

بررسی روند تحول پژوهش های تولید هوشمند و پیشنهاد چارچوبی مفهومی برای یکپارچگی آن

دکتر مژده ربانی

گروه مدیریت صنعتی، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران.

Moz.rabbani@iau.ac.ir

عالیه طالعی بافقی

گروه مدیریت صنعتی، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران.

Aliyeh.taleibafghi@iau.ac.ir

صدرا صادقیان

گروه مدیریت صنعتی، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران.

Sadra.sadeghian @iau.ac.ir

چکیده

تولید هوشمند طی بیش از یک دهه از زوایای فناورانه، سازمانی و انسان محور مورد مطالعه قرار گرفته است، اما دانش انباشته شده در این حوزه هنوز میان جریان های پژوهشی نسبتاً مستقلی پراکنده مانده است. در این مقاله، سی و دو اثر پژوهشی منتشر شده در بازه سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۶ به طور مستقیم مطالعه و با یکدیگر مقایسه شده اند تا تصویری یکپارچه از تحول این حوزه به دست آید. به جای بازگویی جداگانه یافته های هر اثر، تلاش شده نشان داده شود که مفهوم غالب تولید هوشمند در طول زمان چگونه از ایجاد زیرساخت و اتصال، به سمت تثبیت چارچوب ها، سپس هوشمندی داده محور و مبتنی بر دوقلوی دیجیتال، و در نهایت به سوی تولید قابل اعتماد، انسان محور و تاب آور حرکت کرده است. در ادامه، تغییر متناظر در نگاه پژوهشگران، از رویکردی فناوری محور به رویکردهای داده محور، هوش محور و در نهایت اجتماعی فنی، بررسی می شود و روندهای تکرار شونده، تنش های پابرجا و چند سطح از شکاف های پژوهشی شناسایی می شوند؛ مهم ترین این شکاف ها، جدا ماندن جریان های پژوهشی فناوری، داده و هوش مصنوعی، عوامل انسانی و سازمانی، امنیت و پایداری از یکدیگر است. بر پایه این تحلیل، چارچوبی مفهومی و یکپارچه پیشنهاد می شود که در آن امنیت سایبری، اعتماد و حاکمیت به عنوان لایه ای فراگیر، زیرساخت فناورانه، داده و هوش، و عوامل انسانی-سازمانی را به پیامدهای تولید متصل می کند. بر این اساس، سهم اصلی این مقاله نه فهرست کردن دوباره فناوری های تولید هوشمند، بلکه ارائه روایتی مستند از چگونگی تحول این حوزه، جایگاه کنونی آن و نقاطی است که بیش از همه به یکپارچه سازی نیاز دارند.

واژگان کلیدی: تولید هوشمند، انقلاب صنعتی چهارم، دوقلوی دیجیتال، هوش مصنوعی، انسان در حلقه

۱. مقدمه

اصطلاح تولید هوشمند در طول کمتر از دو دهه مسیری نسبتاً پرفراز و نشیب را طی کرده است. آنچه در سال ۲۰۱۰ عمدتاً طرحی برای متصل کردن تجهیزات کارخانه به یکدیگر بود، امروز به حوزه‌ای گسترده و میان‌رشته‌ای بدل شده که سیستم‌های سایبرفیزیکی، تحلیل کلان‌داده، دوقلوی دیجیتال، هوش مصنوعی، همکاری انسان و ربات، امنیت سایبری و پایداری را در بر می‌گیرد. زوهلکه با استناد به تصور یوبیکوئیتوس کامپیوتینگ واسر در سال ۱۹۹۱، از گذار کارخانه‌ها به سمت آنچه خود «کارخانه‌ی اشیا» نامید سخن گفت و تأکید کرد که آینده تولید نه فقط از نظر سازمانی، بلکه از نظر برنامه‌ریزی و فناوری نیز باید سبک‌تر و منعطف‌تر شود (Zühlke, ۲۰۱۰). تنها دو سال بعد، دیویس و همکارانش تولید هوشمند را کاربرد فشرده و فراگیر فناوری‌های اطلاعاتی شبکه‌ای در سرتاسر بنگاه تولید و زنجیره تأمین تعریف کردند و چهار محور فنی، یعنی زمان، همگام‌سازی، شاخص‌های عملکرد یکپارچه و الزامات سایبر-فیزیکی-نیروی کار را هسته این مفهوم دانستند (Davis et al., ۲۰۱۲). از آن پس، این مفهوم بارها بازتعریف شده است: از سیستم‌های سایبرفیزیکی و کارخانه‌ی اشیا (Zühlke, ۲۰۱۰)، تا انقلاب صنعتی چهارم (Hermann, Pentek and Otto, ۲۰۱۶)، تولید هوشمند به معنای دقیق‌تر کلمه (Kusiak, ۲۰۱۸)، تولید هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال (Qi and Tao, ۲۰۱۸)، و در سال‌های اخیر، هوش مصنوعی قابل‌اعتماد و انسان‌محور (Li et al., ۲۰۲۵; Kim et al., ۲۰۲۵).

نکته جالب توجه این است که هر یک از این جریان‌های پژوهشی در ارائه جزئیات فنی خود موفق بوده‌اند، اما در بیشتر موارد به صورت موازی و نسبتاً مستقل از یکدیگر رشد کرده‌اند. برای نمونه، پژوهش‌هایی که به طور خاص دوقلوی دیجیتال را بررسی می‌کنند (Qi and Tao, ۲۰۱۸; He and Bai, ۲۰۲۱; Lattanzi et al., ۲۰۲۱; Soori, Arezoo and Dastres, ۲۰۲۳)، به ندرت به طور جدی به مسائل امنیت سایبری می‌پردازند که موضوع اصلی پژوهش کاستیو-ویار و همکاران است (Kim et al., ۲۰۲۶; Castillo-Villar et al., ۲۰۲۶)؛ و مطالعاتی که بر نقش انسان در سیستم‌های خودمختار تمرکز دارند (Kim et al., ۲۰۲۵)، عمدتاً به شکافی توجه می‌کنند که در ادبیات فناوری‌محور اولیه کمتر دیده شده بود. نتیجه این وضعیت، ادبیاتی است که از نظر عمق فنی غنی، اما از منظر یکپارچگی میان این جریان‌ها نسبتاً کم‌مایه است.

این مقاله می‌کوشد این خلأ را با مطالعه مستقیم و مقایسه‌ای سی‌ودو اثر پژوهشی، که مجموعاً دوره‌های اصلی پژوهش در حوزه تولید هوشمند از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۶ را پوشش می‌دهند، تا حدی پر کند. برخلاف مرورهای مرسوم که هر اثر را جداگانه خلاصه می‌کنند، در این نوشتار تلاش شده الگوهای فراتر از سطح تک‌مقاله استخراج شود: دوره‌بندی تاریخی حوزه، تحول نقش فناوری‌های تشکیل‌دهنده آن، تغییر زاویه نگاه پژوهشگران، روندهای غالب و تنش‌های حل‌نشده در ادبیات، و در نهایت شکاف‌های پژوهشی برآمده از این تحلیل. بر مبنای این یافته‌ها، در بخش پایانی مقاله یک چارچوب مفهومی یکپارچه پیشنهاد شده است؛ چارچوبی که آشکارا به عنوان سنتزی از ادبیات موجود معرفی می‌شود، نه مدلی که پیش‌تر آزموده و اعتبارسنجی شده باشد.

ساختار باقی مقاله به این ترتیب است: بخش دوم، رویکرد مطالعه و مجموعه سی‌ودو اثر مبنا را معرفی می‌کند. بخش سوم سیر تاریخی پژوهش‌های تولید هوشمند را در چهار دوره دنبال می‌کند. بخش چهارم به تحول نقش فناوری‌های توانمندساز می‌پردازد. بخش پنجم تغییر نگاه پژوهشی را شرح می‌دهد. بخش ششم روندهای مشترک میان مطالعات را سنتز می‌کند. بخش هفتم به تناقض‌ها و تنش‌های موجود در ادبیات می‌پردازد. بخش هشتم شکاف‌های پژوهشی را در چند سطح دسته‌بندی و شکاف اصلی مقاله را صورت‌بندی می‌کند. بخش نهم چارچوب مفهومی یکپارچه پیشنهادی را معرفی می‌کند و بخش‌های دهم و یازدهم به ترتیب به بحث درباره سهم این مقاله و جمع‌بندی و پیشنهادهای پژوهشی آینده اختصاص دارند.

۲. روش پژوهش

این مقاله یک مرور تحلیلی از مطالعات منتخب است، نه یک مرور نظام مند کامل مبتنی بر پروتکل پریزما. بنابراین در این نوشتار هیچ ادعایی مبنی بر پیروی از چنین پروتکلی مطرح نشده و هیچ فرایند رسمی جست و جو، غربالگری یا حذف مقاله در پایگاه های علمی گزارش نشده است، چرا که چنین فرایندی به طور رسمی انجام نگرفته است. در عوض، مبنای این مرور، مجموعه ای از پیش تعیین شده و ثابت متشکل از سی و دو اثر پژوهشی است که در بازه سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۶ منتشر شده اند و در شش دسته موضوعی جای می گیرند: نخست، مبانی مفهومی تولید هوشمند و سیستم های سایبرفیزیکی؛ دوم، چارچوب ها و تعاریف انقلاب صنعتی چهارم؛ سوم، الزامات کارخانه هوشمند و الگوهای پذیرش فناوری؛ چهارم، پژوهش های دوقلوی دیجیتال؛ پنجم، بلوغ، آمادگی و ابعاد چندگانه هوشمندی در انقلاب صنعتی چهارم؛ و ششم، مطالعات اخیرتر با محوریت هوش مصنوعی، انسان و امنیت که عمدتاً در بازه ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۶ منتشر شده اند. انتخاب این سی و دو اثر با هدف پوشش نسبتاً متوازن دوره های زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۶ و تنوع رویکردهای فناوری محور، داده محور، هوش محور و اجتماعی فنی صورت گرفته است. هر یک از این سی و دو اثر به طور کامل مطالعه و از سه زاویه تکمیلی با یکدیگر مقایسه شد: نخست، مشخصات پژوهشی هر اثر، یعنی هدف، نوع مطالعه، روش یا داده مورد استفاده و مهم ترین یافته آن؛ دوم، محتوای موضوعی هر اثر درباره تولید هوشمند، یعنی تعریف یا مفهومی که از این پدیده به کار برده، فناوری های مورد بحث، کاربردها، مزایا و چالش های ذکر شده، جایگاه عوامل انسانی و سازمانی در استدلال آن، و شکاف پژوهشی یا مسیر آینده ای که پیشنهاد می دهد؛ و سوم، جایگاه هر اثر در سیر کلی تر ادبیات، یعنی این که آن اثر بازتاب دهنده کدام روند غالب است، در تقابل با کدام یافته های دیگر قرار می گیرد، و به کدام شکاف پژوهشی بزرگ تر اشاره دارد. بخش های روایی این مقاله، یعنی بخش های سوم تا نهم، حاصل همین خوانش تطبیقی و بازگشت مکرر به متن اصلی مقالات کلیدی است، نه خلاصه نویسی جداگانه از هر اثر.

در جاهایی که یک ادعا را می توان به طور مستقیم به یک یا چند اثر مشخص نسبت داد، ارجاع به نام نویسنده و سال انتشار آورده شده است. در مواردی که شواهد موجود برای اثبات یک ادعا به عنوان یافته مستقیم یک اثر کافی نبود، آن ادعا صراحتاً به عنوان استنباطی حاصل از مقایسه چند اثر با هم معرفی شده، نه به عنوان یافته یک منبع خاص. حفظ این تمایز در سرتاسر مقاله، برای پرهیز از بزرگ نمایی آنچه هر اثر به تنهایی نشان داده، ضروری بوده است. در چند مورد که ارجاع به منبعی تکمیلی و بیرون از فهرست اصلی برای روشن شدن یک نکته لازم به نظر رسید، آن منبع نیز در فهرست مراجع مشخص شده است.

۳. سیر تحول پژوهش های تولید هوشمند

اگر سی و دو اثر مبنای این مقاله را بر پایه سال انتشار مرتب کنیم، الگویی نسبتاً روشن از چهار دوره پدیدار می شود؛ هر دوره با محور غالب خاص خود، مجموعه ای مشخص از فناوری ها یا مفاهیم، و تغییری در معنای «پیشرفت» در تولید هوشمند همراه بوده است.

دوره	محور غالب	فناوری ها و مفاهیم شاخص	تغییر اصلی
اول (۲۰۱۰-۲۰۱۶)	ایجاد زیرساخت	اینترنت اشیا، سیستم های سایبرفیزیکی، کارخانه هوشمند	اتصال دنیای فیزیکی و دیجیتال
دوم (۲۰۱۷-۲۰۲۰)	چارچوب سازی و یکپارچه سازی	انقلاب صنعتی چهارم، ابر، کلان داده، پذیرش فناوری	حرکت از فناوری منفرد به اکوسیستم تولید
سوم (۲۰۲۱-۲۰۲۳)	داده و دوقلوی دیجیتال	دوقلوی دیجیتال، تحلیل داده، هوش مصنوعی، پایداری	حرکت از پایش به پیش بینی و بهینه سازی
چهارم (۲۰۲۴-۲۰۲۶)	هوشمندی انسان محور و تاب آور	هوش مصنوعی مولد، مدل های زبانی و چندوجهی، انسان در حلقه، امنیت سایبری، تاب آوری	حرکت از تولید هوشمند صرفاً فناوری محور به تولیدی قابل اعتماد، انسان محور، امن و تاب آور

مطالعات دوره نخست، تولید هوشمند را عمده‌تاً همچون مسئله‌ای در حوزه اتصال و زیرساخت می‌بینند. زولهکه با معرفی «کارخانه‌ی اشیاء»، شبکه‌ای از اجزای خودتوصیف‌گر و سرویس‌گرا را تصویر می‌کند و حتی نمونه آزمایشگاهی خود موسوم به SmartFactoryKL را بر پایه معماری سرویس‌گرا و با استفاده از استانداردهایی نظیر B2MML و BPEL پیاده‌سازی کرده است (Zühlke, ۲۰۱۰). تقریباً هم‌زمان، ونگ، تورنگرن و اونوری وضعیت سیستم‌های سایبرفیزیکی در تولید را مرور می‌کنند و مونوستوری و همکاران این سیستم‌ها را زیرساخت اصلی نسل بعدی تولید معرفی می‌کنند (Wang, Törngren and Onori, ۲۰۱۵; Monostori et al., ۲۰۱۶). کوسیاک نیز در جمع‌بندی خود از این دوره، تولید هوشمند را ترکیبی از شش رکن، یعنی فناوری و فرایندهای تولید، مواد، داده، مهندسی پیش‌بین، پایداری، و اشتراک و شبکه‌سازی منابع، توصیف می‌کند؛ توصیفی که بیشتر بر یکپارچگی فنی تأکید دارد تا بر ابعاد انسانی (Kusiak, ۲۰۱۸). کانگ و همکارانش نیز با تحلیل نقشه راه‌های فناوری آلمان، آمریکا و کره جنوبی، از تولید هوشمند به‌عنوان «چهارمین انقلاب صنعت تولید» یاد می‌کنند (Kang et al., ۲۰۱۶).

دوره دوم، که تقریباً از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ را در بر می‌گیرد، بیشتر صرف تلاش برای تثبیت این زیرساخت پراکنده در قالب چارچوب‌های منسجم شده است. هرمان، پنتک و اوتو اصولی طراحی برای سناریوهای انقلاب صنعتی چهارم پیشنهاد می‌کنند (Hermann, Pentek and Otto, ۲۰۱۶)، در حالی که لیاو و همکاران و لو، ادبیات این حوزه را در مقیاسی بسیار بزرگ‌تر مرور و مسائل باز پژوهشی را استخراج می‌کنند (Liao et al., ۲۰۱۷; Lu, ۲۰۱۷). در همین بازه، ژونگ و همکاران و کولوت و همکاران تلاش می‌کنند مرزهای مفهومی میان انقلاب صنعتی چهارم، تولید هوشمند و تولید هوشمند به‌معنای دقیق‌تر آن را روشن‌تر کنند؛ کولوت و همکاران برای این منظور نزدیک به صد تعریف دانشگاهی و غیردانشگاهی را تحلیل می‌کنند و نشان می‌دهند نبود توافق بر سر یک تعریف مشترک، مقایسه پژوهش‌ها را دشوار کرده است (Zhong et al., ۲۰۱۷; Culot et al., ۲۰۲۰). مطالعات تجربی این دوره نیز، به‌جای پرداختن صرف به این‌که فناوری‌های تولید هوشمند چه هستند، به این پرسش می‌پردازند که شرکت‌ها این فناوری‌ها را چگونه و با چه الگوهایی به‌کار می‌گیرند؛ فرانک، دالنوگاره و آیالا با تحلیل خوشه‌ای داده‌های نود و دو شرکت تولیدی نشان می‌دهند پذیرش فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم به‌صورت سیستمی و غیریکپارچه رخ می‌دهد و کلان‌داده و تحلیل داده همچنان از دشوارترین حوزه‌ها برای پیاده‌سازی به‌شمار می‌آیند (Frank, Dalenogare and Ayala, ۲۰۱۹). در حالی که استریدر، بوده و فریدلی با مرور نظام‌مند بیش از صد مقاله درباره کارخانه هوشمند نشان می‌دهند این ادبیات عمده‌تاً پراکنده و فنی است و مطالعات ارزیابی اثر واقعی این فناوری‌ها بر عملکرد همچنان محدودند (Osterrieder, Budde and Friedli, ۲۰۲۰).

دوره سوم، یعنی بازه ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳، با اوج‌گیری پژوهش‌های دوقلوی دیجیتال و چرخشی آشکار به‌سمت تصمیم‌گیری داده‌محور مشخص می‌شود. چی و تائو کلان‌داده و دوقلوی دیجیتال را دو توانمندساز مکمل برای تولید هوشمند معرفی می‌کنند (Qi and Tao, ۲۰۱۸)، هی و بای دوقلوی دیجیتال را به تولید هوشمند پایدار پیوند می‌زنند (He and Bai, ۲۰۲۱)، و لاتانزی و همکاران و سوری، آرزو و داسترس بر پیاده‌سازی عملی این فناوری در محیط‌های صنعتی واقعی تمرکز می‌کنند (Lattanzi et al., ۲۰۲۱; Soori, Arezoo and Dastres, ۲۰۲۳). در همین دوره، میتال و همکاران و میندل و همکاران به بلوغ و آمادگی سازمان‌ها برای تولید هوشمند و انقلاب صنعتی چهارم می‌پردازند (Mittal et al., ۲۰۱۸; Meindl et al., ۲۰۲۱). مطالعه میندل و همکاران به‌ویژه شایان توجه است، چرا که با مرور نظام‌مند مبتنی بر یادگیری ماشین بر روی نزدیک به پنج‌هزار مقاله، چهار «هوشمندی» تولید، کار، زنجیره تأمین و محصول-خدمت را از هم تفکیک می‌کند و نشان می‌دهد پژوهش‌های مربوط به تولید هوشمند به‌طور نامتناسبی بیشتر از سایر ابعاد رشد کرده‌اند؛ نکته‌ای که بعدها در بخش شکاف‌های این مقاله نیز بازتاب می‌یابد (Meindl et al., ۲۰۲۱).

سرانجام، دوره چهارم، یعنی سال های ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۶، با چرخشی محسوس به سمت هوش مصنوعی، سیستم های تولیدی انسان محور، و توجه صریح به اعتماد، امنیت و پایداری شناخته می شود. لی و همکاران با معرفی چارچوبی سه لایه، هوش مصنوعی قابل اعتماد را در بستر تولید هوشمند انسان محور بررسی می کنند و آن را رابطه ای هم افزا میان توانایی انسان و دقت محاسباتی هوش مصنوعی توصیف می کنند (Li et al., ۲۰۲۵). کیم و همکاران مفهوم انسان در حلقه را در تمامی مراحل تولید پی می گیرند (Kim et al., ۲۰۲۵)، فن و همکاران به همکاری انسان و ربات مبتنی بر مدل های زبان-تصویر می پردازند (Fan et al., ۲۰۲۵)، و باندانا و وکرینک، کاستیو-ویار و همکاران، باجستانی، مون و کیم، و اومیگبودون به ترتیب تولید مبتنی بر هوش مصنوعی، امنیت سایبری و تاب آوری، مدل های زبانی بزرگ همراه با نظارت انسانی، و دوقلوهای دیجیتال هوشمند برای تولید پایدار را بررسی می کنند (Bandhana and Vokřínek, ۲۰۲۵; Castillo-Villar et al., ۲۰۲۶; Bajestani, Mun and Kim, ۲۰۲۶; Omigbodun, ۲۰۲۶). مجموعه این مطالعات نشان می دهد مرز پیشرفت در این حوزه دیگر «هوشمندی» به معنای سنتی آن نیست، بلکه میزان قابلیت اعتماد، سازگاری با انسان، امنیت و تاب آوری سیستم های تولیدی است که روز به روز خودمختارتر می شوند.

اگر این چهار دوره را در کنار هم قرار دهیم، می توان مسیری مفهومی را ترسیم کرد که البته باید آن را برآیندی از مقایسه این ۳۲ اثر با یکدیگر دانست، نه طبقه بندی رسمی ای که پژوهشی خاص پیشنهاد کرده باشد: تولید متصل، تولید سایبرفیزیکی، تولید هوشمند، تولید داده محور، تولید مبتنی بر هوش مصنوعی، تولید انسان محور و قابل اعتماد، و در نهایت تولید هوشمند تاب آور و پایدار.

۴. تحول نقش فناوری های توانمندساز

در کنار این دوره بندی زمانی، بعد دوم و کمتر آشکار تحول نیز نمایان می شود: آنچه تغییر کرده، تنها افزایش تعداد فناوری های مرتبط با تولید هوشمند نیست، بلکه نقش کارکردی این فناوری ها نیز عوض شده است. در مطالعات نخستین، اینترنت اشیا و سیستم های سایبرفیزیکی عمدتاً همچون سازوکار اتصال دیده می شوند (Zühlke, ۲۰۱۰; Wang, Törngren and Onori, ۲۰۱۵)؛ در مطالعات میانی، ابر و کلان داده بیشتر نقش سازوکار یکپارچه سازی و ذخیره سازی ایفا می کنند (Lu, ۲۰۱۷; Zhong et al., ۲۰۱۷)؛ در مطالعات جدیدتر، هوش مصنوعی و دوقلو دیجیتال به سازوکارهایی برای هوشمندی، یعنی پیش بینی و بهینه سازی، بدل می شوند (Qi and Tao, ۲۰۱۸; He and Bai, ۲۰۲۱; Lattanzi et al., ۲۰۲۱)؛ و در جدیدترین مطالعات، هوش مصنوعی مولد، مدل های زبانی بزرگ و مدل های زبان-تصویر عمدتاً به عنوان سازوکار تعامل و خودمختاری، در خدمت همکاری انسان و ماشین قرار می گیرند (Li et al., ۲۰۲۶; al., ۲۰۲۵; Kim et al., ۲۰۲۵; Fan et al., ۲۰۲۵; Bajestani, Mun and Kim, ۲۰۲۶).

نسل	فناوری های شاخص	کارکرد اصلی	نمونه پژوهش ها
اول، اتصال	اینترنت اشیا، حسگرها، سیستم سایبرفیزیکی	گردآوری داده و اتصال ماشین ها و سامانه ها	Zühlke, ۲۰۱۰; Wang, Törngren and Onori, ۲۰۱۵
دوم، یکپارچه سازی	ابر، کلان داده، شبکه های ارتباطی	ذخیره، انتقال و یکپارچه سازی داده	Lu, ۲۰۱۷; Zhong et al., ۲۰۱۷; Frank, Dalenogare and Ayala, ۲۰۱۹
سوم، هوشمندسازی	تحلیل داده، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، دوقلو دیجیتال	پیش بینی، تشخیص، بهینه سازی و پشتیبانی تصمیم	Qi and Tao, ۲۰۱۸; He and Bai, ۲۰۲۱; Soori, Arezoo and Dastres, ۲۰۲۳
چهارم، تعامل و خودمختاری	هوش مصنوعی مولد، مدل های زبانی و چندوجهی، انسان در حلقه	تعامل، استدلال، انتقال دانش و همکاری انسان-ماشین	Li et al., ۲۰۲۵; Kim et al., ۲۰۲۵; Bajestani, Mun and Kim, ۲۰۲۶

در کنار این چهار نسل، لایه‌ای محافظ نیز قابل تشخیص است که تنها در مطالعات اخیرتر به‌صراحت مورد بحث قرار گرفته: امنیت سایبری، اعتماد و حاکمیت. کاستیو-ویار و همکاران به‌روشنی نشان می‌دهند که با گسترش اتصال، آسیب‌پذیری نیز افزایش یافته و امنیت دیگر لایه‌ای فرعی و پسینی نیست، بلکه باید از همان مراحل طراحی سیستم لحاظ شود (Castillo-Villar et al., ۲۰۲۶). به‌همین ترتیب، باجستانی، مون و کیم در بررسی خود از مدل‌های زبانی بزرگ در تولید هوشمند، بر ضرورت اعتبارسنجی، مدیریت عدم قطعیت و نظارت انسانی تأکید می‌کنند (Bajestani, Mun and Kim, ۲۰۲۶). این بازتعریف اهمیت دارد، چرا که نشان می‌دهد پیشرفت این حوزه صرفاً افزایش توانمندی سیستم‌ها نبوده، بلکه هدف تخصیص یافته به هر نسل از فناوری، از حسگری و اتصال، به ذخیره و یکپارچگی، به پیش‌بینی و تصمیم‌گیری، و سرانجام به تعامل و استدلال در کنار اپراتور انسانی تغییر کرده است.

۵. تغییر رویکرد و زاویه دید پژوهشگران

در پس این تحول فناورانه، تغییری شاید مهم‌تر نیز رخ داده که به پرسش بنیادین پژوهش‌های تولید هوشمند مربوط می‌شود. مطالعات نخستین این حوزه حول پرسشی فناوری‌محور سازمان یافته‌اند: چگونه می‌توان ماشین‌ها و سیستم‌ها را هوشمند و متصل کرد؟ (Zühlke, ۲۰۱۰; Davis et al., ۲۰۱۲; Kusiak, ۲۰۱۸). مطالعات دوره میانی این پرسش را به شکلی داده‌محور بازتعریف می‌کنند: چگونه می‌توان از داده تولید برای تصمیم‌گیری بهتر استفاده کرد؟ (Lu, ۲۰۱۷; Zhong et al., ۲۰۱۷; Frank, Dalenogare and Ayala, ۲۰۱۹; ۲۰۱۷). مطالعات ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳ به سمت پرسشی هوش‌محور حرکت می‌کنند: چگونه هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال می‌توانند عملکرد و پیش‌بینی‌پذیری تولید را بهبود بخشند؟ (Qi and Tao, ۲۰۱۸; He and Bai, ۲۰۲۱; Malik, Rajaguru and Azzawi, ۲۰۲۲). و سرانجام، جدیدترین مطالعات پرسشی اجتماعی‌فنی را مطرح می‌کنند: چگونه می‌توان هوش مصنوعی را به‌گونه‌ای در سیستم تولید جای داد که قابل اعتماد، انسان‌محور، امن، پایدار و تاب‌آور باشد؟ (Li et al., ۲۰۲۵; Kim et al., ۲۰۲۵; Castillo-Villar et al., ۲۰۲۶; Omigbodun, ۲۰۲۶).

- رویکرد فناوری‌محور: تمرکز بر فناوری و اتصال (Zühlke, ۲۰۱۰; Davis et al., ۲۰۱۲; Wang, Törngren, ۲۰۱۵; Monostori et al., ۲۰۱۶; Kang et al., ۲۰۱۶; Kusiak, ۲۰۱۸).
- رویکرد داده‌محور: تمرکز بر داده و تحلیل (Lu, ۲۰۱۷; Frank, Dalenogare and Ayala, ۲۰۱۹; Khan, ۲۰۲۶; Kribs, ۲۰۲۶).
- رویکرد هوش‌محور: تمرکز بر هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال (Qi and Tao, ۲۰۱۸; He and Bai, ۲۰۲۱; Lattanzi et al., ۲۰۲۱; Soori, Arezoo and Dastres, ۲۰۲۳; Sahoo and Lo, ۲۰۲۲; Malik, Rajaguru and Azzawi, ۲۰۲۲).
- رویکرد انسان‌محور یا اجتماعی‌فنی: تمرکز بر انسان، سازمان، اعتماد، امنیت و پایداری (Meindl et al., ۲۰۲۱; Li, ۲۰۲۵; Kim et al., ۲۰۲۵; Castillo-Villar et al., ۲۰۲۶; Bajestani, Mun and Kim, ۲۰۲۶; Omigbodun, ۲۰۲۶).

البته این توالی به این معنا نیست که رویکردهای پیشین از میان رفته‌اند؛ در طول همین بازه، مطالعات فناوری‌محور و داده‌محور همچنان منتشر شده‌اند. آنچه تغییر کرده، مرکز ثقل جدیدترین سهم‌های علمی این حوزه است که به تدریج از رویکرد نخست به سمت رویکرد چهارم جابه‌جا شده، و همین جابه‌جایی یکی از یافته‌های مرکزی این مقاله به شمار می‌رود.

۶. روندهای پژوهشی

مطالعه تطبیقی این سی‌ودو اثر، هشت روند تکرارشونده را آشکار می‌کند که در کنار هم، مسیر حرکت این حوزه را ترسیم می‌کنند.

۶.۱. از اتصال به هوشمندی

تولید هوشمند دیگر مترادف کارخانه متصل نیست. اتصال، که زمانی هدف اصلی به شمار می‌رفت، اکنون بیشتر جنبه زیرساختی پیدا کرده و ارزش تحلیلی اصلی در پیش‌بینی، تشخیص و پشتیبانی از تصمیم‌گیری قرار دارد؛ روندی که به‌روشنی در گذار از دیویس و همکاران به کانگ و همکاران و سپس چی و تائو دیده می‌شود (Davis et al., ۲۰۱۲; Kang et al., ۲۰۱۶; Qi and Tao, ۲۰۱۸).

۶.۲. از فناوری منفرد به همگرایی فناوری‌ها

در ادبیات جدیدتر، هوش مصنوعی، دوقلوی دیجیتال، اینترنت اشیا و کلان‌داده به‌ندرت به‌تنهایی کافی تلقی می‌شوند. ساهو و لو و اومیگبودون هر دو تأکید دارند که ارزش واقعی از هم‌افزایی این فناوری‌ها ناشی می‌شود، نه از پیشرفت مجزای هر یک (Sahoo and Lo, ۲۰۲۲; Omigbodun, ۲۰۲۶).

۶.۳. افزایش پیوسته اهمیت هوش مصنوعی

هوش مصنوعی از فناوری‌ای جانبی به یکی از ارکان اصلی تولید هوشمند تبدیل شده و مسیر آن از هوش مصنوعی کلاسیک به هوش مصنوعی مولد و سپس مدل‌های زبانی و چندوجهی ادامه یافته است؛ روندی که در مطالعات لی و همکاران، فن و همکاران، باندانا و وکرینک و باجستانی و همکاران قابل ردیابی است (Li et al., ۲۰۲۵; Fan et al., ۲۰۲۵; Bandhana and Vokřínek, ۲۰۲۵; Bajestani, Mun and Kim, ۲۰۲۶).

۶.۴. ظهور تولید هوشمند انسان‌محور

ادبیات جدید به‌صراحت این تصور را که هدف تولید هوشمند حذف کامل انسان است، رد می‌کند. لی و همکاران و کیم و همکاران هر دو انسان، ماشین و هوش مصنوعی را اجزای یک نظام مشترک تصمیم‌گیری می‌دانند، نه سه عامل جدا از هم (Li et al., ۲۰۲۵; Kim et al., ۲۰۲۵; Fan et al., ۲۰۲۵).

۶.۵. دوقلوی دیجیتال؛ از شبیه‌سازی به پشتیبانی تصمیم

دوقلوی دیجیتال در آغاز عمدتاً ابزاری برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی بود؛ اما در مطالعات جدیدتر، مسیری روشن از پایش به پیش‌بینی، بهینه‌سازی و در نهایت پشتیبانی از تصمیم دیده می‌شود (Qi and Tao, ۲۰۱۸; He and Bai, ۲۰۲۱; Lattanzi et al., ۲۰۲۱; Omigbodun, ۲۰۲۶).

۶.۶. جابه‌جایی امنیت از حاشیه به مرکز

هرچه اتصال سیستم‌های تولید بیشتر شده، آسیب‌پذیری آن‌ها نیز افزایش یافته است. کاستیو-ویار و همکاران به‌درستی نشان می‌دهند که امنیت سایبری دیگر موضوعی جانبی نیست، بلکه به‌یکای از الزامات اصلی طراحی سیستم تبدیل شده است (Castillo-Villar et al., ۲۰۲۶).

۶.۷. حرکت به‌سوی پایداری

هدف تولید هوشمند دیگر صرفاً بهره‌وری نیست. هی و بای و همچنین اومیگبودون نشان می‌دهند پژوهش‌های دوقلوی دیجیتال به‌طور فزاینده‌ای در کنار بهره‌وری، به شاخص‌های پایداری نیز توجه می‌کنند (He and Bai, ۲۰۲۱; Omigbodun, ۲۰۲۶).

۶.۸. توجه بیشتر به عوامل انسانی و سازمانی

در حالی که مطالعات اولیه تقریباً به طور کامل بر عوامل فنی متمرکز بودند، مطالعات جدیدتر مهارت، آمادگی سازمانی، اعتماد و طراحی انسان محور را به صراحت وارد بحث کرده اند؛ روندی که در میتال و همکاران، میندل و همکاران، سزار و همکاران و کیم و همکاران دیده می شود (Kim et al., ۲۰۲۴; Cezar et al., ۲۰۲۱; Meindl et al., ۲۰۱۸; Mittal et al., ۲۰۲۵).

۷. تناقض ها و تنش های موجود در ادبیات

یک مرور تحلیلی خوب نباید فقط به گزارش روندهای همگرا بسنده کند؛ لازم است تنش هایی را نیز که ادبیات موجود هنوز به طور کامل حل نکرده، آشکار سازد. در بررسی این سی و دو اثر، دست کم پنج تنش تکرار شونده قابل شناسایی است. نخستین تنش، میان اتوماسیون و انسان محوری است. بخش بزرگی از ادبیات تولید هوشمند، به ویژه در دوره های نخست، به دنبال افزایش سطح اتوماسیون و خودمختاری سیستم هاست، در حالی که مطالعات جدیدتر، به ویژه لی و همکاران و کیم و همکاران، بر حفظ و تقویت نقش انسان در فرایند تصمیم گیری تأکید دارند (Li et al., ۲۰۲۵; Kim et al., ۲۰۲۵). این تنش پرسشی بی پاسخ باقی می گذارد: چه میزان خودمختاری برای یک سیستم تولید مطلوب است؟ دومین تنش را می توان چنین بیان کرد که داده بیشتر لزوماً به تصمیم بهتر نمی انجامد. گسترش اینترنت اشیا و حسگرها حجم بسیار بیشتری از داده تولید کرده است، اما همان طور که دیویس و همکاران از یک سو و خان و کریبس از سوی دیگر نشان می دهند، کیفیت داده، یکپارچگی، تفسیر پذیری و حاکمیت داده هستند که در نهایت تعیین می کنند این داده به تصمیم بهتر تبدیل شود یا نه (Davis et al., ۲۰۱۲; Khan and Kribs, ۲۰۲۶).

سومین تنش میان قابلیت هوش مصنوعی و اعتماد به آن است. هرچه توانایی هوش مصنوعی برای تصمیم گیری در تولید بیشتر می شود، نگرانی درباره رفتار جعبه سیاه، توهم زایی و عدم قطعیت آن نیز افزایش می یابد؛ به گونه ای که لی و همکاران و باجستانی و همکاران هر دو نشان می دهند هرچه هوش مصنوعی قدرتمندتر شود، نه کمتر بلکه بیشتر به اعتماد نیاز پیدا می کند (Li et al., ۲۰۲۵; Bajestani, Mun and Kim, ۲۰۲۶).

چهارمین تنش میان بهره وری و تاب آوری است. سیستمی که به شدت بهینه شده، ممکن است در برابر اختلال آسیب پذیرتر باشد؛ نکته ای که به روشنی در پژوهش امنیت محور کاستیو-ویار و همکاران مطرح شده است (Castillo-Villar et al., ۲۰۲۶). به بیان دیگر، حداکثر بهره وری لزوماً معادل حداکثر تاب آوری نیست.

پنجمین و آخرین تنش به تفاوت میان آمادگی فناورانه و آمادگی سازمانی برمی گردد. فناوری پیشرفته به تنهایی موفقیت استقرار را تضمین نمی کند، اگر سازمان فاقد مهارت، زیرساخت، سرمایه گذاری کافی یا پذیرش کارکنان باشد؛ شکافی که فرانک و همکاران، میتال و همکاران و سزار و همکاران آن را به طور تجربی نشان داده اند (Frank, Dalenogare and Ayala, ۲۰۱۹; Cezar et al., ۲۰۲۴; Mittal et al., ۲۰۱۸).

۸. شکاف های پژوهشی

با کنار هم قراردادن شکاف های موضوعی که در سرتاسر این سی و دو اثر مطرح شده اند، می توان آن ها را در شش دسته کلی خلاصه کرد. در این میان، شکاف یکپارچه از همه مهم تر است، زیرا پنج شکاف دیگر را در بر می گیرد و به یکدیگر پیوند می زند. اگرچه ادبیات تولید هوشمند فناوری هایی مانند اینترنت اشیا، سیستم های سایبر فیزیکی، کلان داده، دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی را به تفصیل بررسی کرده، و موضوعاتی چون انسان در حلقه، هوش مصنوعی قابل اعتماد، امنیت سایبری و پایداری نیز مورد توجه قرار گرفته اند، این جریان های پژوهشی عمدتاً به صورت نسبتاً مجزا از یکدیگر توسعه یافته اند. در نتیجه، هنوز دیدگاهی یکپارچه درباره چگونگی تعامل قابلیت های فناورانه، داده ای و هوش مصنوعی با عوامل انسانی و سازمانی، و نیز

الزامات امنیت، تاب آوری و پایداری برای دستیابی به عملکرد برتر تولید وجود ندارد. همین شکاف یکپارچه، و نه فقدان یک یافته فناورانه خاص، هسته اصلی استدلال باقی این مقاله را تشکیل می دهد.

سطح	توصیف
مفهومی	نبود تعریفی کاملاً یکپارچه و مرزبندی روشن میان تولید هوشمند، انقلاب صنعتی چهارم و تولید هوشمند به معنای دقیق تر کلمه، همان طور که کولوت و همکاران نشان داده اند (Culot et al., ۲۰۲۰).
فناورانه	گرایش بخش قابل توجهی از ادبیات به بررسی فناوری های منفرد به جای تعامل میان آن ها (Lu, ۲۰۱۷; Sahoo and Lo, ۲۰۲۲).
سازمانی	ادغام ضعیف عوامل فناورانه و سازمانی در قالب یک مدل واحد (Frank, Dalenogare and Ayala, ۲۰۱۹; Mittal et al., ۲۰۲۴; ۲۰۱۸).
انسانی	روشن نبودن نقش بهینه انسان در سیستم هایی که به طور فزاینده ای خودمختار می شوند (Li et al., ۲۰۲۵; Kim et al., ۲۰۲۵).
عملکردی	کمبود شواهد تجربی درباره پیوند مستقیم فناوری ها با عملکرد واقعی تولید (Osterrieder, Budde and Friedli, ۲۰۲۰; Cezar et al., ۲۰۲۴).
یکپارچه	نبود چارچوبی جامع که فناوری، داده، هوش مصنوعی، انسان، سازمان، امنیت، پایداری و عملکرد را در کنار هم ببیند (Meindl et al., ۲۰۲۶; Castillo-Villar et al., ۲۰۲۶; Omigbodun, ۲۰۲۶).

۹. به سوی یک چارچوب مفهومی یکپارچه

در پاسخ به شکاف یکپارچه ای که در بخش پیشین شناسایی شد، این مقاله چارچوبی مفهومی پیشنهاد می کند. متناسب با ماهیت این مرور، این چارچوب باید صرفاً به عنوان برآیندی از ادبیات موجود در نظر گرفته شود، نه مدلی که به طور تجربی آزموده یا اعتبارسنجی شده باشد. هدف از ارائه آن روشن کردن نسبت ابعاد پراکنده ای است که در بخش های سوم تا هشتم مطرح شدند، به گونه ای که پژوهش های آینده بتوانند این روابط را بیازمایند، اصلاح کنند یا به چالش بکشند. این چارچوب از چهار لایه اصلی و یک لایه فراگیر تشکیل شده است:

- زیرساخت فناورانه: اینترنت اشیا، حسگرها، سیستم های سایبرفیزیکی، ابر و رباتیک، که پایه اتصال و محاسبات تولید هوشمند را فراهم می کنند (Zühlke, ۲۰۱۰; Wang, Törngren and Onori, ۲۰۱۵; Monostori et al., ۲۰۱۶; Lu, ۲۰۱۷).
- داده و هوشمندی: کلان داده، تحلیل داده، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، دوقلوی دیجیتال، هوش مصنوعی مولد و مدل های زبانی و چندوجهی، که قابلیت پیش بینی، بهینه سازی و استدلال را فراهم می کنند (Qi and Tao, ۲۰۱۸; He and Bai, ۲۰۲۱; Lattanzi et al., ۲۰۲۱; Li et al., ۲۰۲۵; Fan et al., ۲۰۲۵).
- عوامل انسانی و سازمانی: مهارت، آمادگی سازمانی، طراحی انسان در حلقه، اعتماد و مدیریت، که شرایط اجتماعی - فنی لازم برای استقرار موفق را فراهم می کنند (Mittal et al., ۲۰۱۸; Meindl et al., ۲۰۲۱; Cezar et al., ۲۰۲۴; Kim et al., ۲۰۲۵).
- قابلیت ها و پیامدهای تولید هوشمند: انعطاف پذیری، چابکی، قابلیت پیش بینی، تصمیم گیری، کیفیت و کارایی، که در نهایت به بهره وری، پایداری و تاب آوری منجر می شوند (He and Bai, ۲۰۲۱; Castillo-Villar et al., ۲۰۲۶; Omigbodun, ۲۰۲۶).
- امنیت سایبری، اعتماد و حاکمیت: لایه ای فراگیر که هر چهار لایه پیشین را در بر می گیرد، نه مازولی مجزا و پسینی (Li et al., ۲۰۲۵; Castillo-Villar et al., ۲۰۲۶; Bajestani, Mun and Kim, ۲۰۲۶).

در این چارچوب، زیرساخت فناورانه و لایه داده و هوشمندی در کنار هم قابلیت های تولید هوشمند را شکل می دهند؛ اما این قابلیت ها تنها زمانی به بهره وری، پایداری و تاب آوری منجر می شوند که عوامل انسانی و سازمانی به قدر کافی در آن ها ادغام

شده باشند، و تنها زمانی که امنیت سایبری، اعتماد و حاکمیت در تمامی لایه ها به عنوان الزامی طراحی محور در نظر گرفته شوند، نه به عنوان اقدامی جبرانی و پسینی. تأکید می شود که این چارچوب صرفاً ابزاری مفهومی برای یکپارچه سازی پژوهش های آینده است، نه یافته ای که خود ادبیات مرور شده آن را اثبات کرده باشد. به بیان دیگر، لایه ها و روابط میان آن ها بازتابی از الگوهای مشاهده شده در این سی و دو اثر هستند و باید همچون فرضیاتی برای آزمون تجربی در پژوهش های آینده در نظر گرفته شوند، نه رابطه ای علی یا مدلی که در همین مقاله سنجیده و تأیید شده باشد.

۱۰. بحث

هدف این مقاله پاسخ به این پرسش نیست که «سی و دو مطالعه درباره فناوری های تولید هوشمند چه گفته اند؟»، چرا که این پرسش پیش تر، به اشکال گوناگون، توسط برخی از همین مطالعات پاسخ داده شده است (Kang et al., ۲۰۱۶; Liao et al., ۲۰۱۷; Lu, ۲۰۱۷; Meindl et al., ۲۰۲۱; Sahoo and Lo, ۲۰۲۲; ۲۰۱۷). آنچه این مقاله در پی آن است، نشان دادن این نکته است که وقتی یافته های این سی و دو اثر در کنار هم قرار می گیرند، تولید هوشمند چگونه تحول یافته، امروز در چه جایگاهی قرار دارد، چه تنش ها و شکاف هایی همچنان پابرجاست، و مسیر منطقی یکپارچه سازی این ابعاد چه می تواند باشد. این سهم علمی، مسیری مشخص را دنبال می کند: از آنچه در گذشته مطالعه شده (بخش سوم)، به آنچه امروز بر ادبیات غالب است (بخش های چهارم و پنجم)، به سمتی که تولید هوشمند در حال حرکت به آن است (بخش ششم)، به آنچه همچنان میان جریان های پژوهشی ناپیوسته باقی مانده (بخش های هفتم و هشتم)، و در نهایت به چگونگی ممکن بودن یکپارچه سازی این ابعاد (بخش نهم). به همین دلیل، ارزش این مقاله را باید بیشتر در ترکیب و شناسایی شکاف یکپارچه جست و جو کرد، تا در گزارش هر یافته فناورانه به تنهایی.

۱۱. جمع بندی و پیشنهاد های پژوهش آینده

در این مقاله، مرور تحلیلی ای از سی و دو اثر پژوهشی درباره تولید هوشمند ارائه شد. نشان داده شد پژوهش های این حوزه در چهار دوره کلی، از اتصال و زیرساخت، به سوی تثبیت چارچوب، سپس هوشمندی داده محور و مبتنی بر دوقلوی دیجیتال، و در نهایت به سمت تولید قابل اعتماد، انسان محور و تاب آور حرکت کرده اند؛ حرکتی که با تغییری متناظر در نگاه پژوهشی، از فناوری محوری به اجتماعی فنی، همراه بوده است. هشت روند تکرار شونده و پنج تنش پابرجا شناسایی شد که در نهایت به شش دسته شکاف پژوهشی منتهی می شوند؛ مهم ترین آن ها جدا ماندن جریان های پژوهشی فناوری، داده و هوش مصنوعی، انسان و سازمان، امنیت، و پایداری از یکدیگر است.

بر پایه این تحلیل، چارچوبی مفهومی و یکپارچه پیشنهاد شد که در آن امنیت سایبری، اعتماد و حاکمیت به عنوان لایه ای فراگیر، زیرساخت فناورانه، داده و هوشمندی، و عوامل انسانی و سازمانی را به قابلیت های تولید هوشمند و در نهایت پیامدهایی چون بهره وری، پایداری و تاب آوری متصل می کند. پژوهش های آینده می توانند در وهله نخست، روابط پیشنهادی این چارچوب را به طور تجربی بیازمایند، به ویژه تعامل میان آمادگی انسانی-سازمانی و قابلیت های مبتنی بر هوش مصنوعی را؛ در وهله دوم، بهره وری و تاب آوری را نه به عنوان دو پیامد رقیب، بلکه به عنوان دو هدف طراحی هم زمان در نظر بگیرند؛ و در وهله سوم، سازوکارهای اعتبارسنجی و حاکمیت مناسب برای سیستم های مبتنی بر هوش مصنوعی مولد و مدل های زبانی بزرگ را در محیط های تولیدی انسان محور توسعه دهند (Li et al., ۲۰۲۵; Castillo-Villar et al., ۲۰۲۶; Bajestani, Mun and Kim, ۲۰۲۶). پیگیری این دستور کار یکپارچه، به جای ادامه پیشرفت مجزای هر یک از جریان های فناورانه، به احتمال زیاد تعیین کننده ترین مسیر برای فاز بعدی پژوهش های تولید هوشمند خواهد بود.

منابع

- Bajestani, M.S., Mun, D. and Kim, D.B. (2026) 'Human-in-the-loop and large language models in smart manufacturing: current applications, challenges, and perspectives', *Journal of Manufacturing Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2026.04.027>
- Bandhana, A. and Vokřínek, J. (2025) 'AI-driven manufacturing: surveying for Industry 4.0 and beyond', *SN Computer Science*. <https://doi.org/10.1007/s43069-025-00554-6>
- Castillo-Villar, K.K., Dai, H., Martinez Medina, G. and Mehrzadi, H. (2026) 'Cybersecurity for smart and resilient manufacturing and supply chains: a systematic review of the evolving knowledge base', *Computers & Industrial Engineering*, 112244. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2026.112244>
- Cezar, T.A.A., Miranda, L.T.P., Cancigliieri Junior, O. and Benitez, G.B. (2024) 'The four smarts of Industry 4.0 and barriers for technology deployment: a TOE perspective', *Computers & Industrial Engineering*, 110345. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110345>
- Culot, G., Nassimbeni, G., Orzes, G. and Sartor, M. (2020) 'Behind the definition of Industry 4.0: analysis and open questions', *International Journal of Production Economics*, 226, 107617. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107617>
- Davis, J., Edgar, T., Porter, J., Bernaden, J. and Sarli, M. (2012) 'Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance', *Computers & Chemical Engineering*, 47, pp. 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.06.037>
- Fan, J., Yin, Y., Wang, T., Dong, W., Zheng, P. and Wang, L. (2025) 'Vision-language model-based human-robot collaboration for smart manufacturing: a state-of-the-art survey', *Frontiers of Engineering Management*. <https://doi.org/10.1007/s42524-025-4136-9>
- Frank, A.G., Dalenogare, L.S. and Ayala, N.F. (2019) 'Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies', *International Journal of Production Economics*, 210, pp. 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- He, B. and Bai, K.-J. (2021) 'Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review', *Advances in Manufacturing*, 9, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00302-5>
- Hermann, M., Pentek, T. and Otto, B. (2016) 'Design principles for Industrie 4.0 scenarios', in *Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
- Kang, H.S., Lee, J.Y., Choi, S., Kim, H., Park, J.H., Son, J.Y., Kim, B.H. and Noh, S.D. (2016) 'Smart manufacturing: past research, present findings, and future directions', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1), pp. 111–128. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>
- Khan, C.N. and Kribs, J.D. (2026) 'Data-driven analytics in smart manufacturing: a review of methods, applications, and adoption constraints', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-026-17610-y>
- Kim, D.B. et al. (2025) 'Human-in-the-loop in smart manufacturing (H-SM): a review and perspective', *Journal of Manufacturing Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.05.020>
- Kusiak, A. (2018) 'Smart manufacturing', *International Journal of Production Research*, 56(1–2), pp. 508–517. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
- Lattanzi, L., Raffaelli, R., Peruzzini, M. and Pellicciari, M. (2021) 'Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(6), pp. 567–597. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1911003>
- Li, D., Liu, S., Wang, B., Yu, C., Zheng, P. and Li, W. (2025) 'Trustworthy AI for human-centric smart manufacturing: a survey', *Journal of Manufacturing Systems*, 78, pp. 444–456. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.11.020>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E.F.R. and Ramos, L.F.P. (2017) 'Past, present and future of Industry 4.0 — a systematic literature review and research agenda proposal', *International Journal of Production Research*, 55(12), pp. 3609–3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Lu, Y. (2017) 'Industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues', *Journal of Industrial Information Integration*, 6, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Mabkhot, M.M., Al-Ahmari, A.M., Salah, B. and Alkhalefah, H. (2018) 'Requirements of the smart factory system: a survey and perspective', *Machines*, 6(2), 23. <https://doi.org/10.3390/machines6020023>

- Malik, A., Rajaguru, P. and Azzawi, R. (2022) 'Smart manufacturing with artificial intelligence and digital twin: a brief review', in 2022 8th International Conference on Information Technology Trends (ITT), Dubai, UAE. IEEE, pp. 177–182. <https://doi.org/10.1109/ITT56123.2022.9863938>
- Meindl, B., Ayala, N.F., Mendonça, J. and Frank, A.G. (2021) 'The four smarts of Industry 4.0: evolution of ten years of research and future perspectives', *Technological Forecasting and Social Change*, 168, 120784. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120784>
- Mittal, S., Khan, M.A., Romero, D. and Wuest, T. (2018) 'A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: implications for SMEs', *Journal of Manufacturing Systems*, 49, pp. 194–214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>
- Monostori, L. et al. (2016) 'Cyber-physical systems in manufacturing', *CIRP Annals*, 65(2), pp. 621–641. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>
- Omigbodun, F.T. (2026) 'AI-driven digital twins in sustainable manufacturing: a critical review', *Sustainability*, 18(11), 5785. <https://doi.org/10.3390/su18115785>
- Osterrieder, P., Budde, L. and Friedli, T. (2020) 'The smart factory as a key construct of Industry 4.0: a systematic literature review', *International Journal of Production Economics*, 221, 107476. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.08.011>
- Qi, Q. and Tao, F. (2018) 'Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison', *IEEE Access*, 6, pp. 3585–3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Ramzan, F. and Reforgiato Recupero, D. (2025) 'A literature review on enhancing predictive maintenance in smart manufacturing industries', *SN Computer Science*. <https://doi.org/10.1007/s43069-025-00584-0>
- Sahoo, S. and Lo, C.-Y. (2022) 'Smart manufacturing powered by recent technological advancements: a review', *Journal of Manufacturing Systems*, 64, pp. 236–250. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.008>
- Soori, M., Arezoo, B. and Dastres, R. (2023) 'Digital twin for smart manufacturing, a review', *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017>
- Wang, L., Törnngren, M. and Onori, M. (2015) 'Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing', *Journal of Manufacturing Systems*, 37, pp. 517–527. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.04.008>
- Zhong, R.Y. et al. (2017) 'Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: a review', *Engineering*, 3(5), pp. 616–630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- Zühlke, D. (2010) 'SmartFactory — towards a factory-of-things', *Annual Reviews in Control*, 34(1), pp. 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2010.02.008>