



کاربرد هم‌افزای هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال در برنامه‌ریزی و کنترل تولید هوشمند: مرور ساختاریافته پژوهش‌ها، چارچوب مفهومی و دستورکار آینده

نام و نام خانوادگی نویسنده اول: علی کاشانی زاده

دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی دانشگاه تهران، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده: ali.kashanizadeh@ut.ac.ir

چکیده

تحول دیجیتال، برنامه‌ریزی و کنترل تولید را از فرایندی دوره‌ای و متکی بر داده‌های ایستا به سامانه‌ای پیوسته، پیش‌بین و سازگار تبدیل می‌کند. دوقلوی دیجیتال با ایجاد بازنمایی همگام از منابع، سفارش‌ها، جریان مواد و محدودیت‌های کف کارخانه، محیطی معتبر برای آزمون سناریو فراهم می‌آورد و هوش مصنوعی با پیش‌بینی رخدادها، تشخیص اختلال و تولید سیاست تصمیم، قابلیت انطباق را به این محیط می‌افزاید. هدف پژوهش حاضر تبیین وضعیت دانش درباره هم‌افزایی این دو فناوری در برنامه‌ریزی، زمان‌بندی، باززمان‌بندی و کنترل تولید و ارائه چارچوبی اجرایی برای گذار از پایش دیجیتال به تصمیم‌گیری حلقه‌بسته است. پژوهش به روش مرور روایتی ساختاریافته انجام شده و مطالعات محوری منتشرشده در فاصله سال‌های ۲۰۱۷ تا نیمه نخست ۲۰۲۶، همراه با شماری از پژوهش‌های فارسی در حوزه تولید هوشمند، تحلیل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد بیشترین کاربردهای هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال در پیش‌بینی تقاضا و زمان فرایند، انتخاب زمان باززمان‌بندی، تولید توالی عملیات، هماهنگی تولید با نگهداری و کنترل کیفیت و بهینه‌سازی چندهدفه مشاهده می‌شود. در مقابل، کیفیت و مالکیت داده، هم‌کنش‌پذیری با ERP و MES، وفاداری مدل، تأخیر محاسباتی، شکاف شبیه‌سازی تا واقعیت، امنیت سایبری، تبیین‌پذیری و توجیه اقتصادی، مهم‌ترین موانع صنعتی هستند. نوآوری مقاله، ارائه معماری پنج‌لایه، چرخه تصمیم‌هشت‌مرحله‌ای، مدل بلوغ پنج‌سطحی و نقشه راه استقرار مرحله‌ای با تأکید بر بنگاه‌های کوچک و متوسط و شرایط صنایع ایران است.

واژگان کلیدی: دوقلوی دیجیتال، هوش مصنوعی، برنامه‌ریزی و کنترل تولید، زمان‌بندی پویا، تولید هوشمند

مقدمه

برنامه‌ریزی و کنترل تولید حلقه اتصال میان تقاضای بازار، ظرفیت منابع، موجودی، تأمین مواد و اجرای عملیات است. در الگوهای متعارف، برنامه اصلی تولید، برنامه‌ریزی نیازمندی مواد، بارگذاری ظرفیت و زمان‌بندی کارگاه در بازه‌های از پیش تعیین‌شده انجام می‌شود. این منطق زمانی کارآمد است که داده‌ها نسبتاً پایدار، زمان‌های پردازش قابل اتکا و رخدادهای اختلالی محدود باشند؛ اما محیط واقعی تولید با خرابی ماشین، کمبود مواد، سفارش فوری، تغییر اولویت مشتری، غیبت نیروی انسانی، دوباره‌کاری، نوسان زمان عملیات و محدودیت انرژی مواجه است. در این وضعیت، فاصله میان برنامه مصوب و واقعیت کف کارخانه افزایش می‌یابد و بازمان‌بندی‌های شتاب‌زده نیز ممکن است ثبات برنامه و اعتماد کاربران را کاهش دهند.

(برداره و همکاران، ۱۴۰۳; Mäule & Götte, 2025; Usuga Cadavid et al., 2020)

ادبیات صنعت ۴۰ برای کاهش این شکاف بر اتصال تجهیزات، جمع‌آوری داده بلادرنگ، سامانه‌های اجرای تولید و تحلیل هوشمند تأکید دارد. با این حال، صرف دیجیتالی‌کردن داده‌ها به معنای تصمیم‌گیری هوشمند نیست؛ داده‌های پراکنده باید در یک مدل منسجم از وضعیت سیستم قرار گیرند، پیامد گزینه‌های تصمیم پیش از اجرا ارزیابی شود و سازوکاری روشن برای تبدیل مشاهده به اقدام وجود داشته باشد. دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی در همین نقطه به یکدیگر می‌رسند: دوقلوی دیجیتال زمینه، ساختار و محیط آزمون سناریو را فراهم می‌کند و هوش مصنوعی از داده و تعامل با مدل برای پیش‌بینی، تشخیص و بهینه‌سازی بهره می‌گیرد.

(اعیان، ۱۴۰۳؛ خالوندی و چاله‌چاله، ۱۴۰۳; Lu et al., 2020; Kritzing et al., 2018)

مرورهای نخستین دوقلوی دیجیتال عمدتاً بر تعریف، طبقه‌بندی و کاربردهای عمومی آن در تولید تمرکز داشتند. موج بعدی پژوهش‌ها، نقش این فناوری را در زمان‌بندی پویا، نگهداری، کنترل کیفیت و طراحی کارخانه بررسی کرد. هم‌زمان، مطالعات برنامه‌ریزی و کنترل تولید نشان دادند که یادگیری ماشین و یادگیری تقویتی می‌توانند برای پیش‌بینی، انتخاب قواعد اعزام، تصمیم بازمان‌بندی و حل مسائل پیچیده کارگاهی به کار روند. باوجوداین پیشرفت‌ها، برای مدیر صنعتی هنوز این پرسش مهم باقی است که جریان داده، مدل دوقلو، الگوریتم هوشمند، بهینه‌ساز و اختیار انسانی چگونه باید در یک چرخه تصمیم قابل اعتماد ترکیب شوند.

(Negri et al., 2017; Cimino et al., 2019; Panzer & Bender, 2022; Singh et al., 2026)

هدف مقاله حاضر پاسخ به این پرسش از طریق یک مرور روایتی ساختاریافته و ارائه چهار خروجی است: نخست، تبیین تقسیم کار دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی و کنترل تولید؛ دوم، دسته‌بندی منافع، محدودیت‌ها و شاخص‌های ارزیابی؛ سوم، تحلیل جایگاه مطالعات فارسی و الزامات بومی؛ و چهارم، ارائه معماری مفهومی، مدل بلوغ و نقشه راه اجرایی برای استقرار کم‌ریسک. تمرکز مقاله بر تصمیم‌های میان‌مدت و کوتاه‌مدت، زمان‌بندی و بازمان‌بندی، تخصیص منابع و کنترل اجرای تولید است. (تدوین نویسنده بر پایه آپرناک و همکاران، ۱۴۰۴; Macchi et al., 2023; Ouahabi et al., 2024)

مبانی نظری و مفاهیم کلیدی

برنامه‌ریزی و کنترل تولید در محیط پویا

برنامه‌ریزی و کنترل تولید مجموعه تصمیم‌هایی است که مشخص می‌کند چه محصولی، در چه مقدار، چه زمانی، با کدام منابع و تحت چه توالی‌ای تولید شود و سپس انحراف اجرای واقعی از برنامه را پایش و اصلاح می‌کند. در سطح تاکتیکی، برنامه تجمیعی، برنامه اصلی تولید و برنامه‌ریزی ظرفیت مطرح است و در سطح عملیاتی، توالی عملیات، تخصیص ماشین و نیروی انسانی، زمان

شروع و پایان کارها و واکنش به رخدادهای لحظه‌ای تعیین می‌شود. شاخص‌های رایج شامل زمان تکمیل کل، تأخیر کل یا وزنی، زمان جریان، موجودی در جریان، بهره‌برداری، تعداد تغییرات برنامه، مصرف انرژی، هزینه و قابلیت تحویل به‌موقع است.

(برداره و همکاران، ۱۴۰۳; Usuga Cadavid et al., 2020; Del Gallo et al., 2023)

زمان‌بندی ایستا پیش از آغاز افق برنامه تهیه می‌شود، درحالی‌که زمان‌بندی پویا با ورود اطلاعات جدید اصلاح می‌گردد. راهبرد باززمان‌بندی می‌تواند دوره‌ای، رویدادمحور یا ترکیبی باشد. باززمان‌بندی بسیار دیر هنگام موجب انباشت تأخیر می‌شود و باززمان‌بندی بیش از حد نیز آشفتگی، هزینه تغییر و کاهش ثبات برنامه را به دنبال دارد؛ بنابراین پرسش «چه زمانی باززمان‌بندی کنیم» به اندازه پرسش «چگونه برنامه جدید بسازیم» اهمیت دارد.

(آپرناک و همکاران، ۱۴۰۴; Li et al., 2020; Ouahabi et al., 2024)

دوقلوی دیجیتال؛ از مدل تا همگامی دوطرفه

دوقلوی دیجیتال را می‌توان بازنمایی دیجیتال هدفمند از یک موجودیت یا سامانه فیزیکی دانست که با داده‌های چرخه عمر و عملیات به‌روزرسانی می‌شود و برای پایش، شبیه‌سازی، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری به‌کار می‌رود. تمایز مهمی میان مدل دیجیتال، سایه دیجیتال و دوقلوی دیجیتال وجود دارد: در مدل دیجیتال، به‌روزرسانی عمدتاً دستی است؛ در سایه دیجیتال، داده از سامانه فیزیکی به مدل به‌صورت خودکار جاری می‌شود؛ و در دوقلوی دیجیتال، تبادل اطلاعات و فرمان به‌صورت دوطرفه برقرار است.

(خالوندی و چاله‌چاله، ۱۴۰۳; Kritzing et al., 2018; Jones et al., 2020)

در برنامه‌ریزی تولید، دوقلو نباید صرفاً یک مدل سه‌بعدی یا داشبورد تصویری باشد. اجزای ضروری آن شامل مدل ساختار منابع، وضعیت لحظه‌ای ماشین و سفارش، روابط تقدم، ظرفیت و تقویم، زمان‌های پردازش و راه‌اندازی، جریان مواد، منطق اختلال و شاخص‌های عملکرد است. خانواده استاندارد ISO ۲۳۲۴۷ نیز اصول و معماری مرجع دوقلوی دیجیتال در تولید را تعریف می‌کند و بخش پنجم آن، رشته دیجیتال را برای اتصال و نگهداری دوقلوها در چرخه عمر توسعه می‌دهد.

(Lu et al., 2020; ISO 23247-1, 2021; ISO 23247-2, 2021; ISO 23247-5, 2026)

نقش‌های هوش مصنوعی در تصمیم‌های تولید

هوش مصنوعی در این حوزه یک الگوریتم واحد نیست، بلکه خانواده‌ای از روش‌ها را دربرمی‌گیرد. یادگیری نظارت‌شده برای پیش‌بینی تقاضا، زمان پردازش، احتمال خرابی، تأخیر و کیفیت؛ یادگیری بدون نظارت برای کشف الگوی غیرعادی و خوشه‌بندی وضعیت‌ها؛ یادگیری تقویتی برای یادگیری سیاست توالی و تخصیص از طریق تعامل؛ و شبکه‌های عمیق و روش‌های فراابتکاری برای بازنمایی و حل مسائل پیچیده استفاده می‌شوند.

در یک سامانه ترکیبی، پیش‌بینی هوشمند جایگزین بهینه‌سازی نمی‌شود. مدل یادگیری می‌تواند پارامترها یا رخدادهای آینده را تخمین بزند، بهینه‌ساز برنامه‌ای سازگار با محدودیت‌ها تولید کند و دوقلوی دیجیتال پیامد آن را ارزیابی نماید. این ترکیب از تصمیم‌های صرفاً داده‌محور، که ممکن است قیود فیزیکی را نقض کنند، و مدل‌های صرفاً ریاضی، که ممکن است عدم قطعیت واقعی را نادیده بگیرند، قابل‌اتکاتر است.

(اله‌یار و همکاران، ۱۴۰۳; Büttner et al., 2022; Macchi et al., 2023; Singh et al., 2026)

در جدول ۱ مفاهیم اصلی مورد اشاره به همراه ویژگی متمایز، کاربرد اصلی و محدودیت کلیدی تشریح شده است.



مفهوم	ویژگی متمایز	کاربرد اصلی	محدودیت کلیدی
مدل دیجیتال	به روز رسانی دستی یا آفلاین	طراحی چیدمان، تحلیل ظرفیت و سناریوی اولیه	نبود همگامی خودکار
سایه دیجیتال	جریان خودکار داده از فیزیک به مدل	پایش و تشخیص انحراف	فاقد فرمان دوطرفه
دوقلوی دیجیتال	همگامی دوطرفه سامانه فیزیکی و مدل	آزمون برنامه، پیش بینی و کنترل	نیازمند حکمرانی و اعتبارسنجی
یادگیری ماشین	استخراج الگو از داده	پیش بینی زمان، کیفیت، خرابی و تأخیر	وابسته به کیفیت و تغییر توزیع داده
یادگیری تقویتی	یادگیری سیاست از پاداش و تعامل	اعزام، تخصیص و باززمان بندی پویا	ریسک انتقال از شبیه سازی به واقعیت
بهینه سازی	جستجوی پاسخ تحت قیود و اهداف	ساخت برنامه امکان پذیر و چندهدفه	هزینه محاسباتی در مقیاس بالا

جدول ۱: مفاهیم اصلی مورد اشاره در مقاله (منبع: تدوین نویسنده بر پایه Lu et al. (2020)، Kritzinger et al. (2018)، (Panzer and Bender (2022)).

روش تحقیق

پژوهش حاضر از نوع مرور روایتی ساختاریافته است؛ زیرا هدف آن برآورد اثر تجمعی یک مداخله واحد نیست، بلکه ترکیب مفاهیم، معماری‌ها، روش‌های تصمیم و شواهد کاربردی در یک حوزه میان رشته‌ای است. دامنه زمانی مرور از سال ۲۰۱۷، هم‌زمان با تثبیت ادبیات دوقلوی دیجیتال در سامانه‌های تولید، تا نیمه نخست سال ۲۰۲۶ در نظر گرفته شد. کلیدواژه‌های Digital Twin، Artificial Intelligence، Machine Learning، Reinforcement Learning، Production Planning and Control، Production Scheduling، Dynamic Scheduling، Rescheduling، Smart Manufacturing و معادل‌های فارسی آن‌ها به صورت ترکیبی بررسی شدند.

منابع بین‌المللی از کتابخانه‌ها و پایگاه‌های ScienceDirect، SpringerLink، IEEE Xplore، Taylor and Francis، MDPI و Google Scholar و منابع فارسی از پایگاه‌های SID و Civilica شناسایی شدند. معیار ورود شامل ارتباط مستقیم با تولید، وجود مؤلفه برنامه‌ریزی یا زمان‌بندی، ارائه معماری یا روش قابل انتقال به صنعت و انتشار در مجله، مجموعه مقالات معتبر یا استاندارد رسمی بود. مطالعاتی که صرفاً به حوزه‌هایی مانند ساختمان یا سلامت می‌پرداختند و پیوند روشنی با تصمیم تولید نداشتند، حذف شدند.

مطالعات منتخب بر اساس پنج مضمون کدگذاری شدند: نوع همگامی دوقلو، نقش هوش مصنوعی، تصمیم برنامه‌ریزی و کنترل تولید، سطح اعتبارسنجی و موانع استقرار. به دلیل ناهمگونی مسائل، داده‌ها، محیط‌های تولیدی و شاخص‌های عملکرد، مقایسه عددی مستقیم همه مطالعات امکان‌پذیر نیست و مقاله ادعای فراتحلیل ندارد. همچنین میان قابلیت اثبات‌شده در محیط صنعتی و پتانسیل نشان‌داده‌شده در شبیه‌سازی تمایز گذاشته شده است.

سنتز ادبیات: الگوهای کاربرد و تحول پژوهش

از پایش وضعیت تا تصمیم حلقه‌بسته

نخستین گروه مطالعات، نقش‌های دوقلوی دیجیتال را در سامانه‌های تولید دسته‌بندی و تفاوت آن را با شبیه‌سازی مستقل روشن کردند. این مطالعات نشان دادند که ارزش دوقلو به اتصال مداوم با موجودیت فیزیکی و استفاده تصمیمی از داده وابسته است. در مرحله بعد، معماری‌های دوقلو برای تولید هوشمند، سلول تولید و برنامه‌ریزی کارگاه توسعه یافتند و جریان داده حسگر و سامانه اجرای تولید برای همگام‌سازی مدل به کار گرفته شد.

(Negri et al., 2017; Kritzinger et al., 2018; Tao et al., 2018; Lu et al., 2020)

نسل جدیدتر پژوهش‌ها لایه هوش را به این چرخه افزوده است. مدل‌های یادگیری ماشین زمان پردازش یا نیاز به بازماندگی را پیش‌بینی می‌کنند، الگوریتم‌های یادگیری تقویتی با تکرار سناریو در دوقلو سیاست اعزام و تخصیص را می‌آموزند و بهینه‌سازهای چندهدفه میان زمان، انرژی، هزینه، پایداری برنامه و سلامت تجهیز موازنه برقرار می‌کنند. در نتیجه، دوقلو از ابزار مشاهده به محیط آموزش، اعتبارسنجی و اجرای تصمیم تبدیل می‌شود.

(Müller-Zhang et al., 2021; Panzer & Bender, 2022; Estes et al., 2023; Nguyen et al., 2026)

حوزه‌های اصلی تصمیم

پیش‌بینی و آماده‌سازی ورودی تصمیم: پیش‌بینی تقاضای کوتاه‌مدت، زمان عملیات، زمان راه‌اندازی، احتمال خرابی، زمان تأمین، کیفیت و غیبت منابع سبب می‌شود برنامه بر داده‌های واقع‌بینانه‌تری بنا شود. دوقلو دیجیتال امکان می‌دهد این پیش‌بینی‌ها در زمینه ساختار واقعی کارگاه و قیود ظرفیت تفسیر شوند.

(Usuga Cadavid et al., 2020; Büttner et al., 2022; ۱۴۰۳)

زمان‌بندی و اعزام: در کارگاه‌های چندمحصولی و انعطاف‌پذیر، عامل هوشمند می‌تواند انتخاب ماشین، توالی کار، تخصیص نیروی انسانی یا وسیله حمل خودکار و اولویت صف را انجام دهد. دوقلو محیطی امن برای تولید داده، آموزش عامل و آزمون سیاست در سناریوهای خرابی، تأخیر و ورود سفارش جدید فراهم می‌کند.

(Fang et al., 2019; Müller-Zhang et al., 2021; Panzer & Bender, 2022; Singh et al., 2026)

تصمیم باز زمان‌بندی: مدل‌های طبقه‌بندی یا تشخیص تغییر، تعیین می‌کنند که آیا انحراف فعلی آن‌قدر مهم است که هزینه تغییر برنامه را توجیه کند یا خیر. سپس بهینه‌ساز یا عامل یادگیری برنامه جدید را تولید می‌کند و دوقلو دیجیتال امکان‌پذیری و آثار جانبی آن را بررسی می‌نماید. (Li et al., 2020; Negri et al., 2021; Ouahabi et al., 2024)

هماهنگی نگهداری، کیفیت و تولید: پیش‌بینی سلامت تجهیز یا احتمال عدم انطباق می‌تواند به‌طور مستقیم در محدودیت‌های زمان‌بندی وارد شود. در این رویکرد، برنامه تولید تنها بر پیشینه‌سازی خروجی متمرکز نیست، بلکه ریسک توقف، کیفیت محصول، مصرف انرژی و هزینه نگهداری را نیز در نظر می‌گیرد. (آتشگر و حسینی، ۱۴۰۲; Lu et al., 2020; Nguyen et al., 2026)

برنامه‌ریزی کارخانه و ظرفیت: دوقلوهای سطح سلول و کارخانه برای سنجش چیدمان، تعداد منابع، تغییر شیفت، سیاست موجودی و ظرفیت توسعه استفاده می‌شوند. پیوند این مدل‌ها با داده واقعی، تصمیم سرمایه‌گذاری را از یک شبیه‌سازی یک‌باره به فرایند ارزیابی مستمر تبدیل می‌کند. (آپرناک و همکاران، ۱۴۰۴; Tao et al., 2018; Cimino et al., 2019)

در جدول ۲ خلاصه موارد فوق جمع‌آوری شده است.

پژوهشگر	سال	موضوع اصلی	کاربرد در برنامه ریزی و کنترل تولید
Negri و همکاران	۲۰۱۷	مرور نقش‌های دوقلو دیجیتال	طبقه‌بندی پایش، شبیه‌سازی، کنترل و بهینه‌سازی
Kritzinger و همکاران	۲۰۱۸	مرور طبقه‌بندی	تفکیک مدل، سایه و دوقلو بر اساس جهت جریان داده
Lu و همکاران	۲۰۲۰	معماری تولید هوشمند	تعریف خدمات مبتنی بر دوقلو و همگامی فیزیکی-سایبری
Usuga Cadavid و همکاران	۲۰۲۰	یادگیری ماشین در PPC	کاربرد در پیش‌بینی، زمان‌بندی و کنترل؛ چالش داده

Negri و همکاران	۲۰۲۱	زمان بندی با دوقلوی همگام	به روزرسانی مدل با داده میدان برای تصمیم در عدم قطعیت
Bender و Panzer	۲۰۲۲	مرور یادگیری تقویتی عمیق	پتانسیل بالا همراه با شکاف شبیه سازی و واقعیت
Macchi و همکاران	۲۰۲۳	چارچوب زمان بندی و کنترل	تمرکز بر حلقه مشاهده، ارزیابی، تصمیم و بازخورد
Ouahabi و همکاران	۲۰۲۴	مرور زمان بندی پویای مبتنی بر دوقلو	بهبود واکنش پذیری؛ چالش همگامی و مقیاس پذیری
Götte و Mäule	۲۰۲۵	چالش های PPC داده محور	شناسایی موانع داده، ورود، پیچیدگی و عملیات
Singh و همکاران	۲۰۲۶	مرور AI و دوقلوی دیجیتال	ترکیب هوش، شبیه سازی و زمان بندی تولید

جدول ۲: الگوهای کاربرد و تحول پژوهش (منبع: تدوین نویسنده بر اساس مطالعات ذکر شده در جدول)

جایگاه پژوهش های فارسی و الزامات بومی

مرور مطالعات فارسی نشان می دهد که ادبیات داخلی از مرحله معرفی مفاهیم صنعت ۴.۰ و هوش مصنوعی به سمت مسائل عملیاتی مانند برنامه ریزی تولید هوشمند، یادگیری ماشین، یکپارچه سازی ERP و بهینه سازی شبیه سازی حرکت کرده است. پژوهش های داخلی بر ضرورت تعامل پذیری، استفاده از داده بلادرنگ، یکپارچه سازی افقی و عمودی و نقش ابزارهای هوشمند در تصمیم های تولید تأکید دارند. با این حال، بخش بزرگی از این مطالعات هنوز مروری یا مفهومی است و شواهد موردی از استقرار پایدار در کارخانه های ایرانی محدود باقی مانده است. (اعیان، ۱۴۰۳؛ برداره و همکاران، ۱۴۰۳؛ آتشگر و حسینی، ۱۴۰۲؛ آپرناک و همکاران، ۱۴۰۴)

در مطالعات فارسی، توجه به محدودیت زیرساخت داده، وابستگی به سامانه های قدیمی، هزینه سرمایه گذاری، کمبود نیروی متخصص و ضرورت سازگاری فناوری با شرایط سازمانی ایران اهمیت ویژه ای دارد. ترکیب هوش مصنوعی با ERP و زنجیره تأمین، استفاده از الگوریتم های هوشمند در برنامه ریزی عملیاتی و توجه به انسان محوری صنعت ۵.۰ از محورهایی است که می تواند مبنای پژوهش های کاربردی تر در آینده قرار گیرد. (اله یار و همکاران، ۱۴۰۳؛ اسحاقی خیرودکنار، ۱۴۰۲؛ خالوندی و چاله چاله، ۱۴۰۳)

خلاصه این یافته ها در جدول ۳ مشاهده می شود.

پژوهشگر	سال	موضوع اصلی	کاربرد در برنامه ریزی و کنترل تولید
آتشگر و حسینی	۱۴۰۲	زیست بوم صنعت ۴.۰ و کیفیت چهارم	یکپارچگی فرایند، کنترل تولید و تحول دیجیتال
اسحاقی خیرودکنار	۱۴۰۲	هوش مصنوعی در مدیریت تولید نساجی	شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک و برنامه ریزی عملیاتی
اعیان	۱۴۰۳	تعامل پذیری برنامه ریزی تولید هوشمند	دوقلوی دیجیتال و برنامه ریزی تولید در محیط واقعی
برداره، حسنی و خیری	۱۴۰۳	یادگیری ماشین در برنامه ریزی تولید	پیوند برنامه ریزی، زمان بندی و کنترل تولید
اله یار، هداوند و نجفی	۱۴۰۳	هوش مصنوعی، زنجیره تأمین و ERP	یکپارچگی داده و بهره وری تولید
خالوندی و چاله چاله	۱۴۰۳	دوقلوی دیجیتال در صنعت ۴ و ۵	انسان محوری و پیوند فضای فیزیکی و دیجیتال
آپرناک و همکاران	۱۴۰۴	بهینه سازی شبیه سازی در برنامه ریزی تولید	نقشه راه ابزارهای پشتیبان تصمیم بلادرنگ

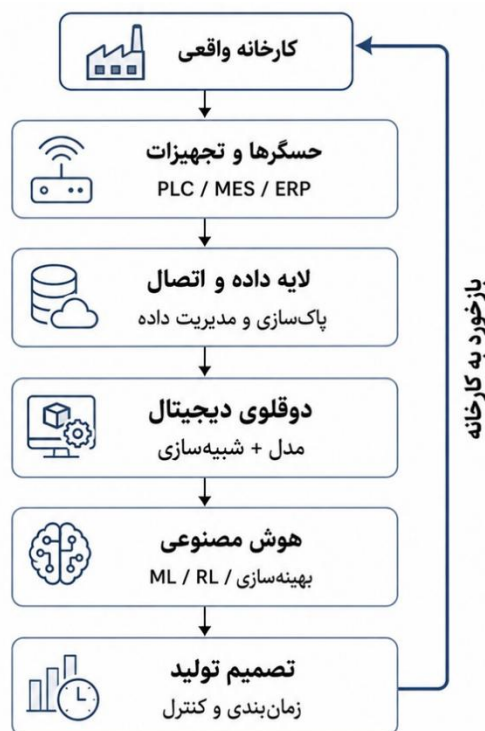
جدول ۳: کاربردها در پژوهش های فارسی (منبع: تدوین نویسنده بر اساس پایگاه های SID و Civilica)

چارچوب مفهومی حاصل از سنتز مطالعات

چارچوب ارائه شده در این بخش، یک معماری فنی آزمون شده یا اعتبارسنجی شده نیست، بلکه حاصل تلفیق و دسته بندی مؤلفه های پرتکرار در مطالعات پیشین است. هدف از ارائه آن، نمایش ارتباط میان منابع داده، دوقلوی دیجیتال، روش های هوش مصنوعی، سازوکار تصمیم گیری و بازخورد عملیاتی در برنامه ریزی و کنترل تولید است. این چارچوب می تواند مبنایی برای مطالعات

تجربی و پیاده‌سازی‌های صنعتی آینده باشد. (منبع: تدوین نویسنده بر اساس لو و همکاران، ۲۰۲۰؛ نگری و همکاران، ۲۰۲۱؛ مک‌کی و همکاران، ۲۰۲۳؛ اوهابی و همکاران، ۲۰۲۴)

بر پایه سنتز منابع، معماری پیشنهادی این مقاله مطابق شکل ۱ از پنج لایه تشکیل می‌شود. معماری علاوه بر جریان فناوری، محل کنترل انسانی و حکمرانی را نیز مشخص می‌کند؛ زیرا بسته‌شدن حلقه تصمیم بدون تعریف اختیار، مسئولیت و قواعد توقف ایمن می‌تواند ریسک عملیاتی ایجاد کند. در این معماری، داده از کف کارخانه به لایه اتصال و دوقلوی دیجیتال منتقل می‌شود، هوش مصنوعی و بهینه‌سازی گزینه‌های تصمیم را تولید می‌کنند و نتیجه تحت نظارت انسانی به محیط واقعی بازمی‌گردد. (تدوین نویسنده بر پایه (Lu et al., 2020; Macchi et al., 2023; ISO 23247-2, 2021; Nguyen et al., 2026)



شکل ۱: معماری پیشنهادی یکپارچه هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال در برنامه ریزی و کنترل تولید (منبع: تدوین نویسنده)

لایه فیزیکی و اجرایی شامل ماشین‌آلات، اپراتورها، مواد، انبار، ابزار، سامانه حمل و سفارش‌های در حال اجرا است. رویدادها باید همراه با شناسه، زمان و زمینه عملیاتی ثبت شوند تا وضعیت واقعی هر سفارش و منبع قابل ردیابی باشد.

(اعیان، ۱۴۰۳; Lu et al., 2020; ISO 23247-1, 2021;

لایه داده و اتصال شامل حسگرها، PLC، SCADA، سامانه اجرای تولید، ERP، سامانه مدیریت انبار و سامانه نگهداری است. وظایف این لایه، جمع‌آوری، پاک‌سازی، هم‌زمان‌سازی، ایجاد مدل معنایی و کنترل کیفیت داده است. یکپارچه‌سازی این منابع معمولاً دشوارتر از توسعه الگوریتم هوشمند است. (اله‌یار و همکاران، ۱۴۰۳; ISO 23247-2, 2021; Mäule & Götte, 2025;

لایه دوقلوی دیجیتال مدل منابع، فرایند، محدودیت‌ها، زمان، منطق خرابی و جریان مواد را دربرمی‌گیرد و می‌تواند شامل شبیه‌سازی رویدادگسسته، مدل‌های فیزیکی، مدل‌های داده‌محور یا مدل‌های ترکیبی و سازوکار کالیبراسیون باشد. سطح جزئیات این مدل باید متناسب با تصمیم موردنظر انتخاب شود.

(Kritzinger et al., 2018; Negri et al., 2021; Ouahabi et al., 2024)

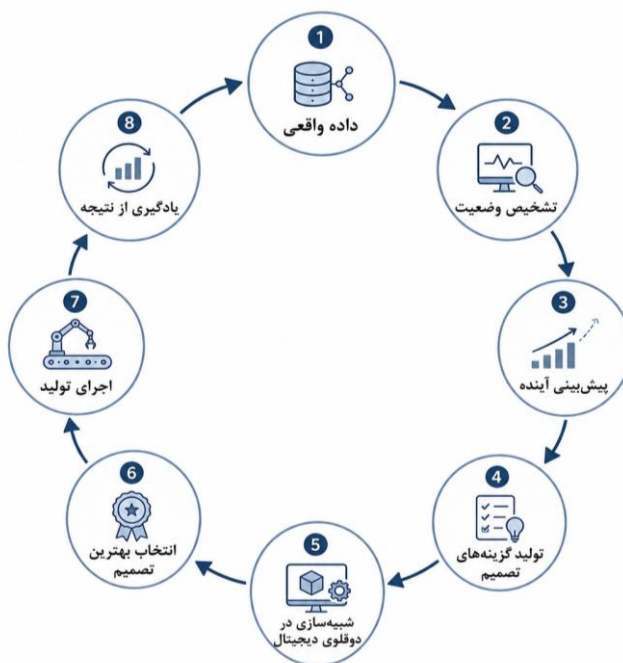
لایه هوش و بهینه‌سازی وظایف پیش‌بینی، تشخیص ناهنجاری، تصمیم باززمان‌بندی، تولید گزینه، بهینه‌سازی چندهدفه، یادگیری تقویتی و تحلیل عدم قطعیت را انجام می‌دهد. خروجی این لایه باید علاوه بر مقدار تابع هدف، میزان ریسک، عدم قطعیت و احتمال نقض محدودیت‌ها را نیز ارائه کند. (Panzer & Bender, 2022; Estes et al., 2023; Singh et al., 2026)

لایه تصمیم و حکمرانی شامل داشبورد و توضیح تصمیم، تأیید انسانی متناسب با سطح ریسک، ارسال برنامه به سامانه اجرای تولید، پایش نتیجه، ثبت بازخورد، امنیت، ممیزی و مدیریت نسخه مدل است. وجود این لایه از تبدیل سامانه هوشمند به یک جعبه سیاه غیرقابل اعتماد جلوگیری می‌کند. (خالوندی و چاله‌چاله، ۱۴۰۳; Macchi et al., 2023; Nguyen et al., 2026)

چرخه تصمیم‌گیری هوشمند تولید

چرخه عملیاتی مطابق شکل ۲ با دریافت داده واقعی آغاز می‌شود. داده‌های جدید از نظر کیفیت، تأخیر و سازگاری بررسی و سپس وضعیت دوقلو به‌روزرسانی می‌شود. موتور تحلیل، انحراف برنامه و احتمال افت شاخص‌ها را محاسبه می‌کند. اگر آستانه رخداد یا ریسک عبور شود، چند گزینه تصمیم تولید می‌گردد؛ هر گزینه در دوقلو تحت سناریوهای ممکن اجرا و بر اساس زمان، هزینه، انرژی، پایداری برنامه و ریسک رتبه‌بندی می‌شود. نتیجه واقعی نیز به مخزن تجربه بازمی‌گردد.

(Negri et al., 2021; Li et al., 2020; Macchi et al., 2023)

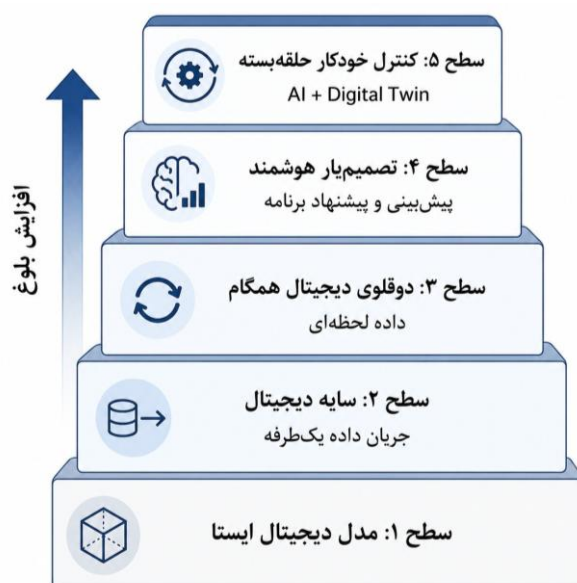


شکل ۲: چرخه تصمیم‌گیری هوشمند تولید (منبع: تدوین نویسنده بر اساس (negri et al, 2021; macchi et al, 2023)

برای تصمیم‌های پرریسک، معماری باید بر اصل «انسان در حلقه» استوار باشد. خودکارسازی کامل تنها زمانی مناسب است که فضای اقدام محدود، مدل معتبر، پیامد خطا قابل کنترل و سازوکار بازگشت ایمن وجود داشته باشد. برای تغییرات بزرگ برنامه، سفارش‌های راهبردی، توقف خط یا تخصیص منابع ایمنی‌محور، تأیید انسانی ضروری است. (خالوندی و چاله‌چاله، ۱۴۰۳; Nguyen et al., 2026; Macchi et al., 2023)

مدل بلوغ استقرار

مدل بلوغ پیشنهادی مطابق شکل ۳ شامل پنج سطح است: سطح یک، مدل دیجیتال ایستا؛ سطح دو، سایه دیجیتال با جریان خودکار یک‌طرفه داده؛ سطح سه، دوقلوی همگام با ارتباط دوطرفه؛ سطح چهار، تصمیم‌یار هوشمند مجهز به پیش‌بینی و پیشنهاد برنامه؛ و سطح پنج، کنترل حلقه‌بسته با هوش مصنوعی و نظارت انسانی. با حرکت از سطح یک به پنج، میزان همگامی، هوشمندی، خودکارسازی و ریسک سازمانی افزایش می‌یابد. (تدوین نویسنده بر پایه Nguyen et al., 2020; Jones et al., 2018; Kritzinger et al., 2026)



شکل ۳: مدل بلوغ یا پیاده سازی دوقلوی دیجیتال (منبع: تدوین نویسنده بر اساس Jones et al., 2020; Kritzinger et al., 2018)

گذار مستقیم از مدل ایستا به خودکارسازی حلقه‌بسته توصیه نمی‌شود. هر سطح باید معیار خروج مشخصی داشته باشد: در سایه دیجیتال، پوشش و صحت داده؛ در دوقلوی همگام، خطای مدل و تأخیر همگامی؛ در تصمیم‌یار، دقت پیش‌بینی و کیفیت پیشنهاد؛ و در کنترل حلقه‌بسته، ایمنی، پایداری و قابلیت بازگشت. این رویکرد از تبدیل پروژه به نمایش فناوری بدون ارزش عملیاتی جلوگیری می‌کند. (آپرناک و همکاران، ۱۴۰۴; Mäule & Götte, 2025; Cimino et al., 2019)

منافع، شاخص‌های ارزیابی و شواهد

منافع گزارش شده را می‌توان در چهار دسته عملیاتی، اقتصادی، تاب‌آوری و یادگیری سازمانی قرار داد. در بعد عملیاتی، زمان تکمیل، تأخیر، زمان انتظار و موجودی در جریان کاهش و بهره‌برداری و قابلیت تحویل افزایش می‌یابد. در بعد اقتصادی، کاهش توقف، ضایعات، اضافه‌کاری و هزینه آزمون فیزیکی مطرح است. در بعد تاب‌آوری، سامانه می‌تواند اختلال را زودتر تشخیص دهد و پیامد گزینه‌های واکنش را بسنجد. «الهی‌ار و همکاران (Negri et al., 2021; Ouahabi et al., 2024; Singh et al., 2026; ۱۴۰۳)

ارزیابی نباید تنها بر بهترین مقدار تابع هدف در شبیه‌سازی تکیه کند. معیارهای صنعتی باید کیفیت تصمیم، زمان تصمیم، ثبات برنامه، درصد پیشنهادهای پذیرفته‌شده توسط برنامه‌ریز، نرخ نقض قیود، خطای دوقلو، زمان بازیابی پس از اختلال و هزینه کل مالکیت را شامل شود. همچنین خط مبنا باید روشن باشد؛ برای مثال مقایسه با برنامه دستی، قاعده اعزام متداول، بازماندگی دوره‌ای یا بهینه‌ساز موجود. (آپرناک و همکاران، ۱۴۰۴؛ Mäule & Götte, 2025; Panzer & Bender, 2022)

بعد	نمونه شاخص	ملاحظه ارزیابی
کارایی جریان	زمان تکمیل، زمان جریان، موجودی در جریان و توان عملیاتی	بهینه‌سازی صرف زمان ممکن است انرژی یا ثبات را تضعیف کند.
تحویل و خدمت	تأخیر کل یا وزنی، درصد تحویل به‌موقع و سطح خدمت	نیازمند وزن‌دهی شفاف به مشتریان و سفارش‌ها
بهره‌برداری منابع	OEE، زمان بیکاری، بار ماشین و نیروی انسانی	بهره‌برداری بیشینه الزاماً به معنای جریان بهتر نیست
تاب‌آوری	زمان تشخیص، زمان بازیابی و افت KPI پس از اختلال	سناریوهای آزمون باید نماینده رخداد‌های واقعی باشند
پایداری	انرژی، ضایعات، دوباره‌کاری و جابه‌جایی	داده‌های محیط‌زیستی معمولاً ناقص یا با تأخیر هستند.
کیفیت تصمیم	زمان محاسبه، نقض قیود، ثبات برنامه و پذیرش کاربر	شاخص‌های انسانی و سازمانی نباید حذف شوند.
اقتصاد پروژه	صرفه‌جویی خالص، دوره بازگشت و هزینه مالکیت	هزینه نگهداری مدل و اتصال باید ثبت شود.

جدول ۴: بررسی منافع پیاده‌سازی (منبع: تدوین نویسنده بر اساس ادبیات موضوع)

مقایسه مفهومی روش‌های برنامه‌ریزی تولید مطابق شکل ۴ نشان می‌دهد که سامانه‌های سنتی از نظر داده‌بلادرنگ، پیش‌بینی و تصمیم خودکار در سطح پایینی قرار دارند؛ ERP و MES دید عملیاتی را افزایش می‌دهند اما به‌تنهایی تصمیم‌گیری پیش‌بین و تجویزی ایجاد نمی‌کنند؛ دوقلوی دیجیتال محیط همگام و قابلیت آزمون سناریو را فراهم می‌کند؛ و ترکیب هوش مصنوعی با دوقلو، بالاترین ظرفیت را برای پیش‌بینی و تصمیم‌گیری سازگار دارد.

تصمیم خودکار	پیش‌بینی	داده لحظه‌ای	روش
ندارد	ندارد	کم	برنامه‌ریزی سنتی
ندارد	محدود	متوسط	سیستم ERP/MES
محدود	متوسط	زیاد	دوقلوی دیجیتال
زیاد	زیاد	بسیار زیاد	هوش مصنوعی + دوقلوی دیجیتال

شکل ۴: مقایسه مفهومی سطح هوشمندی روش‌های برنامه‌ریزی تولید (منبع: تدوین نویسنده بر اساس مرور ادبیات)



چالش‌ها و مخاطرات استقرار

- کیفیت، زمینه و مالکیت داده

داده حسگر بدون شناسه سفارش، وضعیت ماشین یا زمان مرجع برای تصمیم برنامه‌ریزی و کنترل تولید کافی نیست. داده گمشده، واحدهای ناسازگار، تغییر تعریف کدها و ثبت دستی می‌تواند دوقلو را از واقعیت جدا کند. مالک داده، مسئول اصلاح و قواعد نگهداری باید به‌طور شفاف مشخص باشند. (برداره و همکاران، ۱۴۰۳; Mäule & Götte, 2025; Usuga Cadavid et al., 2020)

- هم‌کنش‌پذیری و سامانه‌های قدیمی

یکپارچه‌سازی ERP, MES, SCADA, سامانه نگهداری و فایل‌های محلی معمولاً دشوارتر از ساخت الگوریتم است. استفاده از مدل معنایی، رابط برنامه‌نویسی، شناسه یکتا و استانداردهای تبادل اطلاعات، شرط مقیاس‌پذیری سامانه است. (اعیان، ۱۴۰۳؛ الهیار و همکاران، ۱۴۰۳; ISO 23247-2, 2021; ISO 23247-5, 2026)

- وفاداری و کالیبراسیون مدل

مدل بسیار ساده می‌تواند تصمیم را تحریف کند و مدل بیش از حد دقیق نیز محاسبه را کند و نگهداری را گران سازد. سطح جزئیات باید متناسب با تصمیم موردنظر باشد و خطای مدل به‌صورت مستمر سنجیده و پارامترهای آن کالیبره شوند. (Cimino et al., 2019; Negri et al., 2021; Ouahabi et al., 2024)

- تأخیر محاسباتی و مقیاس

باززمان‌بندی بلادرنگ فرصت محدودی دارد. الگوریتمی که پس از تغییر وضعیت پاسخ می‌دهد، حتی در صورت ارائه مقدار بهتر تابع هدف، ارزش عملی کافی ندارد. معماری لبه، مدل جانشین، پردازش موازی و بهینه‌سازی افق لغزان می‌تواند زمان تصمیم را کاهش دهد. (Li et al., 2020; Panzer & Bender, 2022; Singh et al., 2026)

- شکاف شبیه‌سازی تا واقعیت

عامل یادگیری ممکن است از نقص‌های شبیه‌ساز بهره‌برداری کند و در شرایط دیده‌نشده شکست بخورد. تصادفی‌سازی دامنه، آزمون تنش، محدودیت‌های ایمنی، اعتبارسنجی با داده واقعی و استقرار مرحله‌ای برای کاهش این شکاف ضروری است. (Müller-Zhang et al., 2021; Panzer & Bender, 2022; Nguyen et al., 2026)

- تبیین‌پذیری و اعتماد

برنامه‌ریز باید بداند چرا یک سفارش جابه‌جا شده، ماشین جایگزین انتخاب شده یا برنامه به‌طور کامل بازسازی شده است. توضیح مبتنی بر محدودیت فعال، رخداد محرک و اثر تصمیم بر شاخص‌های عملکرد، برای کاربر صنعتی از نمایش ساختار پیچیده مدل اهمیت بیشتری دارد. (خالوندی و چالهمچاله، ۱۴۰۳; Büttner et al., 2022; Macchi et al., 2023)

- امنیت سایبری و ایمنی



دوقلوی متصل سطح حمله جدیدی ایجاد می کند. دستکاری داده یا فرمان می تواند به تصمیم نادرست، تولید محصول معیوب یا توقف فیزیکی منجر شود. تفکیک شبکه، احراز هویت، کنترل دسترسی، ثبت ممیزی، بررسی صحت داده و تعریف حالت امن برای سامانه ضروری است. (Barricelli et al., 2019; ISO 23247-2, 2021; Nguyen et al., 2026)

- اقتصاد و تغییر سازمانی

پروژه ای که مسئله کسب و کار روشن، مالک فرایند و برنامه آموزش کاربران نداشته باشد، ممکن است به داشبوردی کم استفاده تبدیل شود. هزینه پاک سازی داده، نگهداری اتصال، بازآموزی مدل، اعتبارسنجی، امنیت و تغییر فرایند باید در توجیه اقتصادی پروژه دیده شود. (الهیار و همکاران، ۱۴۰۳; Cimino et al., 2019; Mäule & Götte, 2025)

چارچوب اجرایی و نقشه راه پیشنهادی

نقشه راه پیشنهادی بر اصل «ارزش محدود اما قابل اندازه گیری» استوار است. به جای ساخت دوقلوی کل کارخانه، باید یک مسئله تصمیم با هزینه اختلال بالا و داده قابل دسترس انتخاب شود. این رویکرد ریسک سرمایه گذاری را کاهش می دهد و امکان یادگیری تدریجی سازمان را فراهم می سازد.

• مرحله ۱ - تعریف مسئله و خط مبنا: تعیین دامنه، تصمیم هدف، رخدادهای مهم، شاخص ها، هزینه خطا، مسئول فرایند و روش فعلی تصمیم گیری. (اعیان، ۱۴۰۳; Usuga Cadavid et al., 2020)

• مرحله ۲ - ارزیابی آمادگی داده: شناسایی منابع داده، کیفیت، تأخیر، پوشش شناسه ها، مالکیت و نیازهای امنیتی. در این مرحله ممکن است بهترین اقدام اصلاح ثبت داده باشد نه خرید نرم افزار. (برداره و همکاران، ۱۴۰۳; Mäule & Götte, 2025)

• مرحله ۳ - ساخت سایه دیجیتال حداقلی: نمایش وضعیت واقعی سفارش، منابع و انحراف از برنامه بدون خودکارسازی تصمیم، با هدف ایجاد حقیقت مشترک و اعتماد به داده. (Kritzinger et al., 2018; ISO 23247-1, 2021)

• مرحله ۴ - ساخت و اعتبارسنجی مدل دوقلو: مدل سازی فقط جزئیاتی که بر تصمیم هدف اثر دارند، مقایسه خروجی مدل با تاریخچه و اجرای واقعی و تعریف دامنه اعتبار. (Negri et al., 2021; Ouahabi et al., 2024)

• مرحله ۵ - افزودن تحلیل و تصمیم یار: آغاز با پیش بینی یا رتبه بندی گزینه ها و نمایش توضیح تصمیم، نه اجرای خودکار؛ مقایسه عملکرد سامانه در حالت سایه با تصمیم برنامه ریز. (Büttner et al., 2022; Macchi et al., 2023)

• مرحله ۶ - آزمایش کنترل شده حلقه بسته: خودکارسازی تصمیم های کم ریسک در یک شیفت یا سلول محدود، با محدوده اقدام، امکان لغو تصمیم و ثبت کامل نتیجه. (خالوندی و چاله چاله، ۱۴۰۳; Nguyen et al., 2026)

• مرحله ۷ - مقیاس سازی و حکمرانی: استانداردسازی مدل داده و رابط ها، مدیریت نسخه، پایش افت مدل، برنامه بازآموزی، آموزش کاربران، امنیت و سنجش دوره ای ارزش اقتصادی. (ISO 23247-5, 2026; Mäule & Götte, 2025)

ملاحظات بنگاه های کوچک و متوسط و صنایع ایران

در بنگاه های کوچک و متوسط، کمبود زیرساخت، پراکندگی داده و محدودیت سرمایه سبب می شود معماری ماژولار و تدریجی مناسب تر باشد. استفاده از داده موجود ERP، بارکد، شمارنده ماشین و ثبت رخداد استاندارد می تواند برای نخستین نمونه کافی

باشد. دوقلوی اولیه نیز لزوماً نباید سه بعدی باشد؛ یک مدل رویدادگسسته همگام که وضعیت سفارش و ظرفیت را درست بازنمایی کند، ارزش تصمیمی بیشتری خواهد داشت. (اعیان، ۱۴۰۳؛ الهیار و همکاران، ۱۴۰۳؛ Cimino et al., 2019)

برای صنایع ایران، نوسان تأمین، محدودیت انرژی، تنوع کیفیت مواد، محدودیت قطعات یدکی و وابستگی به دانش خبرگان باید در سناریوهای دوقلو لحاظ شود. اهداف بهتر است چندگانه باشند و تحویل، مصرف انرژی در ساعات محدودیت، پایداری برنامه، موجودی و ریسک توقف را همزمان در نظر گیرند. ثبت قواعد خبرگان در کنار داده تاریخی می تواند در شروع پروژه کمبود داده را جبران کند و توسعه الگوریتمی که توسط تیم داخلی قابل نگهداری باشد، بخشی از تاب آوری فناوری است. (تحلیل نویسنده بر پایه آتشگر و حسینی، ۱۴۰۲؛ آپرناک و همکاران، ۱۴۰۴؛ Mäule & Götte, 2025)

در امتداد الزامات بومی و شکاف های شناسایی شده در ادبیات، هشت محور اولویت دار برای پژوهش های آینده استخراج شد که موضوعاتی از دوقلوی دیجیتال کم هزینه و بازماندگی تحت محدودیت انرژی تا کالیبراسیون خودکار، امنیت تصمیم و توسعه بنچمارک های صنعتی را دربرمی گیرد. پرسش های پژوهشی مرتبط و روش یا خروجی مطلوب هر محور در جدول ۵ ارائه شده است.

محور	پرسش پژوهشی	روش یا خروجی مطلوب
دوقلوی کم هزینه و مازولار	چه حداقل داده و مدل برای ایجاد ارزش در PPC کافی است؟	نمونه صنعتی در بنگاه کوچک و تحلیل هزینه چرخه عمر
بازماندگی تحت محدودیت انرژی	چگونه سهمیه یا قیمت انرژی با تحویل و ثبات برنامه متوازن شود؟	مدل چندهدفه و مطالعه موردی صنایع انرژی بر
انسان در حلقه و اعتماد	کدام توضیحات موجب پذیرش و اصلاح بهتر برنامه می شود؟	آزمایش با برنامه ریزان و سنج پذیرش و خطا
انتقال سیاست	چگونه سیاست آموخته شده بین خطوط و محصولات منتقل شود؟	یادگیری انتقالی و آزمون خارج از توزیع
کالیبراسیون خودکار دوقلو	چگونه افت مدل به موقع تشخیص و اصلاح شود؟	پایش خطا، تخمین پارامتر و دوقلوی خودترمیم
امنیت تصمیم حلقه بسته	چگونه اثر داده جعلی یا حمله بر برنامه محدود شود؟	آزمون نفوذ سایبرفیزیکی و کنترل مقاوم
رشته دیجیتال بین سازمانی	چگونه داده طراحی، برنامه، ساخت و تأمین با حفظ محرمانگی متصل شود؟	معماری مبتنی بر ISO 23247 و یادگیری فدرال
بنچمارک صنعتی باز	چگونه روش ها منصفانه و تکرارپذیر مقایسه شوند؟	مجموعه داده رخدادمحور، سناریو و KPI استاندارد

جدول ۵: دستورکار پیشنهادی پژوهش های آینده در حوزه هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال (منبع: تدوین نویسنده بر پایه Panzer & Bender, ۲۰۲۲; Ouahabi et al., ۲۰۲۴; Singh et al., ۲۰۲۶; آپرناک و همکاران، ۱۴۰۴)

جمع بندی و نتیجه گیری

مرور ساختاریافته پژوهش های سال های ۲۰۱۷ تا نیمه نخست ۲۰۲۶ نشان می دهد که هم افزایی هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال را نباید صرفاً به کنار هم قرار دادن دو فناوری تقلیل داد. دوقلوی دیجیتال با ایجاد بازنمایی همگام از منابع، سفارش ها، جریان مواد و محدودیت های محیط تولید، «حافظه و زمینه» سامانه را فراهم می کند و هوش مصنوعی با پیش بینی، تشخیص، استنتاج و تولید سیاست تصمیم، «قابلیت سازگاری» را به آن می افزاید. اگر دوقلوی دیجیتال به روز و معتبر نباشد، مدل هوشمند بر مبنای تصویری نادرست از محیط تصمیم می گیرد و اگر سازوکار تحلیل و تصمیم گیری وجود نداشته باشد، دوقلو به یک داشبورد



پیشرفته برای پایش وضعیت محدود می‌شود. بنابراین واحد تحلیل مناسب در این حوزه، چرخه کامل داده، مدل، تصمیم، اجرا و بازخورد است.

(Lu et al., ۲۰۲۰; Macchi et al., ۲۰۲۳; Nguyen et al., ۲۰۲۶)

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد بیشترین ظرفیت ترکیب هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال در پیش‌بینی تقاضا و زمان فرایند، زمان‌بندی و باززمان‌بندی پویا، تخصیص منابع، هماهنگی تولید با نگهداری و کنترل کیفیت، ارزیابی سناریوهای ظرفیت و بهینه‌سازی چندهدفه مشاهده می‌شود. دوقلوی دیجیتال با همگام‌سازی وضعیت واقعی و فراهم کردن محیطی برای آزمون گزینه‌های تصمیم، شکاف میان برنامه و اجرای تولید را کاهش می‌دهد و هوش مصنوعی با پیش‌بینی رخدادهای، تشخیص انحراف و پیشنهاد سیاست‌های واکنشی، سرعت و سازگاری تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد.

(Negri et al., ۲۰۲۱; Macchi et al., ۲۰۲۳; Singh et al., ۲۰۲۶; ۱۴۰۳، اعیان)

یکی دیگر از نتایج مهم پژوهش، ضرورت تفکیک تصمیم‌های پیش‌بینی، تجویزی و کنترلی است. پیش‌بینی دقیق لزوماً به تولید برنامه‌ای بهتر منجر نمی‌شود؛ زیرا برنامه‌نهایی باید محدودیت‌های فیزیکی، ظرفیت منابع و اهداف متعارضی مانند تحویل، هزینه، انرژی، کیفیت و ثبات برنامه را رعایت کند. از سوی دیگر، بهینه‌سازی بدون دسترسی به پیش‌بینی معتبر یا مدل به‌روز وضعیت، در برابر عدم قطعیت و اختلال‌های واقعی شکننده است. در یک معماری ترکیبی، خروجی احتمالی مدل‌های یادگیری باید به سناریوها، پارامترها و محدودیت‌های تصمیم تبدیل شود و میزان عدم قطعیت نیز در ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌ها انعکاس یابد.

(Usuga Cadavid et al., ۲۰۲۰; Li et al., ۲۰۲۰; Singh et al., ۲۰۲۶)

با وجود ظرفیت‌های گسترده، استقرار موفق این فناوری‌ها صرفاً تابع انتخاب الگوریتم‌های پیشرفته نیست. کیفیت، زمینه و مالکیت داده، هم‌کنش‌پذیری با سامانه‌هایی مانند ERP، MES و SCADA، وفاداری و سرعت محاسباتی مدل، تعمیم‌پذیری نتایج، امنیت سایبری، تبیین‌پذیری تصمیم، میزان اختیار انسانی و توجیه اقتصادی، از عوامل تعیین‌کننده موفقیت هستند. معماری پنج‌لایه و مدل بلوغ پیشنهادی این مقاله نشان می‌دهد که سازمان باید ابتدا مشاهده‌ای معتبر از وضعیت واقعی ایجاد کند، سپس به پیش‌بینی و تصمیم‌یار هوشمند برسد و در نهایت، تصمیم‌های محدود و کم‌ریسک را به‌صورت کنترل‌شده خودکار سازد. گذار مستقیم از یک مدل ایستا به کنترل حلقه‌بسته، بدون اعتبارسنجی، حکمرانی و سازوکار بازگشت ایمن، می‌تواند ریسک عملیاتی قابل توجهی ایجاد کند.

(Mäule & Götte, ۲۰۲۵; Nguyen et al., ۲۰۲۶; ۱۴۰۴، همکاران، آپرنک)

نتایج همچنین وجود فاصله‌ای معنادار میان بلوغ علمی و استقرار صنعتی را نشان می‌دهد. اگرچه رشد مطالعات یادگیری تقویتی، زمان‌بندی پویا و دوقلوهای مبتنی بر هوش مصنوعی شواهد امیدوارکننده‌ای فراهم کرده است، بخش قابل توجهی از ارزیابی‌ها همچنان در محیط‌های شبیه‌سازی شده یا نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شده‌اند. از این‌رو، موفقیت پژوهش‌های آینده نباید تنها بر اساس بهبود مقدار تابع هدف سنجیده شود، بلکه هزینه اتصال و یکپارچه‌سازی، زمان تصمیم، ثبات عملکرد، نرخ پذیرش پیشنهادها توسط برنامه‌ریزان، میزان مداخله انسانی، قابلیت نگهداری و هزینه کل مالکیت نیز باید ارزیابی شوند.

(Panzer & Bender, ۲۰۲۲; Ouahabi et al., ۲۰۲۴; Mäule & Götte, ۲۰۲۵)



مطالعات فارسی نیز نشان می‌دهند که تبدیل مفاهیم صنعت ۴.۰ و تولید هوشمند به ارزش عملی در صنایع ایران، به تعامل‌پذیری سامانه‌ها، آمادگی داده، آموزش نیروی انسانی و اجرای نمونه‌های کوچک و قابل سنجش وابسته است. در شرایط صنایع ایران، عواملی مانند نوسان تأمین، محدودیت انرژی، تغییر کیفیت مواد اولیه، محدودیت قطعات یدکی و وابستگی به دانش خبرگان باید به‌طور صریح در مدل دوقلو و سناریوهای تصمیم‌گیری لحاظ شوند. پژوهش‌های آینده لازم است از مطالعات صرفاً مفهومی فراتر رفته و با مشارکت واحدهای صنعتی، عملکرد سامانه‌ها را با داده‌های واقعی، هزینه چرخه عمر و پیامدهای انسانی و سازمانی ارزیابی کنند.

(اعیان، ۱۴۰۳؛ برداره و همکاران، ۱۴۰۳؛ آپرناک و همکاران، ۱۴۰۴)

بر این اساس، توصیه اصلی برای استقرار صنعتی، انتخاب یک مسئله تصمیم مشخص و دارای ارزش اقتصادی، تعریف خط مبنای قابل اندازه‌گیری، ارزیابی آمادگی داده، ساخت یک سایه دیجیتال حداقلی، اعتبارسنجی مدل دوقلو، آزمون گزینه‌های تصمیم در محیط شبیه‌سازی شده و استقرار مرحله‌ای با حضور انسان در حلقه است. این رویکرد احتمال تبدیل پروژه از یک نمایش فناوری به قابلیت پایدار برای برنامه‌ریزی و کنترل تولید را افزایش می‌دهد و به‌ویژه برای بنگاه‌های کوچک و متوسط و صنایع ایران، می‌تواند زمینه تصمیم‌گیری تاب‌آورتر در مواجهه با اختلال‌های تأمین، محدودیت انرژی و تغییرات محیطی را فراهم سازد.

در نهایت، دوقلوی دیجیتال یک محصول ثابت یا پروژه‌ای یک‌باره نیست، بلکه قابلیت سازمانی و پویاست که باید هم‌زمان با تغییر محصول، ماشین‌آلات، تقویم تولید، مهارت کارکنان و سیاست‌های کسب‌وکار به‌روزرسانی شود. از این‌رو، حکمرانی مدل، مسئولیت داده، مدیریت نسخه، پایش افت عملکرد، امنیت و بودجه نگهداری باید از آغاز پروژه تعریف شوند. تنها در چنین شرایطی است که ترکیب هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال می‌تواند از سطح پایش دیجیتال فراتر رود و به تصمیم‌گیری پیش‌بین، تجویزی و حلقه‌بسته‌ای تبدیل شود که علاوه بر بهبود عملکرد عملیاتی، اعتماد کاربران و پایداری سازمانی را نیز حفظ می‌کند.

(۲۰۲۵; Mäule & Götte, ۲۰۲۶, ۲۳۲۴۷-۵; ISO ۲۰۲۰ Jones et al.,)



منابع

- آتشگر، کریم و حسینی، سیدمهران. (۱۴۰۲). نقش طراحی آزمایش‌ها در زیست‌بوم انقلاب صنعتی چهارم. نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت، ۱۳(۴).
- آپرناک، آرش؛ بلوری، دیبا؛ حیدرزاده، حنا و پورالحسینی، سیدامیرحسام. (۱۴۰۴). بهینه‌سازی شبیه‌سازی در برنامه‌ریزی تولید در عصر صنعت ۴/۰: مروری بر مطالعات انجام‌شده و نقشه راه آینده. اولین کنفرانس بین‌المللی پیشرفت‌های هوش مصنوعی در مهندسی و علوم انسانی
- اعیان، احسان. (۱۴۰۳). بررسی قابلیت تعامل‌پذیری برنامه‌ریزی تولید هوشمند در صنایع تولیدی مبتنی بر انقلاب صنعتی چهارم. سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع، بهره‌وری و کیفیت
- اسحاقی خیرودکنار، مرتضی. (۱۴۰۲). کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت تولید واحدهای نساجی. ششمین کنفرانس بین‌المللی تحولات نوین در مدیریت، اقتصاد و حسابداری
- اله‌یار، فاطمه؛ هداوند، مجتبی و نجفی، ندا. (۱۴۰۳). افزایش بهره‌وری تولید: مروری بر بهینه‌سازی مدیریت زنجیره تأمین مبتنی بر هوش مصنوعی و یکپارچه‌سازی سیستم‌های ERP. دومین کنفرانس بین‌المللی مطالعات نوین در مدیریت، اقتصاد و حسابداری
- برداره، میثم؛ حسینی، محمدحسین و خیری، امید. (۱۴۰۳). بهبود برنامه‌ریزی تولید با یادگیری ماشینی. دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی مطالعات نوین مدیریت و حسابداری در ایران.
- خالوندی، فاطمه و چاله‌چاله، عبدالله. (۱۴۰۳). دوقلوی دیجیتال و کاربرد آن در نسل چهارم و پنجم صنعت. اولین کنفرانس بین‌المللی فناوری اطلاعات، مدیریت و کامپیوتر
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. IEEE Access, 7, 167653–167671
- Büttner, K., Antons, O., & Arlinghaus, J. C. (2022). Applied machine learning for production planning and control: Overview and potentials. IFAC-PapersOnLine, 55(10), 2629–2634
- Cimino, C., Negri, E., & Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. Computers in Industry, 113, 103130
- Del Gallo, M., Mazzuto, G., Ciarapica, F. E., & Bevilacqua, M. (2023). Artificial intelligence to solve production scheduling problems in real industrial settings: Systematic literature review. Electronics, 12(23), 4732
- Esteso, A., Peidro, D., Mula, J., & Díaz-Madroñero, M. (2023). Reinforcement learning applied to production planning and control. International Journal of Production Research, 61, 5772–5789
- Fang, Y., Peng, C., Lou, P., Zhou, Z., Hu, J., & Yan, J. (2019). Digital-twin-based job shop scheduling toward smart manufacturing. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15, 6425–6435
- ISO. (2021). ISO 23247-1: Automation systems and integration—Digital twin framework for manufacturing—Part 1: Overview and general principles.
- ISO. (2021). ISO 23247-2: Automation systems and integration—Digital twin framework for manufacturing—Part 2: Reference architecture.
- ISO. (2026). ISO 23247-5: Automation systems and integration—Digital twin framework for manufacturing—Part 5: Digital thread for digital twin.



- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022
- Li, Y., Carabelli, S., Fadda, E., Manerba, D., Tadei, R., & Terzo, O. (2020). Machine learning and optimization for production rescheduling in Industry 4.0. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110, 2445–2463
- Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I.-K., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837
- Macchi, M., Ragazzini, L., & Negri, E. (2023). A conceptual framework for digital twin in production scheduling and control. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 5661–5666
- Mäule, J., & Götte, G. (2025). Production planning and control in Industry 4.0: Overview on challenges of data-driven PPC systems. *IFAC-PapersOnLine*, 59(10), 1253–1258
- Müller-Zhang, Z., Oliveira Antonino, P., & Kuhn, T. (2021). Integrated planning and scheduling for customized production using digital twins and reinforcement learning. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 408–413
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948
- Negri, E., Pandhare, V., Cattaneo, L., Singh, J., Macchi, M., & Lee, J. (2021). Field-synchronized digital twin framework for production scheduling with uncertainty. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32, 1207–1228
- Nguyen, P., Kim, M., Nichols, E., & Yoon, H.-S. (2026). AI-driven digital twins for manufacturing: A review across hierarchical manufacturing system levels. *Sensors*, 26(1), 124
- Ouahabi, N., Chebak, A., Kamach, O., Laayati, O., & Zegrari, M. (2024). Leveraging digital twin into dynamic production scheduling: A review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89, 102778
- Panzer, M., & Bender, B. (2022). Deep reinforcement learning in production systems: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 60(13), 4316–4341
- Singh, P., Krishnan, K., & Boldsai Khan, E. (2026). A review of production scheduling with artificial intelligence and digital twins. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 10(1), 6
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3563–3576
- Usuga Cadavid, J. P., Lamouri, S., Grabot, B., Pellerin, R., & Fortin, A. (2020). Machine learning applied in production planning and control: A state-of-the-art in the era of Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 1531–1558