فصلنامه‌ی خبری تحلیلی
تابستان و پاییز ۱۴۰۲
شماره‌ی نهم

رصد فناوری

هوش مصنوعی صنعتی
برای سیستم‌های تولیدی بر پایه
انقلاب صنعتی چهارم

رضا نوریان

کارشناسی ارشد
مهندسی برق
الکترونیک از دانشگاه
امیرکبیر، کارشناس
مرکز تحقیق و توسعه
همراه اول

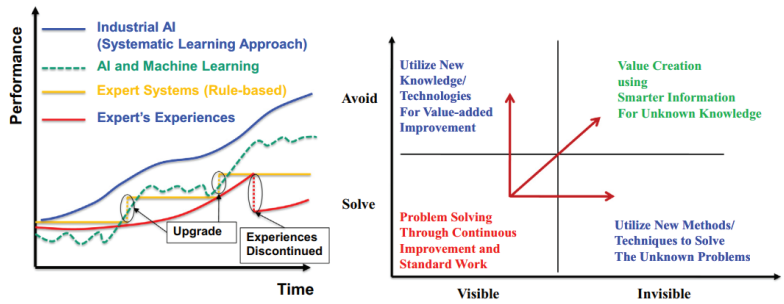
از آنجا که هوش مصنوعی به پیشوای فناوری‌هایی که توان تغییر دنیا را دارند تبدیل شده است، برای مشاهده‌ی تاثیر واقعی آن بر نسل بعدی سیستم‌های صنعتی، یک پیشرفت سیستماتیک و اجرایی درباره هوش مصنوعی ضرورت دارد که به آن انقلاب صنعتی چهارم گفته می‌شود. در این مقاله دیدگاهی درمورد وضعیت هوش مصنوعی و اکوسیستم مورد نیاز برای کنترل قدرت هوش مصنوعی در برنامه‌های صنعتی، مطابق معماری 5C که در سال ۲۰۱۵ توسط لی و همکاران ارائه شده است، ارائه می‌شود.

مقدمه‌ای بر هوش مصنوعی صنعتی

هوش مصنوعی یک علم شناخته شـــده با مطالعات زیاد در زمینه پردازش تصویر، زبان طبیعی، یادگیری ماشین و... است. تکنیک‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی بعنوان جادوی سیاه شـــناخته شده و معمولا شواهد قانع کننده کمی مبنی بر کارایی دائمی و مکرر این تکنیک‌ها با قول بازگشت ســـرمایه در صنعت وجود دارد[1]. همزمان الگوریتم‌های یادگیری ماشـــین، به مقدار زیادی وابسته به تجربه و اولویت‌های توســـعه‌دهنده آن است. بنابراین موفقیت هوش مصنوعـــی در برنامه‌های صنعتی محدود شده است. در مقابل آن، هوش مصنوعی صنعتی یک نظام هماهنگ است که بر توسعه، تایید و گسترش الگوریتم‌های متنوع یادگیری ماشین برای پایداری اجرایی در برنامه‌های صنعتی، متمرکز است. که بصورت یک روش برای دستیابی به یک راه حل در برنامه‌ها و عملکـــرد صنعتی، همانند پلی بین نتایج تحقیقـــات آکادمیک در هوش مصنوعی و کارمندان صنعت عمل می‌کند.

اتوماسیونی که طبق هوش مصنوعی اجرا می‌شود هنوز راه زیادی

1- https://www.researchgate.net/publication/343648698_Black_Magic_in_Deep_Learning_How_Human_Skill_Impacts_Network_Training



شکل ۱ - سمت چپ) مقایسه هوش مصنوعی صنعتی با سایر سیستم های یادگیری؛ سمت راست) تأثیر هوش مصنوعی صنعتی [۴]

برای دربر داشتن یک تاثیر چشمگیر در رشد تولیدات صنعتی دارد [۱]. همچنین صنایع امروزی با چالش‌های زیادی در رابطه با تقاضای بازار و رقابت روبرو هستند. آن‌ها به یک تغییر رادیکالی با عنوان انقلاب صنعتی چهارم نیازمندند. توسعه راه‌کارهای صنعتی مبتنی بر هوش مصنوعی با فناوری‌های جدید در حال پیشرفت همچون اینترنت اشیاء صنعتی (IIoT[۲]) [۳] و تحلیل کلان داده [۴-۶]، رایانش ابری [۷-۹] و سیستم‌های سایبرفیزیکی [۲،۱۰-۱۱] دارای یک همبستگی نزدیک است و در صورت همگرایی این فناوری‌ها عملکرد صنایع در یک مسیر منعطف، به صرفه و کم آلایش قرار می گیرد.

در توسعه هوش مصنوعی صنعتی مهم است که چارچوب ساختار، روش‌ها و چالش‌های آن برای استفاده در صنعت شفاف‌سازی شود. به همین منظور یک اکوسیستم هوش مصنوعی طراحی شده است که المان‌های این فضا را در برگرفته و راهنمایی برای درک بهتر و بکارگیری آن باشد. در این راستا، فناوری‌هایی که یک هوش مصنوعی صنعتی می تواند بر پایه آن‌ها ساخته شود، شرح داده می‌شود. در شکل ۱ سمت چپ، مقایسه‌ای از عملکرد مطلوب هوش مصنوعی صنعتی با سایر سیستم‌های یادگیری در طول زمان ارائه شده است.

المان های کلیدی در سیستم هوش مصنوعی صنعتی:

المان‌های هوش مصنوعی صنعتی می تواند در ۵ دسته کلی تقسیم شود. این المان‌های کلیدی فناوری‌های تحلیلی، فناوری کلان داده، فناوری‌های ابری یا اینترنتی، قلمرو دانش فنی و شواهد را شامل می‌شود. تحلیلی‌ها هسته هوش مصنوعی‌اند و فقط وقتی که سایر المان‌ها حضور داشته باشند، کارایی دارند. کلان داده‌ها و رایانش ابری یا اینترنت هردو ضروری‌اند و منبع اطلاعات (داده) و یک پلتفرم را برای هوش مصنوعی صنعتی بدست می‌دهند. همانگونه که این دو ضروری‌اند، قلمرو دانش فنی و شواهد نیز از اهمیت برخوردارند که در ادامه بیشتر به آن‌ها پرداخته شده است. قلمرو دانش فنی المانی کلیدی در جهات زیر است:

- درک مسئله و متمرکز ساختن قدرت هوش مصنوعی بر روی حل آن
- درک سیستم به منظور آنکه داده صحیح با کمیت صحیح جمع آوری شود
- درک معنای فیزیکی پارامترها و چگونگی ارتباط آن با ویژگی‌های فیزیکی یک سیستم یافرآیند
- درک چگونگی تنوع این پارامترها در ماشین‌های مختلف.

شواهد نیز در ارزش گذاری مدل‌های هوش مصنوعی و پیوند آن‌ها با توانایی یادگیری انباشته بسیار مهم هستند

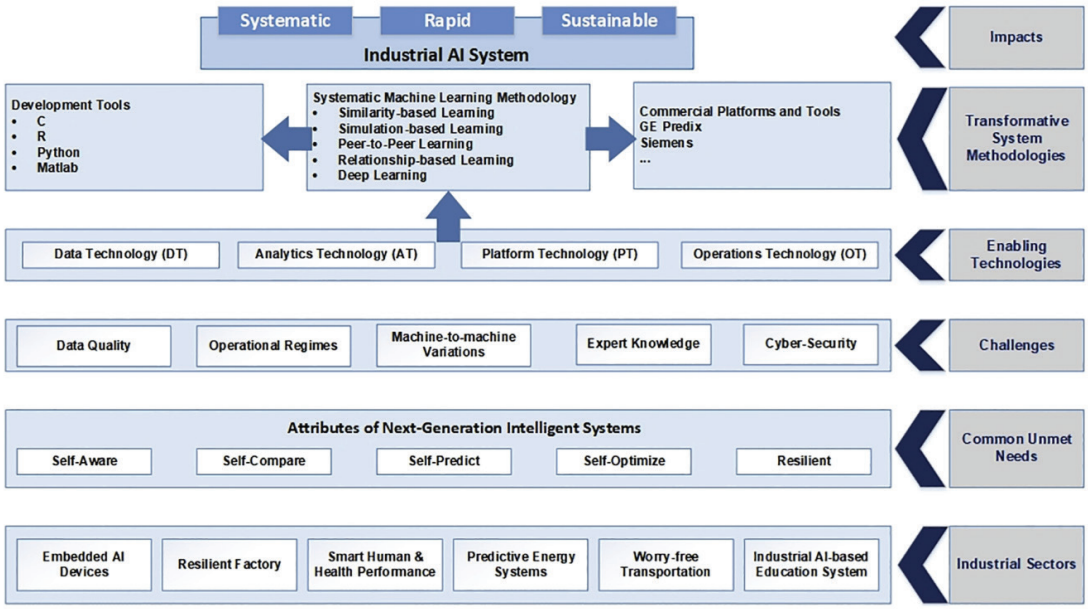
تنها با جمع‌آوری الگوی داده و شواهد وابسته به آن‌ها می توانیم مدل هوش مصنوعی را به گونه‌ای توسعه دهیم که در طول زمان صحیح‌تر، با ادراک‌تر و نیرومندتر شود. شکل ۱ سمت راست به ما نشان می‌دهد هوش مصنوعی چگونه ما را از فضایی قابل مشاهده به فضای غیرقابل شهود برده و بجای حل مشکلات، توانایی پیشگیری از آن‌ها قبل از وقوع از را ممکن می‌سازد.

اکوسیستم هوش مصنوعی صنعتی

در شکل ۲ اکوسیستم هوش مصنوعی ارائه شده است که یک استراتژی فکر کردن متناوب برای الزامات، چالش‌ها، فناوری‌ها و روش‌ها را برای ایجاد سیستم‌های هوش مصنوعی با قابلیت تغییر برای صنعت شرح می‌دهد. از این دیاگرام می توان به عنوان یک راهنمای سیستماتیک برای پیشبرد یک استراتژی به منظور ساخت و گسترش هوش مصنوعی صنعتی، استفاده نمود. این اکوسیستم درون یک صنعت هدف گذاری شده، الزاماتی نظیر خودآگاه[۳]، خود قیاس[۴]، خود پیش بین[۵]، خود بهینه ساز[۶] و انعطاف‌پذیر را شرح می‌دهد. این نمودار همچنین شامل چهار فناوری فعال کننده اصلی از جمله فناوری داده[۷]، فناوری تحلیلی[۸]، فناوری بستر[۹] و فناوری عملیات[۱۰] است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است این چهار فناوری، توانمندسازهایی برای

2- Industrial Internet of Things

3- Self-aware
4- Self-compare
5- Self-predict
6- Self-optimize
7- Data technology
8- Analysis technology
9- Platform technology
10- Operation technology



شکل ۲- اکوسیستم هوش مصنوعی صنعتی [۱۳]

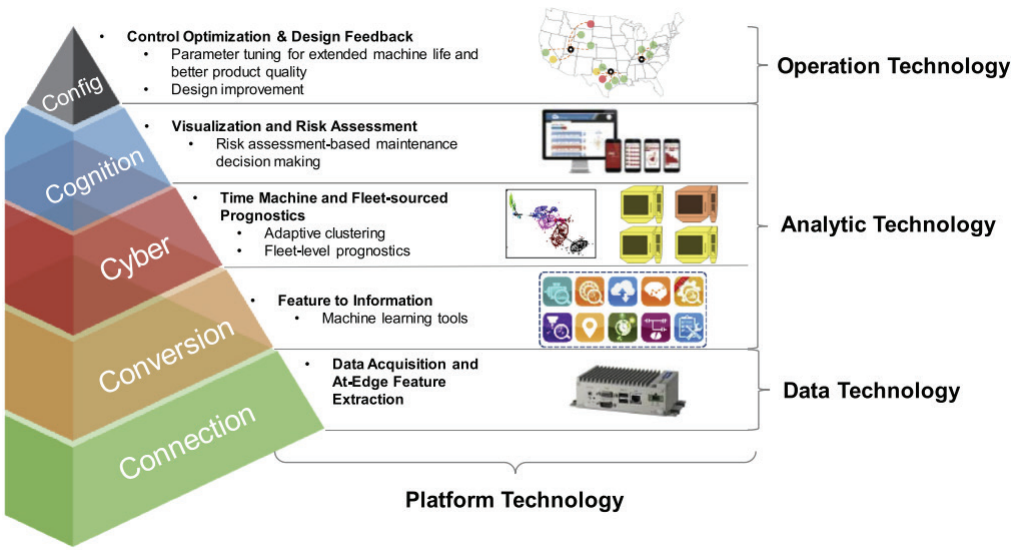
دستیابی به اتصال[11]، تبدیل[12]، سایبر[13]، شناخت[14] و پیکربندی[15] یا 5C هستند. در ادامه این گزارش، شرح مختصری از هریک از فناوری‌های ذکر شده ارائه می‌شود.

فناوری‌های داده (DT)

فناوری‌های داده آن دسته از فناوری‌هایی هستند که امکان کسب موفقیت‌آمیز داده های مفید را با معیارهای عملکردی قابل توجه در ابعاد مختلف فراهم می کنند. بنابراین، شناسایی تجهیزات و مکانیسم مناسب برای دستیابی به داده‌های مفید، یکی از فعال کننده‌های مرحله «اتصال هوشمند» در معماری 5C را ممکن می‌سازد. جنبه دیگر فناوری داده، ارتباطات داده است. ارتباطات در تولید هوشمند فراتر از انتقال نسبتاً مستقیم داده‌های به دست آمده از منبع آن تا نقطه تحلیل آن است و شامل:

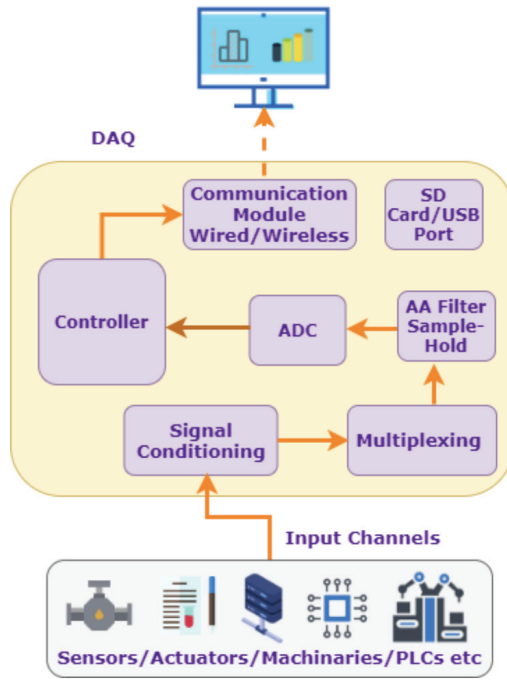
- تعامل بین منابع تولیدی در فضای فیزیکی
- انتقال و ذخیره سازی داده‌ها از ماشین‌ها و کف کارخانه به فضای ابری
- ارتباط از فضای فیزیکی به فضای سایبری

11- Connection
12- Conversion
13- Cyber
14- Cognition
15- Config



شکل ۳ : توانمندسازی فناوری‌ها برای تحقق CPS در تولید [۱۳]

ارتباط از فضای مجازی به فضای فیزیکی می‌شود. علاوه بر این، DT باید به مسائل دیگر سیستم‌های داده، یعنی خرابی، بد بودن و پس زمینه داده‌ها رسیدگی کند [۶].



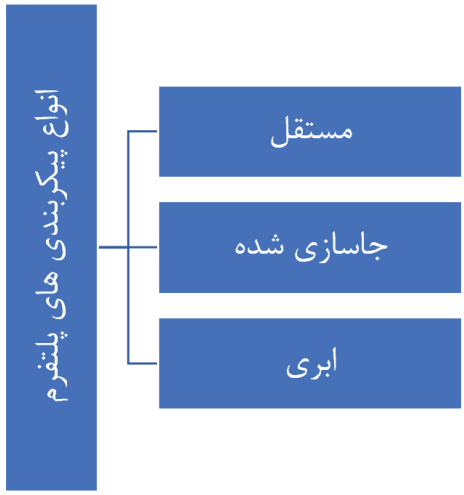
شکل ۴ - سیستم جمع آوری داده در محیط صنعتی [۱۳]

فناوری‌های تجزیه و تحلیل (AT)

فناوری تجزیه و تحلیل، داده های سنسوری را از اجزای مورد نیاز به اطلاعات مفید تبدیل می کند. مدل‌سازی مبتنی بر داده، الگوهای پنهان، همبستگی‌های ناشناخته و سایر اطلاعات مفید را از سیستم‌های تولیدی آشکار می کند. این اطلاعات می تواند برای پیش‌بینی سلامت دارایی‌ها، مانند ایجاد ارزش سلامت یا ارزش عمر مفید باقی‌مانده، که می تواند برای پیش‌بینی ماشین و مدیریت سلامت استفاده شود، مورد استفاده قرار گیرد. فناوری‌های تحلیلی این اطلاعات را با سایر فناوری‌ها برای بهبود بهره‌وری و نوآوری ادغام می کند.

فناوری‌های پلتفرم (PT)

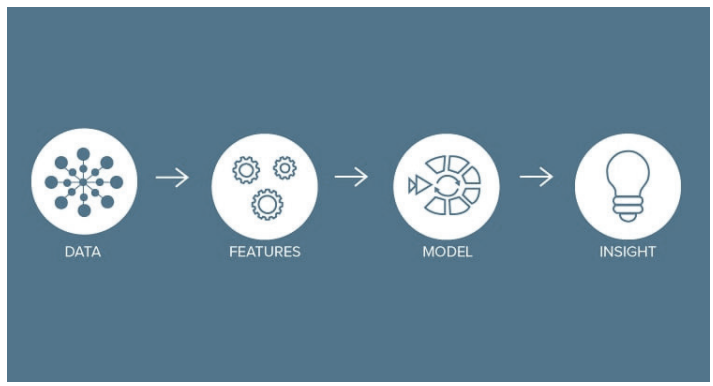
فناوری‌های پلتفرم شامل معماری سخت افزاری برای تولید ذخیره‌سازی داده‌ها، تجزیه و تحلیل و بازخورد است. یک معماری پلتفرم سازگار برای تجزیه و تحلیل داده‌ها یک عامل تصمیم گیری اصلی برای تحقق ویژگی‌های تولید هوشمند مانند چابکی، پردازش رویدادهای پیچیده و غیره است. سه نوع اصلی از پیکربندی‌های پلتفرم به طور کلی یافت می‌شوند – مستقل، جاسازی شده و ابری. رایانش ابری با توجه به قابلیت‌های محاسباتی، ذخیره‌سازی و سرویس‌دهی، پیشرفت قابل توجهی در فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات است. پلتفرم ابری می تواند استقرار سریع خدمات، سطح بالای سفارشی سازی، یکپارچه‌سازی دانش و تجسم موثر را با مقیاس‌پذیری بالا ارائه دهد.



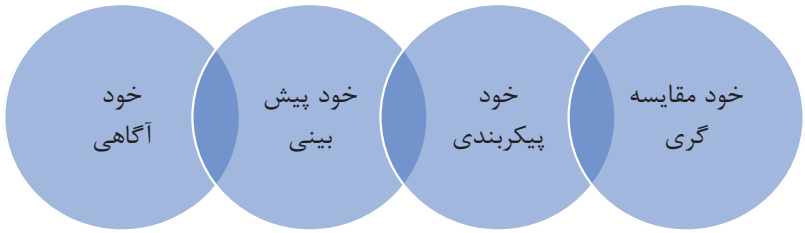
شکل ۶- انواع پیکربندی پلتفرم [۱۳]

فناوری عملیات (OT)

فناوری عملیات در اینجا به مجموعه‌ای از تصمیمات اتخاذ شده و اقدامات انجام شده بر اساس اطلاعات استخراج شده از داده‌ها اشاره



شکل ۵ : تبدیل داده های خام به دانش به کمک هوش مصنوعی [۱۳]



شکل ۷ : قابلیت های نهایی در فناوری عملیات

دارد. در حالی که ارائه اطلاعات سلامت ماشین و فرآیند به اپراتورها ارزشمند است، یک کارخانه مجز به صنعت ۴,۰ فراتر رفته و ماشین‌ها را قادر می‌سازد تا بر اساس آن ارتباط برقرار کنند و تصمیم بگیرند. بینش ارائه شده این همکاری ماشین با ماشین می تواند بین دو ماشین در یک طبقه یا ماشین‌هایی در دو کارخانه متفاوت از هم باشد. آن‌ها می توانند تجربیات خود را در مورد اینکه چگونه تنظیم پارامترهای خاص می‌تواند عملکرد را بهینه کند به اشتراک بگذارند و تولید خود را بر اساس در دسترس بودن ماشین‌های دیگر تنظیم کنند. در یک کارخانه صنعت ۴,۰، فناوری عملیات آخرین مرحله است که منجر به چهار قابلیت زیر می شود: ۱) خودآگاهی ۲) خود پیش‌بینی، ۳) خود پیکربندی و ۴) خود مقایسه‌گری

خودآگاهی به معنای آگاهی سیستم به پارامترهای خروجی متناظر با ورودی‌ها و شرایط محیطی است. یک سیستم خودآگاه می‌تواند در شرایط مختلف بهترین تصمیم را به همراه سایرین اتخاذ کند. خود پیش‌بینی به معنای پیش‌بینی ایرادات و مشکلات احتمالی از تجربیات گذشته است به این مفهوم که سیستم مدام در حال یادگیری بوده و می‌تواند ارتباط بین شرایط محیطی، ورودی‌ها و خروجی‌های اندازه‌گیری شده را با ایرادات و اشکالاتی که قبلا در سیستم به وجود آمده پیدا کند و از آن‌ها برای پیش‌بینی مشکلات احتمالی آینده بهره ببرد. خود پیکربندی یا هماهنگی تطبیقی که گاهی اوقات به عنوان پیکربندی مجدد و گاهی اوقات به عنوان سازگاری نامیده می‌شود به طیف تغییراتی اشاره دارد که یک سیستم در پاسخ به رخدادهایی در محیط خود و درون خود ایجاد می‌کند. خودمقایسه‌گری درواقع فرآیند مقایسه سیستم با شرایط ایده‌آلی است که برای آن تصویر شده است. به بیان دیگر سیستم همواره خود را با خروجی‌های مطلوب از پیش تعیین شده مقایسه می‌کند و پارامترهای قابل تنظیم را به گونه‌ای پیکربندی می‌کند که نزدیکترین جواب را به خروجی‌های مطلوب داشته باشد. این فرآیند بسیار شبیه به مبحث یادگیری تقویتی[16] در یادگیری ماشین است.

دستاوردهای هوش مصنوعی در حوزه صنعت در مقایسه با سایر حوزه‌ها[17]

اتوماسیون

تولیدکنندگان از هوش مصنوعی برای اتوماسیون صنعتی استفاده می‌کنند. سیستم‌های هوشمند می‌توانند وظایف پیچیده و ساده را بر عهده بگیرند، بنابراین هزینه‌های عملیاتی و حضور انسان در تمام مراحل تولید را کاهش می‌دهند. به عنوان مثال، پورشه از وسایل نقلیه هدایت شونده خودمختار (AGV) برای خودکارسازی بخش‌های بزرگی از فرآیند تولید خودرو استفاده می‌کند. AGVها اجزای بدنه خودرو را از یک ایستگاه پردازش به ایستگاه بعدی منتقل می‌کنند و نیاز به تعامل انسانی را از بین می‌برند.

تولید ۲۴ ساعته در ۷ روز هفته

برخلاف انسان‌ها، هوش مصنوعی نیازی به استراحت، تعطیلات یا خواب ندارد. پلتفرم‌های هوش مصنوعی صنعتی خسته یا گرسنه نمی‌شوند و می‌توانند در تمام ساعات روز روی خط تولید کار کنند. پوشش شبانه‌روزی به شرکت‌های صنعتی هوش مصنوعی اجازه می‌دهد قابلیت‌های تولید خود را افزایش دهند، بنابراین می‌توانند تقاضای رو به رشد مشتری را برآورده کنند.

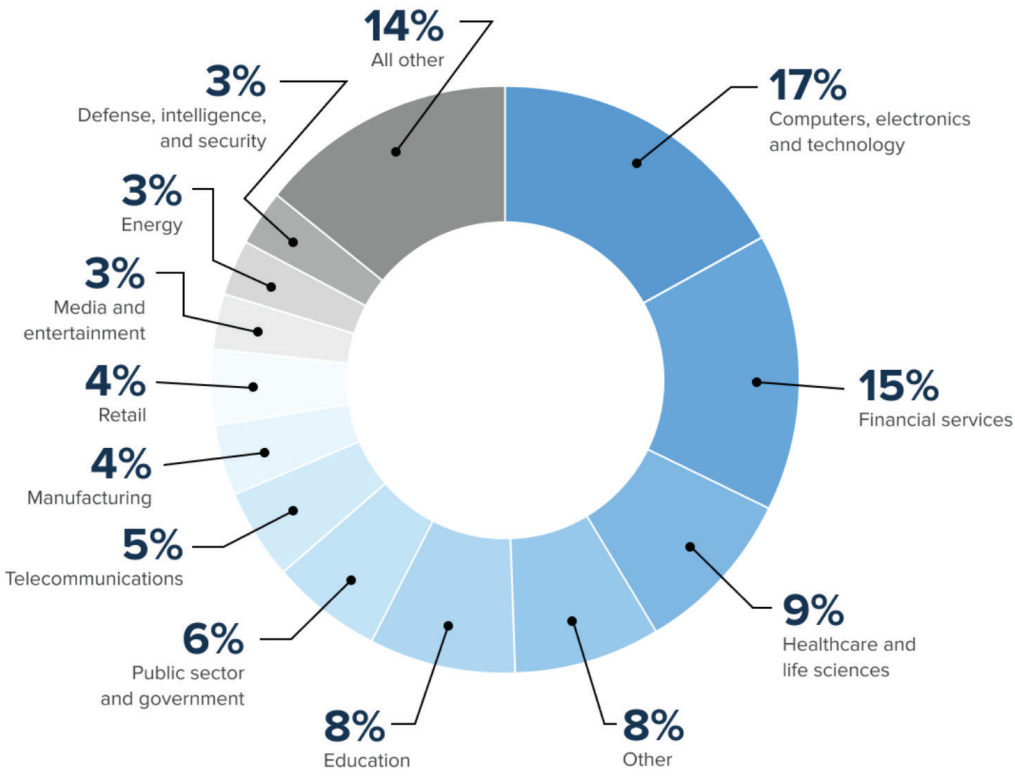
افزایش امنیت

یکی دیگر از مزایای هوش مصنوعی در صنعت تولید، افزایش ایمنی محصول است. بنابراین، الگوریتم‌های پیش‌بینی می‌توانند به جلوگیری از خطاهای احتمالی در تجهیزات و کاهش حوادث در محل کمک کنند. بینایی کامپیوتری همچنین می‌تواند از صدمات و عدم وجود تجهیزات حفاظت فردی (PPE) برای ارتقای ایمنی محل کار صنعتی جلوگیری کند.

نسبت عرضه / تقاضای دقیق

پیش‌بینی تقاضای مبتنی بر هوش مصنوعی به شرکت‌ها اجازه می‌دهد تا تغییرات تقاضای مصرف‌کننده را پیش‌بینی کنند. این قدرت پیش‌بینی به‌ویژه برای تولیدکنندگان در طول عدم تعادل تقاضای ناشی از شرایط ویژه مانند بروز همه‌گیری‌ها مرتبط بوده است. افزایش قیمت مواد خام نیز شرکت ها را تشویق می‌کند تا پیش‌بینی تقاضای مشتریان را برآورد کنند. با تجزیه و تحلیل داده‌های تاریخی و روندهای فعلی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین اطمینان بیشتری را در برنامه‌ریزی زنجیره تامین فراهم می‌کنند.

16- Reinforcement learning
17-https://indatalabs.com/blog/industrial-artificial-intelligence



شکل ۸- حوزه های مختلف کاربردی هوش مصنوعی صنعتی[1]

1- https://www.oreilly.com/radar/ai-adoption-in-the-enterprise-2021/

کاهش هزینه ها

به‌طور خلاصه، نرم افزار هوش مصنوعی صنعتی منجر به بازگشت سرمایه بالاتر و بهینه سازی هزینه‌ها می‌شود. کاربردهای صنعتی هوش مصنوعی فرآیندهای کار فشرده ای را انجام می‌دهند و از خرابی ماشین آلات پرهزینه جلوگیری می کنند. آن‌ها همچنین شرکت‌ها را قادر می‌سازند اطلاعات بیشتری از اطلاعات داده‌ای داشته باشند و تصمیمات تجاری دقیق را اتخاذ کنند. به گفته Deloitte، اتوماسیون هوشمند هزینه‌های فرآیند کسب و کار را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهد.

مطالعه موردی: ماشین کنترل عددی هوشمند

در این بخش، کاربرد و اجرای چارچوب معماری هوش مصنوعی صنعتی شرح داده شده در بخش ۳ برای سیستم هوشمند که یک ماشین کنترل عددی کامپیوتری (CNC) است، شرح داده می‌شود. در صنعت تولید، وضعیت سلامت ماشین ابزار از اهمیت زیادی برخوردار است و هدف این مطالعه موردی نشان دادن این است که چگونه هوش مصنوعی صنعتی با استفاده از چهار فناوری توانمندساز می‌تواند راه حلی کامل برای نظارت به صورت بلادرنگ و پیش‌بینی عملکرد یک ماشین ارائه دهد. این سیستم برای به حداقل رساندن هزینه‌های نگهداری و بهینه سازی کیفیت محصول به طور همزمان طراحی شده است. بر اساس شکل ۳، اولین گام در دستورالعمل، در نظر گرفتن نیازهای برآورده نشده رایج در این حوزه کاربردی است. برای رفع نیازهای برآورده نشده (یک ماشین خودآگاه و خود بهینه‌ساز) چالش‌های ۱) کیفیت داده، ۲) پیچیدگی چند رژیم، ۳) تنوع ماشین به ماشین، ۴) ترکیب سیستم خبره و ۵) پیچیدگی داده‌های چندمنبعی باید در نظر گرفته شود. شکل ۹ یک نمای کلی از نحوه استفاده از فناوری‌های PT، AT، DT و OT برای رسیدگی به این چالش‌ها و توسعه یک سیستم دوکی هوشمند ارائه می‌دهد.

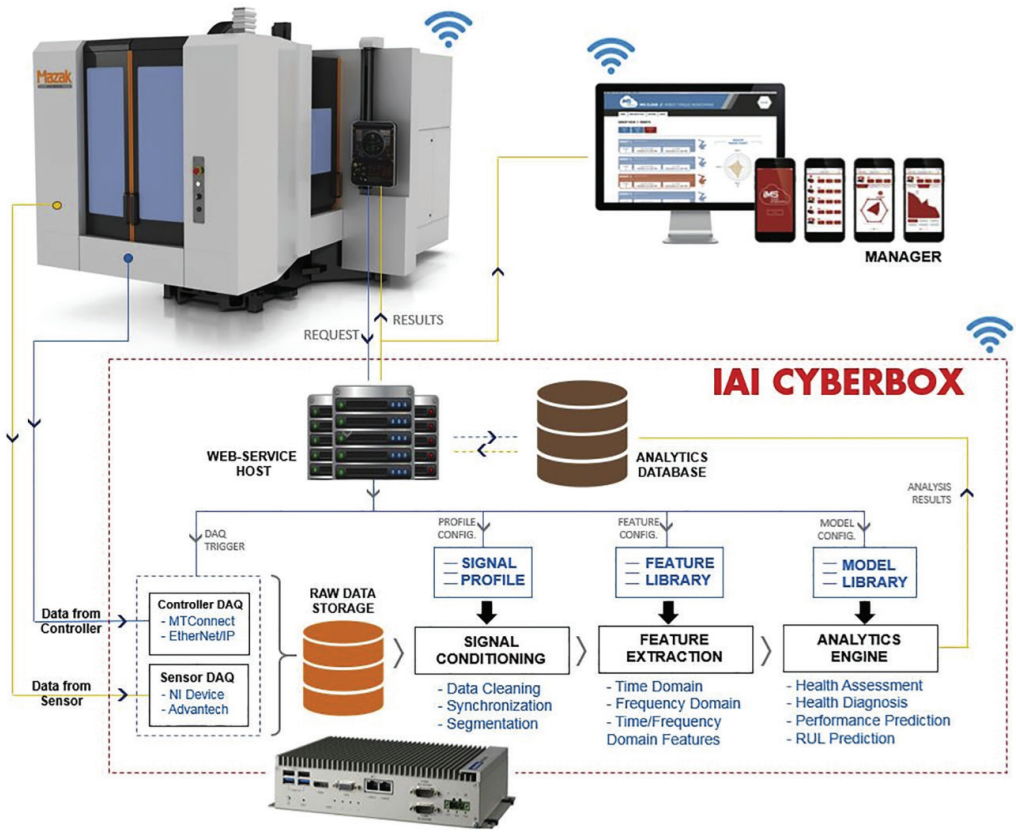
چالش‌های هوش مصنوعی صنعتی

انتظارات از هوش مصنوعی صنعتی بسیار گسترده است. به طوری که تحقق حتی بخشی از این انتظارات نیز نشان دهنده چالش‌های منحصر به فرد و واقعی استفاده از هوش مصنوعی در صنایع است. از میان چالش‌ها و پیچیدگی‌های موجود، موارد زیر از اهمیت و اولویت بالاتری برخوردارند:

تعاملات ماشین با ماشین

در حالی که الگوریتم‌های هوش مصنوعی می توانند مجموعه‌ای از ورودی‌ها را به مجموعه‌ای از خروجی‌ها به طور دقیق مرتبط کنند، اما در مقابل تغییرات کوچک در ورودی‌های ناشی از تغییرات از ماشینی به ماشین دیگر نیز حساس هستند. باید اطمینان حاصل شود که راه‌حل‌های تکی هوش مصنوعی با کار سایر سیستم‌ها تداخل/تضاد ندارند.

HAMRAH-E-AVAL



شکل ۹- فناوری پلتفرم برای ماشین کنترل عددی کامپیوتری هوشمند [۱۳]

کیفیت داده

الگوریتم‌های هوش مصنوعی به مجموعه داده‌های عظیم و تمیز با حداقل سوگیری یا جهت گیری نیاز دارند. با یادگیری از مجموعه داده‌های نادرست یا ناکافی، نتایج پایین دستی می توانند ناقص باشند. این حالت زمانی پیش می‌آید که داده‌های آموزشی توزیع ناهمگونی در کلاس‌های هدف داشته باشند که در نتیجه، سیستم به کلاس خاصی که داده های بیشتری به خود تخصیص داده است بایاس می‌شود و روابط ورودی‌ها برای انتخاب دیگر کلاس ها به خوبی آموزش نمی‌بینند.

امنیت سایبری

استفاده روزافزون از فناوری‌های متصل، سیستم تولید هوشمند را

در برابر خطرات سایبری آسیب پذیر می کند. در حال حاضر، مقیاس این آسیب پذیری کمتر مورد توجه قرار گرفته است و صنعت برای تهدیدات امنیتی موجود آماده نیست [۱۲].

نتیجه گیری

از آنجایی که هوش مصنوعی به مرز فناوری‌های در حال تغییر جهان تبدیل شده است، نیاز فوری به توسعه و اجرای سیستماتیک هوش مصنوعی وجود دارد تا تأثیر واقعی آن در سیستم‌های صنعتی، یعنی انقلاب صنعتی چهارم مشاهده شود. هدف این مطالعه تعریف اصطلاح هوش مصنوعی صنعتی و قرار دادن آن در منظر پارادایم انقلاب صنعتی چهارم است. علاوه بر این، این مقاله با ارائه یک نمای کلی از اکوسیستم هوش مصنوعی صنعتی در تولید امروزی، در صدد ارائه دستورالعملی برای استراتژی‌سازی تلاش‌ها در جهت تحقق سیستم‌های هوش مصنوعی صنعتی است.

منابع:

[1] Lee K. Artificial intelligence, automation, and the economy. The White. House Blog; 2016.

[2] Lee J, Bagheri B, Kao HA. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. Manuf Lett 2015;3:18–23.

[3] Da Xu L, He W, Li S. Internet of things in industries: A survey. IEEE Trans Ind Inf 2014;10(4):2233–43.

[4] Lee J, Lapira E, Bagheri B, Kao HA. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. Manuf Lett 2013;1(1):38–41.

[5] Shi J, Wan J, Yan H, Suo H. November. A survey of cyber-physical systems. In: Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2011 International Conference on. IEEE. 2011. p. 1–6.

[6] Lee J, Ardakani HD, Yang S, Bagheri B. Industrial big data analytics and cyberphysical systems for future maintenance & service innovation. Procedia CIRP 2015;38:3–7.

[7] Zhang L, Luo Y, Tao F, Li BH, Ren L, Zhang X, et al. Cloud manufacturing: a new manufacturing paradigm. Enterprise Inf Syst 2014;8(2):167–87.

[8] Wu D, Greer MJ, Rosen DW, Schaefer D. Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art. J Manuf Syst 2013;32(4):564–79.

[9] Yang S, Bagheri B, Kao HA, Lee J. A unified framework and platform for designing of cloud-based machine health monitoring and manufacturing systems. J Manuf Sci Eng 2015;137(4):040914.

[10] Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems. Impact Control Technol 2011;12 (1):161–6.

[11] Leitao P, Karnouskos S, Ribeiro L, Lee J, Strasser T, Colombo AW. Smart agents in industrial cyber–physical systems. Proc IEEE 2016;104(5):1086–101.

[12] Tuptuk N, Hailes S. Security of smart manufacturing systems. J Manuf Syst 2018;47:93–106.

[13] Jay Lee, Hossein Davari, Jaskaran Singh, Vibhor Pandhare. Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems, Manufacturing Letters,Volume 18, 2018.