پیشنهادی، در این پژوهش از چهار الگوریتم درخت‌پایه شامل درخت تصمیم، جنگل تصادفی، Gradient Boosting و XGBoost استفاده شد. انتخاب این الگوریتم‌ها با هدف حفظ همگنی ساختاری، امکان مقایسه منصفانه و بررسی اثر افزایش پیچیدگی مدل‌های درخت‌پایه انجام گرفت. درخت تصمیم به عنوان مدل پایه و تفسیرپذیر انتخاب شد، در حالی که جنگل تصادفی و الگوریتم‌های تقویتی به عنوان نسخه‌های پیشرفته‌تر، امکان ارزیابی میزان بهبود دقت پیش‌بینی در مقابل افزایش پیچیدگی مدل را فراهم می‌کنند.

جدول ۷. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی پذیرش محصول

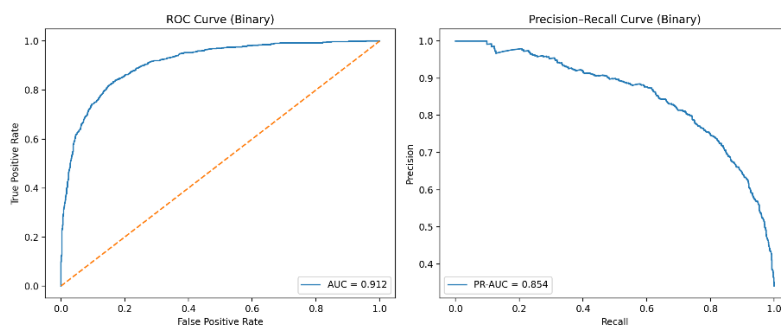
معیار	عنوان معیار	درخت تصمیم (CART)	جنگل تصادفی (RF)	Gradient Boosting	XGBoost
دقت کلی مدل	Accuracy	۰.۹۱۱	۰.۹۰۶	۰.۹۰۴	۰.۹۰۸
دقت پیش‌بینی مثبت‌ها	Precision	۰.۸۷۵	۰.۸۶۹	۰.۸۶۶	۰.۸۷۱
نرخ شناسایی مثبت واقعی	Recall	۰.۸۶۲	۰.۸۵۸	۰.۸۵۵	۰.۸۶۰
شاخص ترکیبی دقت و یادآوری	F1-Score	۰.۸۶۸	۰.۸۶۳	۰.۸۶۰	۰.۸۶۵
سطح تمایز مدل	ROC	۰.۹۱۲	۰.۹۰۵	۰.۹۰۳	۰.۹۰۹

نتایج جدول شماره ۷ نشان می‌دهد که مدل درخت تصمیم در تمامی شاخص‌های ارزیابی عملکرد، بهترین یا رقابتی‌ترین نتایج را در مقایسه با سایر الگوریتم‌های درخت‌پایه ارائه داده است. اگرچه مدل‌های تجمیعی و تقویتی نیز عملکرد قابل قبولی داشته‌اند، اما بهبود معناداری نسبت به درخت تصمیم مشاهده نمی‌شود. از این رو، با توجه به عملکرد پایدار، سادگی ساختار و قابلیت بالای تفسیرپذیری، مدل درخت تصمیم به عنوان گزینه نهایی برای پیش‌بینی پذیرش محصول انتخاب شد. در جدول شماره ۸، قوانین تصمیم‌گیری استخراج‌شده از ساختار نهایی درخت تصمیم، به همراه شاخص‌های کمی مربوطه ارائه شده‌اند که مبنای تحلیل‌های بعدی پژوهش را تشکیل می‌دهند.



جدول ۸. قوانین تصمیم‌گیری استخراج شده از مدل درخت تصمیم هرس شده

ردیف	قانون	تعداد نمونه پشتیبان	درصد پوشش	سطح اطمینان	نتیجه نهایی
۱	اگر درصد ضایعات تولید $\geq 4.03\%$ و زمان انبارش مواد اولیه ≥ 0.349 و درصد تطابق مواد اولیه با استاندارد $\geq 87.62\%$ باشد	۴۰۲	۸.۳۸	۰.۹۲۵	رد
۲	اگر درصد ضایعات تولید $\geq 4.03\%$ و زمان انبارش مواد اولیه ≥ 0.349 و درصد تطابق مواد اولیه با استاندارد $> 87.62\%$ باشد	۱۶۶	۳.۴۶	۰.۶۹۳	پذیرش
۳	اگر درصد ضایعات تولید $\geq 4.03\%$ و زمان انبارش مواد اولیه > 0.349 و شیفیت تولید ≥ 2 باشد	۹۱۴	۱۹.۰۴	۰.۹۵۸	پذیرش
۴	اگر درصد ضایعات تولید $\geq 4.03\%$ و زمان انبارش مواد اولیه > 0.349 و شیفیت تولید > 2 باشد	۴۶۹	۹.۷۷	۰.۵۸۲	پذیرش
۵	اگر درصد ضایعات تولید $> 4.03\%$ و زمان انبارش مواد اولیه ≥ 0.300 و زمان انبارش مواد اولیه ≥ 0.151 باشد	۳۵۰	۷.۲۹	۰.۹۱۴	پذیرش
۶	اگر درصد ضایعات تولید $> 4.03\%$ و زمان انبارش مواد اولیه ≥ 0.300 و زمان انبارش مواد اولیه > 0.151 باشد	۳۷۵	۷.۸۱	۰.۹۶۳	پذیرش
۷	اگر درصد ضایعات تولید $> 4.03\%$ و زمان انبارش مواد اولیه ≥ 0.300 و زمان انبارش مواد اولیه ≥ 0.151 باشد	۷۷۸	۱۶.۲۱	۰.۹۷۲	رد
۸	اگر درصد ضایعات تولید $> 4.03\%$ و زمان انبارش مواد اولیه > 0.300 و زمان انبارش مواد اولیه > 0.151 باشد	۱۳۴۶	۲۸.۰۴	۰.۹۴۴	رد



شکل ۱. نمودار ROC Curve و Precision-Recall Curve



نمودار شماره ۱ مربوط به مدل درخت تصمیم دودویی نشان می‌دهد که مدل از توان تمایز مناسبی میان کلاس‌های «پذیرفته‌شده» و «ردشده» برخوردار است. به‌منظور بررسی پایداری مدل و ارزیابی حساسیت نتایج نسبت به تغییرات ورودی‌ها، تحلیل حساسیت بر روی مدل درخت تصمیم (CART) انجام شد. در این راستا، از دو رویکرد مکمل شامل «تحلیل حذف ویژگی‌ها و پایداری عملکرد با اعتبارسنجی متقاطع (K-Fold) استفاده گردید تا مشخص شود عملکرد مدل تا چه میزان به حضور هر ویژگی و نیز به تقسیم‌بندی داده‌ها وابسته است.

جدول ۹. تحلیل حساسیت مبتنی بر حذف ویژگی‌ها

سناریو	ویژگی حذف‌شده	Accuracy	Δ Accuracy	AUC	Δ AUC
مدل کامل	—	۰.۹۱۱	۰.۰۰۰	۰.۹۱۲	۰.۰۰۰
حذف ویژگی ۱	زمان تولید (شیفت کاری)	۰.۹۰۵	-۰.۰۰۶	۰.۹۰۶	-۰.۰۰۶
حذف ویژگی ۲	درصد تطابق مواد اولیه با استانداردهای کیفی	۰.۸۹۲	-۰.۰۱۹	۰.۸۸۹	-۰.۰۲۳
حذف ویژگی ۳	نرخ تأیید استثنایی محصول	۰.۹۰۰	-۰.۰۱۱	۰.۹۰۱	-۰.۰۱۱
حذف ویژگی ۴	درصد ضایعات تولید روزانه	۰.۸۸۸	-۰.۰۲۳	۰.۸۸۴	-۰.۰۲۸
حذف ویژگی ۵	میانگین زمان انبارش مواد اولیه	۰.۸۹۷	-۰.۰۱۴	۰.۸۹۶	-۰.۰۱۶
حذف ویژگی ۶	درصد بازگشت محصول از مشتری	۰.۹۰۲	-۰.۰۰۹	۰.۹۰۳	-۰.۰۰۹

نتایج جدول شماره ۹ نشان می‌دهد حذف هر یک از ویژگی‌های ورودی موجب افت عملکرد مدل می‌شود که بیانگر نقش مؤثر آن ویژگی در پیش‌بینی نرخ پذیرش محصول است. در مجموع، نتایج تحلیل حذف ویژگی‌ها نشان‌دهنده وابستگی منطقی مدل به متغیرهای کلیدی و پایداری ساختار تصمیم‌گیری در مدل CART است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش فراتر از ارائه یک مدل پیش‌بینی، نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از داده‌های عملیاتی محیط‌های تولید ناب، دانش تصمیم‌یار قابل تفسیر استخراج کرد؛ دانشی که قابلیت ترجمه مستقیم به قواعد مدیریتی و اقدامات اصلاحی در محیط‌های واقعی تولید را دارد. این رویکرد با جریان غالب پژوهش‌های اخیر که بر حرکت از تحلیل‌های توصیفی به سمت تحلیل‌های پیش‌بینی‌محور در سیستم‌های تولیدی تأکید دارند، هم‌راستا است. یافته‌ها با مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد که بر نقش محوری کیفیت ورودی‌ها، پایداری فرایند و کنترل



ضایعات به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده عملکرد کیفی در سیستم‌های ناب تأکید کرده‌اند [۸،۱۰]. نتایج مدل‌سازی مبتنی بر الگوریتم درخت تصمیم نشان داد که کیفیت مواد اولیه و میزان ضایعات تولید روزانه بیشترین نقش را در تعیین سرنوشت محصول دارند و در چندین مسیر تصمیم‌گیری به‌عنوان نقاط اصلی انشعاب ظاهر شدند. این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌هایی که نشان داده‌اند انحراف در کیفیت مواد اولیه و ناپایداری فرایند، اثر مستقیمی بر نرخ پذیرش و بازکاری محصول دارند، سازگار است [۴،۲۴]. در مقایسه با مطالعاتی که صرفاً آزمون فرضیه برای پیش‌بینی کیفیت استفاده کرده‌اند، مزیت اصلی رویکرد حاضر در تفسیرپذیری ساختار تصمیم‌گیری و استخراج قواعد عملیاتی نهفته است. عملکرد مدل درخت تصمیم با دقت بالا، نشان‌دهنده توان بالای مدل در تفکیک محصولات پذیرفته و رد شده است. این سطح از عملکرد با نتایج گزارش‌شده در پژوهش‌های داده‌محور حوزه تولید ناب هم‌تراز بوده و در برخی موارد، به‌ویژه از منظر تفسیرپذیری، برتری محسوسی نسبت به مدل‌های پیشرفته اما غیرقابل تفسیر نشان می‌دهد. [۲۱،۲۲]. از محدودیت‌های این پژوهش، تمرکز داده‌ها بر یک صنعت خاص و مجموعه‌ای مشخص از محصولات است. اگرچه این تمرکز امکان تحلیل عمیق‌تر داده‌های واقعی تولید و استخراج قواعد تصمیم‌گیری دقیق‌تر را فراهم کرده است، اما تعمیم مستقیم نتایج به سایر صنایع یا محیط‌های تولیدی باید با احتیاط انجام شود. با وجود عملکرد مناسب مدل پیشنهادی در پیش‌بینی نرخ پذیرش محصول، باید توجه داشت که تصمیم‌گیری در محیط‌های تولیدی همواره تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل عملیاتی و محیطی قرار دارد که کنترل کامل آن‌ها امکان‌پذیر نیست. عواملی نظیر نوسانات کیفیت مواد اولیه، تغییرات شرایط کاری، وقفه‌های ناگهانی در تجهیزات، تغییرات تقاضای بازار و محدودیت‌های زنجیره تأمین می‌توانند بر داده‌های ورودی مدل و در نتیجه بر خروجی آن اثرگذار باشند. از این رو، نتایج مدل در چارچوب داده‌های تاریخی و شرایط عملیاتی موجود معتبر بوده و کاربرد آن در شرایط متفاوت نیازمند به‌روزرسانی داده‌ها و بازآموزی مدل است.

یافته‌های پژوهش نشان داد که «درصد تطابق مواد اولیه با استانداردهای کیفی» قوی‌ترین عامل تعیین‌کننده نرخ پذیرش محصول است؛ به‌گونه‌ای که هرگونه ضعف در کیفیت ورودی‌ها، حتی در حضور فرایند تولید مناسب، می‌تواند احتمال رد محصول را به‌طور معناداری افزایش دهد. این نتیجه بیانگر ضرورت تمرکز استراتژیک مدیران بر بازطراحی سیستم‌های ارزیابی و تأمین



مواد اولیه و تقویت کنترل‌های کیفی در ابتدای زنجیره تأمین است تا از انتقال نواقص به مراحل بعدی و تحمیل هزینه‌های اصلاحی جلوگیری شود. از سوی دیگر، نتایج مدل درخت تصمیم نشان داد که ضایعات تولید روزانه یکی از مهم‌ترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده رد محصول است و مسیرهای منتهی به عدم پذیرش تقریباً همواره با افزایش ضایعات همراه بوده‌اند. این یافته اهمیت پایش پیوسته فرایند، نگهداشت بهنگام تجهیزات و کاهش نوسانات عملیاتی خطوط تولید را برجسته می‌سازد. در این راستا، به‌کارگیری ابزارهای تولید ناب نظیر نقشه‌برداری جریان ارزش (VSM)، نگهداشت بهره‌ور فراگیر (TPM) و استانداردسازی عملیات می‌تواند نقش مؤثری در کاهش خطاهای عملیاتی، کنترل ضایعات و بهبود کیفیت نهایی محصول ایفا کند. همچنین، قوانین استخراج‌شده از مدل نشان داد که زمان انبارش مواد اولیه طولانی، حتی در شرایط کیفیت اولیه مطلوب، احتمال رد محصول را افزایش می‌دهد. این نتیجه حاکی از آن است که انبارش طولانی‌مدت مواد اولیه می‌تواند منجر به افت کیفیت، ایجاد ناپایداری در جریان تولید و افزایش ریسک عدم پذیرش محصول شود. بنابراین، مدیران باید با بهینه‌سازی سطح موجودی، اصلاح نظام FIFO و کنترل مؤثر گردش مواد، اثرات منفی انبارش را کاهش داده و ثبات فرایند تولید را تقویت کنند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، اثر عوامل محیطی و بازار نظیر نوسانات تقاضا، تغییرات فصلی، شرایط تأمین مواد اولیه و اختلالات زنجیره تأمین در قالب متغیرهای پویا یا داده‌های برون‌سازمانی به مدل افزوده شود. همچنین، توسعه مدل‌های تطبیقی یا به‌روزرسانی دوره‌ای مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند به افزایش پایداری عملکرد مدل در شرایط عملیاتی متغیر کمک نماید.

۶- منابع

- [۱] Deshmukh, M., Gangele, A., Gope, D. K., & Dewangan, S. (۲۰۲۲). Study and implementation of lean manufacturing strategies: A literature review. *Materials Today: Proceedings*, ۶۲(۳), ۱۴۸۹-۱۴۹۵. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.155>
- [۲] Ranjbar Zarenagh, M., Nabatcheian, M. R., Arshadi, M. J., & Roshan Zamir, S. (۲۰۲۴). Identification and prioritization of barriers to lean manufacturing implementation using a hybrid multi-criteria decision-making approach. *Systems Engineering and Productivity*, 4(۳), ۸۳-۱۰۲. <https://doi.org/10.22034/sep.2024.717031>



- [۳] Alivardilou, M., & Ahmadvand, A. M. (۲۰۲۳). Factors influencing the implementation of total quality management and its impact on customer attraction (Case study: Tehran Railway Company). *Systems Engineering and Productivity*, ۳(۱), ۴۱-۶۵. <https://doi.org/10.22034/sep.2023.70.6142> [In Persian].
- [۴] Bashar, A., Hasin, A. A., & Adnan, Z. H. (۲۰۲۱). Impact of lean manufacturing: Evidence from apparel industry in Bangladesh. *International Journal of Lean Six Sigma*, ۱۲(۵), ۹۲۳-۹۴۳. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-01-2020-0005>
- [۵] Abedi, S., Karimi, M. R. and Alinezhad, A. (۲۰۲۵). Predicting and Analyzing Pathways toward Sustainable Development of the Mining Sector under the NZE Scenario: An Integrated Approach Using Fuzzy MCDM and ANFIS. *Journal of Mining and Environment*, (in press), -. doi: 10.22044/jme.2025.16846.33.4
- [۶] Sundararajan, N., & Terkar, R. (۲۰۲۲). Improving productivity in manufacturing industries using lean, Kaizen, and total quality management practices. *Materials Today: Proceedings*, 62(۲), ۱۱۶۹-۱۱۷۸. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.350>.
- [۷] Al-Shboul, M. A. (۲۰۲۵). Assessing sustainability of green supply chain performance: The roles of agile innovative products, business intelligence readiness, innovative supply chain process integration, and lean supply chain capability as a mediating factor. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, ۱۱(۱), ۱۰۰۴۷۶. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100476>
- [۸] Boumsisse, I., Benhadou, M., & Haddout, A. (۲۰۲۵). Optimizing Green Lean Six Sigma using Industry ۴.۰ technologies. *Cleaner Waste Systems*, ۱۰, ۱۰۰۲۳۴. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100234>
- [۹] Bubber, D., Babber, G., Shashi, & Jain, R. K. (۲۰۲۳). Toward increased business productivity: Interlinks between lean thinking, process quality, inventory management, and productivity. *Global Knowledge, Memory and Communication*, ۷۴(۵۶), ۱۵۱۱-۱۵۳۱. <https://doi.org/10.1108/GKMC-03-2023-00۷۹>
- [۱۰] Bueno, A., Caiado, R. G. G., Oliveira, T. L. G. de., Scavarda, L. F., Godinho Filho, M., & Tortorella, G. L. (۲۰۲۳). Lean ۴.۰ implementation framework: Proposition using a multi-method research approach. *International Journal of Production Economics*, ۲۶۴, ۱۰۸۹۸۸. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108988>
- [۱۱] Sahoo, S. (۲۰۲۰). Assessing lean implementation and benefits in Indian manufacturing SMEs: A benchmarking approach. *Benchmarking: An International Journal*, 27(۳), ۱۰۴۲-۱۰۸۴. <https://doi.org/10.1108/BIJ-07-20۱۹-0۲۹۹>
- [۱۲] Eslami Nosratabadi, H., Tarokh, M. J. and Poorebrahimi, A. (۲۰۲۱). Fuzzy expert system to evaluation of bank branch performance using datamining. *Modern*



Research in Decision Making, 6(۴), ۲۳۶-۲۶۱.
DOR: [۲۰,۱۰۰۱,۱,۲۴۷۶۶۲۹۱,۱۴۰۰,۶,۴,۱۰,۴](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142728) [In Persian].

- [۱۳] Costa, F., Alemsan, N., Bilancia, A., Tortorella, G. L., & Portioli Staudacher, A. (۲۰۲۴). Integrating industry ۴.۰ and lean manufacturing for a sustainable green transition: A comprehensive model. *Journal of Cleaner Production*, ۴۶۵, ۱۴۲۷۲۸. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142728>
- [۱۴] Dehghani Filabadi, A., Titekkanlou, H., & Jamali, S. (۲۰۲۵). Identification and ranking of key factors in adopting total quality management using a hybrid Delphi-Fuzzy SWARA approach (Case study: Shiraz Petrochemical Company). *Systems Engineering and Productivity*, e۷۳۱۷۲۴, e۷۳۱۷۲۴. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2071569.1394> [In Persian].
- [۱۵] Díaz Reza, J. R., García Alcaraz, J. L., Sánchez Ramírez, C., Gil López, J. A., Realyvásquez Vargas, A., & Rodríguez Álvarez, J. L. (۲۰۲۵). Achieving strategic goals by continuous improvement and lean manufacturing implementation: A structural equation model-system dynamics approach. *Sustainable Futures*, ۹, ۱۰۰۵۵۱. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100551>
- [۱۶] Dieste, M., Panizzolo, R., & Garza-Reyes, J. A. (۲۰۲۱). A systematic literature review regarding the influence of lean manufacturing on firms' financial performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, ۳۲(۹), ۱۰۱-۱۲۱. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2020-0304>
- [۱۷] Elnadi, M., Gheith, M. H., Troise, C., Bresciani, S., & Abdallah, Y. O. (۲۰۲۵). Examining the interplay of Industry ۴.۰, lean, agile, and circular manufacturing practices on sustainability performance. *Technovation*, ۱۴۶, ۱۰۳۲۹۰. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2025.103290>
- [۱۸] Sunmola, F., Mbafotu, O. R., Salihu-Yusuf, M. L., & Sunmola, H. O. (۲۰۲۴). Lean-green practices and their impact on sustainable manufacturing performance. *Procedia Computer Science*, 232, ۲۰۰۱-۲۰۰۸. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.022>
- [۱۹] Jouya Ardekani, H. and Khakzar Bafruei, M. (۲۰۲۲). Economic design of integrated model of maintenance management and control chart in Kish Wood Industries Company. *Modern Research in Decision Making*, 7(۱). DOR: [۲۰,۱۰۰۱,۱,۲۴۷۶۶۲۹۱,۱۴۰۱,۷,۱,۵,۰](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142728) [In Persian].
- [۲۰] Mohebbi, N., Rad, A. and Motameni, A. (۲۰۲۱). Developing Sustainable Recovery Model Of End-Life Products (Case Study: End-Of Life Vehicle). *Management Research in Iran*, 22(۲), ۲۲۷-۲۴۹. DOR: [۲۰,۱۰۰۱,۱,۲۳۲۲۲۰۰,۱۳۹۷,۲۲,۲,۱۰,۱](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142728) [In Persian].



- [۲۱] Limon-Romero, J., García-Alcaraz, J. L., Gastelum-Acosta, C., Antony, J., Baez-Lopez, Y., & Tortorella, G. (۲۰۲۴). Toward the successful adoption of Lean Six Sigma: A systematic analysis of critical success factors and implementation barriers. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 74(۶), ۱۸۹۷-۱۹۱۸. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-07-2024-0436>
- [۲۲] Marodin, G., Frank, A. G., Tortorella, G. L., & Netland, T. (۲۰۱۸). Lean product development and lean manufacturing: Testing moderation effects of contingency factors. *International Journal of Production Economics*, 203, ۳۰۱-۳۱۰. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.009>
- [۲۳] Fathi, A., azizi, S. and ghareche, M. (۲۰۲۲). The meta-synthesis of Signaling through new product launch strategy. *Management Research in Iran*, 26(۱), ۵۶-۸۶. DOR: [۲۰,۱۰۰۱,۱,۲۳۲۲۰۰,۱۴۰۱,۲۶,۱,۳,۰](https://doi.org/10.22222/mri.1401.26.1.3.0) [In Persian].
- [۲۴] Ojha, R., & Venkatesh, U. (۲۰۲۱). Manufacturing excellence using lean systems: An empirical investigation of performance improvement practices. *Journal of Advances in Management Research*, 19(۱), ۱-۱۱. <https://doi.org/10.1108/JAMR-10-2020-0284>
- [۲۵] Roldán López de Hierro, A. F., Sánchez, M., Puente-Fernández, D., Montoya-Juárez, R., & Roldán, C. (۲۰۲۱). A Fuzzy Delphi Consensus Methodology Based on a Fuzzy Ranking. *Mathematics*, 9(۱۸), ۲۳۲۳. <https://doi.org/10.3390/math9182323>