

کاربست هوش مصنوعی در ارتقای دقت بهای تمام شده و بهره‌وری تولید صنعتی

الهام فراهانی^۱

غلامرضا امیدی^۲

چکیده:

تعیین دقیق بهای تمام شده و ارتقای بهره‌وری تولید از مهم‌ترین چالش‌های مدیریتی در صنایع تولیدی به شمار می‌رود. پیچیدگی فرایندهای تولید، تنوع محصولات و افزایش حجم داده‌های عملیاتی موجب شده است روش‌های سنتی هزینه‌یابی پاسخ‌گوی نیازهای تصمیم‌گیری مدیریتی نباشند. در این پژوهش، با رویکردی تحلیلی-مروری، کاربری هوش مصنوعی در بهبود دقت محاسبه بهای تمام شده و افزایش بهره‌وری تولید صنعتی بررسی می‌شود. روش پژوهش مبتنی بر مرور نظام‌مند مطالعات علمی فارسی و غیرفارسی منتشرشده در سال‌های اخیر و تحلیل محتوای آن‌ها است. یافته‌ها نشان می‌دهد الگوریتم‌های یادگیری ماشین، با بهره‌گیری از داده‌های عملیاتی و بلادرنگ تولید، قادر به شناسایی روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرهای تولیدی و هزینه‌ای هستند و می‌توانند دقت برآورد بهای تمام شده را به‌طور معناداری افزایش دهند. همچنین، به‌کارگیری این روش‌ها امکان پایش مستمر هزینه‌ها، شناسایی انحرافات هزینه‌ای و بهینه‌سازی تخصیص منابع را فراهم می‌سازد که در نهایت منجر به ارتقای بهره‌وری فرایندهای تولید می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد استفاده هدفمند از هوش مصنوعی می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در پشتیبانی تصمیم‌های مدیریتی، بهبود عملکرد مالی و افزایش رقابت‌پذیری صنایع تولیدی مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: بهای تمام شده، بهره‌وری تولید، هزینه‌یابی صنعتی، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین.

^۱. استادیار دانشکده مهندسی کامپیوتر، موسسه آموزش عالی الکترونیکی ایرانیان، تهران. نویسنده مسئول
elham.farahani@iranian.ac.ir

^۲. معاون توسعه سرمایه انسانی و مدیریت منابع وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات.

۱. مقدمه

در عصر انقلاب صنعتی چهارم و صنعت، رقابت صنایع برای کاهش هزینه‌های تولید و ارائه محصولات ارزان‌تر و با کیفیت بالاتر شدت یافته است. پیشرفت فناوری‌های دیجیتال، از جمله هوش مصنوعی^۱ و اینترنت اشیا^۲، و افزایش حجم داده‌های تولیدی، فرصت‌های جدیدی برای تحلیل عمیق فرایندهای تولید فراهم کرده است. با ورود داده‌کاوی و یادگیری ماشین به صنعت، امکان پیش‌بینی تقاضا، کنترل کیفیت خودکار، نگهداری پیش‌بینانه و بهینه‌سازی پارامترهای فرایندها فراهم شده است (محمدی، ۱۴۰۳) (مهرمنش و همکاران، ۱۴۰۳). برای مثال، منابع موجود نشان می‌دهند که استفاده از روش‌های پیشرفته داده‌کاوی می‌تواند در تخمین بهتر هزینه‌های تولید مؤثر باشد (زارع میرک آبادی، ۱۳۸۴). همچنین، پژوهش‌ها حاکی از آن است که با بهره‌گیری از داده‌های تاریخی فرایندهای تولید و فنون یادگیری ماشین می‌توان پیش‌بینی دقیقی از قیمت تمام‌شده ارائه نمود. به‌طور کلی، به‌کارگیری هوش مصنوعی در مدیریت تولید می‌تواند با کاهش خطاهای انسانی و اتوماسیون تصمیم‌ها، کارایی کلی سیستم را افزایش دهد (شاه‌علی، ۱۴۳۰).

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مطالعات پیشین کاربردهای متنوع داده‌کاوی و هوش مصنوعی در صنایع مختلف را نشان داده‌اند. به‌عنوان مثال، (محمدی، ۱۴۰۳) با مرور ادبیات اخیر یادگیری ماشین در صنعت تولید بیان می‌کند که انقلاب صنعتی چهارم منجر به تولید حجم گسترده‌ای از داده‌ها در خطوط تولید شده است و بهره‌گیری از تکنیک‌های هوشمند مبتنی بر این داده‌ها، امکان کاهش هزینه‌های عملیاتی و زمان توقف تولید را فراهم می‌سازد. به‌طور مشابه، (شاه‌علی، ۱۴۰۳) نقش الگوریتم‌های هوش مصنوعی را در بهینه‌سازی فرایندهای تولید و کاهش هزینه‌ها بررسی کرده و گزارش می‌دهد که استفاده از این الگوریتم‌ها می‌تواند مصرف انرژی و مواد اولیه را کاهش داده و خطاهای انسانی در تولید را به حداقل برساند.

در حوزه کنترل کیفیت و پیش‌بینی تقاضا نیز پژوهش‌های کاربردی متعددی انجام شده است. برای نمونه، (مهرمنش و همکاران، ۱۴۰۳) در یک مطالعه موردکاوی در صنعت

^۱ Artificial Intelligent (AI)

^۲ Internet of Things (IoT)

نوشیدنی نشان داده‌اند که به‌کارگیری شبکه‌های عصبی بازگشتی و ماشین بردار پشتیبان^۱ قادر است الگوهای پیچیده تولید را شناسایی کرده و کیفیت خروجی محصولات را بهبود بخشد. در مقیاس کلان‌تر، منابع انگلیسی نیز گزارش کرده‌اند که استفاده از داده‌های کلان و روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند دقت پیش‌بینی هزینه‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. به‌عنوان مثال، برای مثال (هامان^۲، ۲۰۲۴) در یک مطالعه موردی در صنعت خودروسازی نشان می‌دهد که پیش‌بینی هزینه مواد با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، تا ۳.۵ برابر دقیق‌تر از روش‌های سنتی مبتنی بر داده‌های حجیم^۳ است.

علاوه بر این، یک مطالعه جامع دیگر نشان می‌دهد که فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نقش محوری در بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش ضایعات و افزایش انعطاف‌پذیری تولید ایفا می‌کنند (رانی^۴ و همکاران، ۲۰۲۶).

۳. روش‌شناسی

این پژوهش یک مطالعه کیفی - تحلیلی بر پایه مرور سیستماتیک ادبیات است. ابتدا منابع علمی مرتبط (کتاب‌ها و مقالات فارسی و انگلیسی از سال ۲۰۲۰ به بعد) جمع‌آوری و تحلیل شد. سپس با بهره‌گیری از تحلیل محتوا، راهکارهای مختلف داده‌کاوی و هوش مصنوعی در تعیین قیمت تمام‌شده و بهینه‌سازی تولید دسته‌بندی گردید. بر مبنای یافته‌های موجود، یک مدل مفهومی و جداول مقایسه‌ای برای نشان دادن تأثیر روش‌های مختلف ارائه شد. در مرحله نهایی، نتایج استخراج‌شده با پژوهش‌های قبلی تطبیق داده شده و یک بحث انتقادی پیرامون مزایا، چالش‌ها و کاربردهای عملی ارائه گردید.

^۱ Support Vector Machine (SVM)

^۲ Hammann

^۳ Big Data

^۴ Rani, et al.

۴. نقش داده‌های عملیاتی و سیستم‌های اطلاعاتی تولید در مدل‌های هوشمند

هزینه‌یابی

یکی از پیش‌نیازهای اساسی برای به‌کارگیری موفق داده‌کاوی و هوش مصنوعی در تعیین بهای تمام‌شده، دسترسی به داده‌های دقیق، یکپارچه و به‌روز از فرایندهای تولید است. در صنایع مدرن، داده‌های عملیاتی از منابع متعددی نظیر سیستم‌های برنامه‌ریزی منابع سازمانی^۱، سیستم‌های اجرای تولید^۲، سامانه‌های کنترل صنعتی^۳ و حسگرهای اینترنت اشیا^۴ استخراج می‌شوند. این داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به مصرف مواد اولیه، زمان چرخه تولید، توقفات ماشین‌آلات، مصرف انرژی، نرخ ضایعات و کیفیت محصول نهایی هستند.

برخلاف روش‌های سنتی هزینه‌یابی که عمدتاً بر داده‌های تاریخی و تجمیع‌شده حسابداری متکی‌اند، مدل‌های هوشمند هزینه‌یابی مبتنی بر داده‌های عملیاتی قادرند هزینه‌ها را در سطوح مختلفی از جمله فعالیت، سفارش و حتی واحد محصول تحلیل کنند. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که ادغام داده‌های عملیاتی با داده‌های مالی، دقت محاسبه بهای تمام‌شده را به‌طور معناداری افزایش داده و امکان شناسایی فعالیت‌های غیرمولد و منابع اتلاف‌شده را فراهم می‌سازد.

در این چارچوب، داده‌کاوی نقش کلیدی در پاک‌سازی داده‌ها، حذف نویز، شناسایی الگوهای پنهان و کشف روابط غیرخطی میان متغیرهای تولید و هزینه ایفا می‌کند. به‌عنوان مثال، تحلیل خوشه‌ای می‌تواند محصولات یا سفارش‌هایی با الگوی مصرف منابع مشابه را شناسایی کرده و مبنایی برای تخصیص دقیق‌تر سربار تولید فراهم آورد. همچنین، روش‌های کاهش ابعاد نظیر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) قادرند متغیرهای کلیدی اثرگذار بر هزینه را استخراج کرده و پیچیدگی مدل‌های پیش‌بینی را کاهش دهند.

از سوی دیگر، استفاده از داده‌های بلادرنگ^۵ امکان پایش مستمر هزینه‌ها و واکنش سریع مدیران به انحرافات هزینه‌ای را فراهم می‌کند. این موضوع به‌ویژه در صنایع

^۱ Enterprise Resource Planning (ERP)

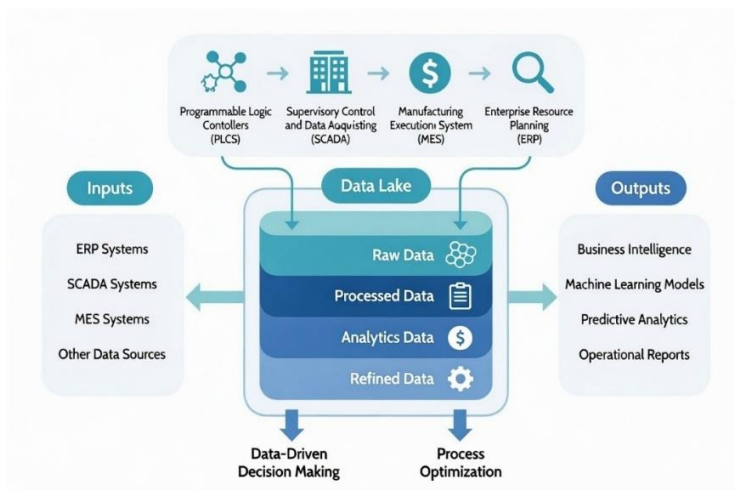
^۲ Manufacturing Execution Systems (MES)

^۳ Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)

^۴ Industrial Internet of Things (IIoT)

^۵ Real-time Data

فرایندی و تولید انبوه، که نوسانات کوچک در پارامترهای تولید می‌تواند منجر به تغییرات قابل توجهی در بهای تمام‌شده شود، از اهمیت بالایی برخوردار است.



شکل ۱ چارچوب مفهومی پیشنهادی برای نقش داده‌های عملیاتی و سیستم‌های اطلاعاتی تولید در هزینه‌یابی هوشمند را نشان می‌دهد. در این مدل، دریاچه داده به‌عنوان هسته مرکزی، داده‌های خام را به داده‌های تحلیلی و پالایش‌شده تبدیل کرده و خروجی‌هایی نظیر تحلیل‌های پیش‌بینی‌کننده و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را ممکن می‌سازد.

۵. کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی و کنترل بهای تمام‌شده

الگوریتم‌های یادگیری ماشین به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی، به‌طور فزاینده‌ای در حوزه پیش‌بینی هزینه‌های تولید مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برخلاف مدل‌های رگرسیونی کلاسیک که مستلزم فرض‌های آماری محدودکننده هستند، مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند بدون نیاز به این فرض‌ها، الگوهای نهفته در داده‌های حجیم تولید را شناسایی کنند.

مطالعات نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱ در پیش‌بینی بهای تمام‌شده محصولات پیچیده عملکرد مطلوبی دارند، به‌ویژه زمانی که تعداد متغیرهای ورودی زیاد

^۱ Artificial Neural Networks (ANN)

و روابط میان آن‌ها غیرخطی باشد. همچنین، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان به دلیل قابلیت تعمیم بالا، در شرایطی که داده‌های آموزشی محدود یا دارای نویز هستند، نتایج قابل اعتمادی ارائه می‌دهد.

در سال‌های اخیر، مدل‌های پیشرفته‌تری مانند گرادیان بوستینگ (XGBoost) و شبکه‌های عصبی عمیق^۱ نیز برای پیش‌بینی هزینه و بهینه‌سازی پارامترهای تولید به کار گرفته شده‌اند. این مدل‌ها قادرند اثر هم‌زمان چندین عامل از جمله مصرف انرژی، زمان توقف ماشین‌آلات، نرخ تولید معیوب و تغییرات تقاضا را بر بهای تمام‌شده تحلیل کنند.

علاوه بر پیش‌بینی، یادگیری ماشین نقش مهمی در کنترل هزینه‌ها ایفا می‌کند. به عنوان مثال، مدل‌های تشخیص ناهنجاری^۲ می‌توانند افزایش غیرعادی هزینه‌ها را در مراحل اولیه شناسایی کرده و از انباشت زیان جلوگیری نمایند. همچنین، ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی با مدل‌های پیش‌بینی، امکان پیشنهاد سناریوهای بهینه تولید با حداقل هزینه را فراهم می‌سازد.

نکته مهم در پیاده‌سازی این مدل‌ها، تفسیرپذیری نتایج است. از آنجا که تصمیمات مرتبط با بهای تمام‌شده تأثیر مستقیمی بر قیمت‌گذاری، سودآوری و گزارشگری مالی دارند، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی توضیح‌پذیر (XAI) می‌تواند اعتماد مدیران و حسابداران به خروجی مدل‌ها را افزایش دهد.

۶. تحلیل یافته‌ها

تحلیل منابع نشان می‌دهد که به‌کارگیری داده‌کاوی و یادگیری ماشین در فرایندهای تولید منجر به بهبودهای چندجانبه در عملکرد صنعتی می‌شود. نخست، بهبود کیفیت محصول و کاهش ضایعات به‌طور ملموسی در مطالعات مختلف گزارش شده است. به عنوان نمونه، (مهرمنش و همکاران، ۱۴۰۳) نشان داده‌اند که استفاده از مدل SVM در کنترل کیفیت محصولات نوشیدنی، منجر به افزایش ۱۲ درصدی کیفیت، کاهش ۳.۲ درصدی ضایعات و بهبود بهره‌وری خطوط تولید شده است.

دومین محور مهم، افزایش دقت پیش‌بینی هزینه‌ها و بهبود برنامه‌ریزی تولید است. مطالعه موردی (هامان، ۲۰۲۴) نشان می‌دهد که به‌کارگیری داده‌های کلان و

^۱ Deep Learning

^۲ Anomaly Detection

الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین، دقت پیش‌بینی هزینه را تا ۳۰۵ برابر نسبت به روش‌های سنتی افزایش می‌دهد. علاوه بر این، بهبود بهره‌وری در مدیریت زمان تولید و نگهداری نیز در پژوهش‌ها مورد تأکید قرار گرفته است؛ به‌گونه‌ای که (شاه‌علی، ۱۴۰۳) گزارش می‌کند اتوماسیون فرایندها با استفاده از هوش مصنوعی، ضمن کاهش خطاهای انسانی، موجب کاهش زمان تولید و هزینه‌های انرژی و مواد اولیه می‌شود. جدول ۱ خلاصه‌ای از نتایج منتخب چند مطالعه کلیدی را ارائه می‌دهد.

جدول ۱. نتایج برجسته استفاده از روش‌های داده‌کاوی و هوش مصنوعی در صنایع مختلف (برگرفته از مطالعات مروری و موردی)

پژوهشگر (سال)	صنعت	روش/الگوریتم	نتایج کلیدی (بهبود/کاهش)
مهرمنش و معین‌زاده (۱۴۰۳) [۳]	نوشیدنی	LSTM, SVM و دیگر مدل‌های ML	بهبود کیفیت محصول: ۳۰۲٪ کاهش ضایعات: ۸۰۹٪ کاهش زمان سفارش: ۱۳۸٪ افزایش بهره‌وری
Hammann [۷] (۲۰۲۴)	خودروسازی (قطعات)	شبکه عصبی و GBR	دقت پیش‌بینی هزینه با استفاده از داده‌های کلان تا ۳۰۵ برابر بیشتر است
شاه‌علی (۱۴۰۳) [۲]	صنایع عمومی	الگوریتم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی	کاهش قابل توجه هزینه انرژی و مواد اولیه؛ کاهش خطای انسانی و زمان تولید

بررسی جدول ۱ نشان می‌دهد که روش‌های یادگیری ماشین تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد خطوط تولید و کاهش هزینه‌ها داشته‌اند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های پیشین هم‌راستا هستند؛ برای مثال، کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی سری‌های زمانی تولید، مشابه نتایج گزارش‌شده توسط (محمدی، ۱۴۰۳) است که نشان می‌دهد این روش‌ها توانایی بالایی در شناسایی الگوهای پیچیده تولید داشته و به افزایش بهره‌وری کمک می‌کنند. به‌طور کلی، یافته‌ها بیانگر آن است که ادغام داده‌کاوی در سیستم‌های تولید، شناسایی دقیق‌تر عوامل مؤثر بر هزینه و کیفیت را ممکن ساخته و در نهایت چارچوب تصمیم‌گیری هوشمندتری برای بهینه‌سازی فرایندها فراهم می‌آورد. در ادامه، جدول ۲ به مقایسه روش‌های سنتی هزینه‌یابی با مدل‌های هوشمند مبتنی بر داده‌کاوی و یادگیری ماشین می‌پردازد.



جدول ۲. مقایسه روش‌های سنتی هزینه‌یابی با مدل‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین

مدل‌های مبتنی بر داده‌کاوی و AI	روش‌های سنتی هزینه‌یابی	معیار مقایسه
عملیاتی، بلادرنگ و حجیم	تاریخی و تجمع‌شده	نوع داده
بالا	متوسط	دقت پیش‌بینی
بسیار بالا	محدود	توان مدل‌سازی روابط غیرخطی
سریع و پویا	کند	واکنش به تغییرات تولید
حداقل	زیاد	نیاز به فرض‌های آماری
دارد	ندارد	قابلیت کنترل هزینه در زمان واقعی

نتایج ارائه‌شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که تفاوت معناداری میان روش‌های سنتی هزینه‌یابی و مدل‌های هوشمند مبتنی بر داده‌کاوی و هوش مصنوعی وجود دارد. در روش‌های سنتی، محاسبه بهای تمام‌شده عمدتاً بر داده‌های تاریخی و تجمع‌شده متکی است که این امر موجب کاهش دقت پیش‌بینی و ناتوانی در واکنش سریع به تغییرات شرایط تولید می‌شود. در مقابل، مدل‌های مبتنی بر داده‌کاوی و یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های عملیاتی و بلادرنگ، امکان تحلیل پویا و دقیق هزینه‌ها را فراهم می‌کنند.

بر اساس جدول ۲، یکی از مهم‌ترین مزایای مدل‌های هوشمند، توانایی بالای آن‌ها در مدل‌سازی روابط غیرخطی میان متغیرهای تولید و هزینه است؛ قابلیت که در روش‌های سنتی، به دلیل اتکا به فرض‌های آماری ساده، به‌شدت محدود است. این ویژگی به مدیران تولید اجازه می‌دهد تأثیر هم‌زمان عواملی نظیر مصرف انرژی، توقف ماشین‌آلات و نرخ ضایعات را بر بهای تمام‌شده شناسایی کنند.

همچنین، نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی امکان کنترل هزینه‌ها در زمان واقعی را فراهم می‌سازند؛ به‌گونه‌ای که انحرافات هزینه‌ای در مراحل اولیه شناسایی شده و اقدامات اصلاحی به‌سرعت اعمال می‌شود. این قابلیت، به‌ویژه در صنایع تولیدی با نوسانات بالا، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مجموع، تحلیل جدول ۲ بیانگر آن است که گذار از روش‌های سنتی هزینه‌یابی به مدل‌های هوشمند مبتنی بر داده‌کاوی و یادگیری ماشین می‌تواند به افزایش دقت محاسبه بهای تمام‌شده، بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی و ارتقای بهره‌وری فرایندهای تولید منجر شود.

۷. بحث

یافته‌های این مطالعه با نتایج پژوهش‌های پیشین هم‌راستا است. به‌عنوان مثال، (شامپا^۱، ۲۰۲۵) بر نقش تحول‌آفرین هوش مصنوعی در بهبود تصمیم‌گیری و افزایش کارایی عملیاتی تأکید می‌کند که این امر، اهمیت داده‌کاوی را در پشتیبانی از تصمیم‌گیری و بهبود فرایندهای تولید تأیید می‌نماید. همچنین، مطالعات برجسته پیشین نشان داده‌اند که تحلیل داده‌های کلان با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، منجر به شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر هزینه و بهینه‌سازی فرایند قیمت‌گذاری می‌شود (هامان، ۲۰۲۴).

از سوی دیگر، برخی پژوهشگران به لزوم رعایت ملاحظات احتیاطی در به‌کارگیری این فناوری‌ها اشاره کرده‌اند. برای نمونه، (آریتا و همکاران، ۲۰۲۰) تأکید می‌کنند که استفاده از روش‌های هوش مصنوعی توضیح‌پذیر در محیط‌های تولیدی باید همراه با ملاحظات امنیتی و الزامات انطباقی باشد تا از بروز سوءتفاهم در تفسیر نتایج جلوگیری شود. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که علی‌رغم نیاز به داده‌های با کیفیت و زیرساخت‌های فنی مناسب، مزایای حاصل از پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و کاهش ضایعات، توجیه‌کننده سرمایه‌گذاری در این فناوری‌ها است.

به‌طور کلی، با توجه به ادبیات موجود می‌توان گفت که مدل‌های یادگیری ماشین قادرند دقت پیش‌بینی هزینه را به سطحی ارتقا دهند که حتی با قضاوت و تجربه کارشناسان حوزه هزینه‌یابی نیز قابل رقابت باشد (هامان، ۲۰۲۴). این نتیجه با گزارش‌های پیشین مبنی بر عملکرد مطلوب شبکه‌های عصبی در مسائل مرتبط با هزینه‌یابی نیز هم‌خوانی دارد.

۸. نتیجه‌گیری

این مقاله نشان داد که تلفیق فناوری‌های پیشرفته، به‌ویژه هوش مصنوعی، با فرایندهای تولید می‌تواند منجر به بهبود کیفیت محصول، افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها شود. بررسی مطالعات مروری و موردی آشکار ساخت که به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان برآورد دقیق‌تر بهای تمام‌شده و کاهش خطاهای انسانی را فراهم می‌آورد.

^۱ Champa

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین هم‌سو است؛ به‌عنوان نمونه، مطالعه مهرمنش و همکاران، (۱۴۰۳) نیز به بهبود چشمگیر کیفیت و بهره‌وری ناشی از کاربرد الگوریتم ماشین بردار پشتیبان اشاره کرده‌اند. علاوه بر این، پژوهش‌های بین‌المللی نشان می‌دهند که استفاده از داده‌های کلان در صنایع ساخت، به‌طور قابل توجهی دقت پیش‌بینی‌های مالی و تولیدی را افزایش می‌دهد. چشم‌انداز آتی این تحقیق شامل توسعه مدل‌های چندعاملی و بهره‌گیری گسترده‌تر از اینترنت اشیا صنعتی برای گردآوری داده‌های دقیق‌تر و بلادرنگ است. از منظر عملی نیز توصیه می‌شود صنایع با فراهم‌سازی زیرساخت‌های فنی مناسب و آموزش نیروی انسانی متخصص، زمینه به‌کارگیری ایمن و اثربخش این فناوری‌ها را در فرایندهای تولید فراهم سازند.

۹. منابع

- زارع میرک آبادی، محمدرضا و ادیب نیا، فضل الله (۱۳۸۴). تخمین بهای تمام شده کالا با تکنیک‌های داده کاوی، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی صنایع، تهران، <https://civilica.com/doc/۱۷۵۷۳>.
- شاه‌علی، محمدمهدی (۱۴۰۳). بررسی و تحلیل هوش مصنوعی در بهینه‌سازی فرآیندها، کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی در صنایع. دومین کنگره بین‌المللی علوم، مهندسی و فناوری‌های نو، <https://civilica.com/doc/۲۰۴۹۷۶۱>.
- محمدی، زهره (۱۴۰۳). کاربرد یادگیری ماشین و داده کاوی در صنعت تولید، سومین سمینار تخصصی علم داده و کاربردهای آن، <https://civilica.com/doc/۲۱۵۲۵۵۳>.
- مهرمنش، حسن و معین‌زاده حسن بابایی، حسین (۱۴۰۳). هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در بهینه‌سازی فرآیندهای تولید: موردکاوی در صنعت نوشیدنی. اولین کنفرانس ملی حکمرانی هوشمند، <https://civilica.com/doc/۲۲۴۲۲۹۲>.

Arrieta, A. B., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., Garcia, S., Gil-Lopez, S., Molina, D., Benjamins, R., Chatila, R., & Herrera, F. (۲۰۲۰). Explainable artificial intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*, 58, ۸۲–۱۱۵. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.inffus.۲۰۱۹.۱۲.۰۱۲>

Champa, S. S. (۲۰۲۵). A unified AI and machine learning framework for decision support and operational optimization in smart manufacturing. *Operations Research eJournal*. https://papers.ssrn.com/sol۳/papers.cfm?abstract_id=۵۸۰۰۳۴۳

Hammann, D. (۲۰۲۴). Big data and machine learning in cost estimation: An automotive case study. *International Journal of Production Economics*, 269, Article ۱۰۹۱۳۷.

