



فصلنامه علمی
سال یازدهم شماره ۲، شماره پیاپی ۴۲ تابستان ۱۴۰۵
Vol. 11, No. 2 Issue No. 42
Summer 2026, Quarterly
صفحه ۳۲-۲۵

Iran Polymer Technology;
Research and Development

واژه‌های کلیدی:

هوش مصنوعی،
پتروشیمی،
تحلیل اقتصادی.

نقش توسعه هوش مصنوعی در صنعت پتروشیمی

پارسا متقی^{۱*}، مهرانوش محمدی^۲

۱. تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی

۲. تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، عضو هیئت علمی کارشناسی مهندسی شیمی

چکیده ...

صنعت پتروشیمی به‌عنوان یکی از ستون‌های اصلی اقتصاد جهانی، همواره با چالش‌هایی نظیر پیچیدگی فرایندهای شیمیایی، نسبت هزینه‌های بالای انرژی و ضرورت حفظ ایمنی در محیط‌های پرخطر روبرو بوده است. ظهور هوش مصنوعی و فناوری‌های مبتنی بر داده، الگوهای سنتی مدیریت و کنترل در این صنعت را به‌شدت تغییر داده است. این مقاله با هدف بررسی نقش تحول‌آفرین هوش مصنوعی در بهینه‌سازی فرایندهای تولید، توسعه محصولات نوآورانه، اجرای برنامه‌های نگهداری پیش‌بینانه، مدیریت زنجیره تأمین، ارتقای ایمنی عملیاتی و خودکارسازی تصمیم‌گیری‌های هوشمند نگاشته شده است. در این پژوهش، علاوه بر تبیین مبانی نظری، کاربرد این فناوری‌ها در شرکت‌های پیشرو بین‌المللی و شرکت‌های مشابه در صنعت پتروشیمی ایران مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین با رویکردی انتقادی، ابعاد فنی، چالش‌های اجرایی و تحلیل‌های اقتصادی از جمله میزان مقرون‌به‌صرفه‌بودن و بازگشت سرمایه در پیاده‌سازی این سامانه‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی، بررسی و ارزیابی شده است. علاوه بر این، تأثیر این فناوری‌ها بر کاهش نوسانات عملیاتی، افزایش طول عمر تجهیزات و کاهش خطاهای انسانی مورد واکاوی قرار گرفته است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که اگرچه پیاده‌سازی هوش مصنوعی نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجه در زیرساخت‌ها و نیروی انسانی متخصص است، اما کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش بهره‌وری در بلندمدت، آن را به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای رقابت‌پذیری در بازارهای جهانی تبدیل کرده است.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

parsamotaghi216@gmail.com



شکل ۱ ارزش بازار هوش مصنوعی در صنایع شیمیایی در سال‌های ۲۰۲۴-۲۰۳۴.

۱ مقدمه

صنعت پتروشیمی، به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین بخش‌های صنایع فرایندی در جهان، با حجم عظیمی از داده‌های تولیدشده در هر ثانیه مواجه است. این داده‌ها که از حسگرهای مختلف در واحدها، برج‌های تقطیر، واکنشگاه‌ها و سامانه‌های کنترل جریان استخراج می‌شوند، حاوی اطلاعات حیاتی برای مدیریت بهینه عملیات هستند. با این حال، روش‌های سنتی تحلیل داده‌ها و کنترل‌های مبتنی بر مدل‌های ریاضی کلاسیک، اغلب در مواجهه با تغییرات ناگهانی شرایط عملیاتی، پیچیدگی‌های غیرخطی فرایندها و نیاز به پیش‌بینی دقیق خرابی‌ها، با محدودیت‌هایی روبرو هستند. در سال‌های اخیر، تحول رقومی و ظهور هوش مصنوعی، مسیر جدیدی را پیش روی این صنعت گشوده است. برخلاف سامانه‌های کنترلی قدیمی که تنها بر پایه واکنش به تغییرات موجود کار می‌کردند، سامانه‌های مبتنی بر هوش مصنوعی با بهره‌گیری از یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، توانایی یادگیری از الگوهای گذشته و پیش‌بینی رویدادهای آینده را دارند. این فناوری تنها به معنای خودکار سازی ساده نیست، بلکه به معنای ارتقای سطح هوشمندی در تصمیم‌گیری‌های حساس عملیاتی است. و نیازمند به افزایش بازدهی انرژی، کاهش اثرات زیست‌محیطی، مدیریت هزینه‌های سنگین نگهداری تجهیزات و ارتقای سطح ایمنی در برابر حوادث ناگوار از جمله محرک‌های اصلی حرکت به سمت هوشمندسازی در پتروشیمی‌ها هستند. در دنیای رقابتی امروز، شرکت‌هایی که بتوانند از کلان داده‌ها برای پیش‌بینی تقاضای بازار، بهینه‌سازی زنجیره تأمین و کاهش مصرف منابع استفاده کنند، مزیت راهبردی قابل توجهی نسبت به رقبای خواهند داشت. این مقاله با هدف ارائه دیدگاهی جامع و علمی، به بررسی دقیق کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه‌های کلیدی صنعت پتروشیمی می‌پردازد. در این راستا، علاوه بر بررسی مبانی علمی، تلاش شده است تا با استفاده از مطالعات درمورد شرکت‌های پیشرو جهانی و بررسی وضعیت صنعت در ایران، ابعاد عملیاتی، چالش‌های اجرایی و همچنین جذابیت‌های اقتصادی این فناوری مورد واکاوی قرار گیرد. هدف نهایی این پژوهش، ارائه الگویی تحلیلی است که بتواند بین قابلیت‌های نظری هوش مصنوعی و واقعیت‌های اجرایی در واحدهای پتروشیمی، پیوند برقرار کند. در نمودار (۱) ارزش بازار هوش مصنوعی در صنایع شیمیایی در سال‌های ۲۰۲۴-۲۰۳۴ مشاهده می‌شود.

۱ بهینه‌سازی فرایندهای تولید

بهینه‌سازی فرایندها در صنعت پتروشیمی به معنای دستیابی به

بالاترین میزان بازدهی تولید با کمترین میزان مصرف مواد اولیه و انرژی است [۱]. در واحدهای فرایندی، متغیرهای متعددی از جمله دما، فشار، نرخ جریان و ترکیب شیمیایی مواد ورودی، بر کیفیت محصول نهایی و مصرف انرژی تأثیر مستقیم دارند [۲]. سامانه‌های سنتی کنترل فرایند اغلب با محدودیت‌هایی در مدیریت روابط غیرخطی و متداخل روبرو هستند [۳]. هوش مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل، می‌تواند الگوهای پیچیده میان این متغیرها را شناسایی کرده، تنظیمات بهینه را به‌صورت لحظه‌ای اعمال کند [۴]. این امر منجر به کاهش نوسانات عملیاتی و پایداری بیشتر فرایند می‌شود [۵]. شرکت اکسون موبیل از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین و تحلیل داده‌های عظیم در واحدهای تقطیر و اصلاح آن استفاده می‌کند. با به کارگیری این سامانه‌ها، اکسون موبیل توانسته است تنظیمات دقیق عوامل فرایندی را حتی در زمان تغییر در کیفیت خوراک در واحدهای پالایش و تقطیر حفظ کند. در این سامانه کاهش چشمگیر مصرف سوخت در کوره‌ها و افزایش دقت در کنترل کیفیت محصولات مشاهده می‌شود؛ هر چند نیاز بسیار بالا به زیرساخت‌های محاسباتی قدرتمند و چالش یکپارچه‌سازی داده‌های قدیمی با مدل‌های جدید دارد. از دیدگاه اقتصادی با توجه به مقیاس عظیم عملیات، هر درصد بهبود در بازدهی انرژی منجر به صرفه‌جویی میلیون دلاری در هزینه‌های سوخت می‌شود. اگرچه هزینه سرمایه‌ای برای زیرساخت‌های محاسباتی و مجوزهای نرم‌افزاری بسیار بالا است، اما نرخ بازگشت سرمایه به‌دلیل کاهش هزینه‌های عملیاتی انرژی بسیار سریع است. در ایران، شرکت پتروشیمی فراگیر ماهتاب (و واحدهای مشابه در مجتمع‌های دیگر پتروشیمی) تلاش‌هایی برای استفاده از سامانه‌های کنترل پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی به‌منظور کنترل کیفیت محصول انجام داده‌اند. این سامانه‌ها با تحلیل داده‌های حسگرها، از انحراف کیفیت محصول از محدوده استاندارد در واحد عملیاتی واحدهای تولید پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن جلوگیری می‌کند. پیاده‌سازی

خواص فیزیکی و شیمیایی مواد جدید پیش از انجام آزمایش‌های فیزیکی استفاده می‌کند. همچنین این روش کاهش زمان لازم برای چرخه تحقیق و توسعه و کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی را فراهم می‌کند. هر چند وابستگی شدیدی به کیفیت و حجم داده‌های آزمایشگاهی برای آموزش دقیق دارد. با توجه به این که توسعه محصولی جدید می‌تواند سال‌ها زمان ببرد، استفاده از هوش مصنوعی باعث کاهش هزینه‌های تحقیق و توسعه شده، با سریع‌تر وارد بازار شدن محصولات نوآورانه، سودآوری شرکت را به‌شدت افزایش می‌دهد؛ بنابراین، این سرمایه‌گذاری در بلندمدت بسیار مقرون‌به‌صرفه است. شرکت‌های تولیدکننده مواد افزودنی و کاتالیزورهای پتروشیمی ایران در برخی از واحدهای تحقیقاتی خود، از ابزارهای محاسباتی و مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی رفتار پلیمرهای اصلاح‌شده استفاده می‌کنند تا خواص آن‌ها (مانند مقاومت حرارتی) بهبود یابد و باعث کمک به توسعه محصولات با ارزش افزوده بالاتر و کاهش وابستگی به واردات مواد افزودنی خاص شود و کمک به کمبود نرم‌افزارهای تخصصی و محدودیت در دسترسی به پایگاه‌های داده جهانی برای مدل‌سازی‌ها شود. از نظر مقایسه و تحلیل تطبیقی هم‌سطح فناوری، شرکت‌های خارجی مانند آرامکو از هوش مصنوعی در سطح بنیادی‌ترین مراحل کشف مواد استفاده می‌کنند، درحالی‌که در شرکت‌های داخلی، تمرکز بیشتر بر بهبود و اصلاح محصولات موجود است و از نظر اقتصادی، مدل خارجی بر پایه کاهش هزینه‌های تحقیق و توسعه در مقیاس جهانی است، اما مدل داخلی بیشتر بر پایه کاهش وابستگی به واردات و جایگزینی محصولات داخلی با محصولات خارجی بنا شده است؛ همچنین چالش اصلی در نمونه خارجی، مدیریت پیچیدگی داده‌های مولکولی است، درحالی‌که در نمونه داخلی، چالش اصلی دسترسی به ابزارهای محاسباتی به‌روز و پایگاه‌های داده معتبر است.

۳ نگرانی و تعمیرات پیش‌بینانه

در صنایع پتروشیمی، توقف‌های ناگهانی تجهیزات به‌دلیل خرابی‌های غیرمنتظره می‌تواند منجر به خسارات مالی بسیار سنگین و خطرات ایمنی جدی شود [۱۱]. روش‌های سنتی نگرانی، عمدتاً بر دو پایه «نگرانی اصلاحی» و تعمیر پس از خرابی یا «نگرانی پیشگیرانه» (تعویض قطعات بر اساس زمان یا کارکرد مشخص) استوار هستند [۱۲]. این رویکردها اغلب یا منجر به توقف‌های غیرضروری می‌شوند یا نمی‌توانند از خرابی‌های لحظه‌ای جلوگیری کنند [۱۳]. هوش مصنوعی با استفاده از فنون پایش وضعیت و تحلیل داده‌های حاصل از

هوش مصنوعی در این واحد پتروشیمی باعث کاهش ضایعات تولید و محصولات خارج از استاندارد و پایداری بیشتر در کیفیت محصول نهایی شده است. ولی محدودیت‌هایی به‌منظور دسترسی به سخت‌افزارهای پیشرفته و نیاز به نیروی متخصص داخلی برای نگهداری و آموزش کادر وجود دارد؛ اما از نظر اقتصادی کاهش میزان محصولات خارج از استاندارد، مستقیماً به معنای کاهش ضرر مالی ناشی از بازفراوری یا فروش با قیمت پایین است این سرمایه‌گذاری برای واحدهای تولیدی ایران با توجه به محدودیت‌های اقتصادی، بسیار مقرون‌به‌صرفه است؛ زیرا هزینه‌های سرمایه‌ی کمتری نسبت به شرکت‌های خارجی دارد و بازگشت سرمایه از طریق کاهش ضایعات، سریع محقق می‌شود. از منظر مقایسه فنی، شرکت‌های خارجی به‌دلیل بهره‌گیری از زیرساخت‌های عظیم داده‌ای و مدل‌های پیچیده محاسباتی، در سطح بسیار بالاتری از خودکارسازی قرار دارد و تمرکز اصلی آن بر بهینه‌سازی انرژی است. در مقابل، شرکت‌های داخلی بیشتر بر جنبه‌های کنترل کیفیت و کاهش ضایعات تمرکز دارند. در حالی‌که شرکت‌های خارجی سرمایه‌گذاری‌های کلان را برای رسیدن به بازدهی انرژی انجام می‌دهند، صنایع داخلی با سرمایه‌گذاری‌های هدفمند و کوچک‌تر بر روی کاهش ضایعات، به‌دنبال سودآوری سریع‌تر هستند اما چالش اصلی در نمونه‌های داخلی، نبود زیرساخت‌های محاسباتی یکپارچه است، درحالی‌که در شرکت‌های خارجی، چالش اصلی مدیریت حجم عظیم و پراکنده داده‌هاست.

۲ شناسایی ترکیبات جدید و توسعه محصولات نوآورانه

در صنعت پتروشیمی، فرایند تحقیق و توسعه برای کشف مواد شیمیایی جدید و بهینه‌سازی ساختار مولکولی، نیازمند آزمایش‌های آزمایشگاهی متعدد و هزینه‌بر است [۶]. روش‌های سنتی مبتنی بر آزمون و خطا، نه‌تنها زمان بسیار زیادی را می‌طلبند، بلکه احتمال خطای انسانی و محدودیت در بررسی تمامی ترکیب‌های ممکن را نیز به همراه دارند [۷]. هوش مصنوعی با استفاده از روش‌های محاسباتی پیشرفته مانند یادگیری عمیق و شبیه‌سازی‌های مولکولی، می‌تواند فضای ترکیب‌های شیمیایی را جستجو کرده، ویژگی‌های مواد جدید را پیش‌بینی کند [۸]. این فناوری با ایجاد مدل‌های رابطه ساختار-ویژگی، سرعت کشف کاتالیزورهای جدید و پلیمرهای با خواص مکانیکی خاص را به‌شدت افزایش می‌دهد [۹]. همچنین، هوش مصنوعی می‌تواند با تحلیل داده‌های طیف‌سنجی و سوانگاری، فرایند شناسایی دقیق ترکیبات را در محصولات نیمه‌ساخته تسریع کند [۱۰]. شرکت آرامکو از مدل‌های یادگیری پیشرفته ماشین برای پیش‌بینی

هماهنگی دقیق میان تأمین کنندگان، واحدهای تولیدی و مشتریان نهایی است [۱۷]. نوسانات قیمت مواد اولیه، عدم قطعیت در تقاضای بازار و اختلالات احتمالی در مسیرهای حمل و نقل، همگی می‌توانند منجر به انباشت بیش از حد موجودی یا کمبود محصولات شوند [۱۸]. هوش مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های پیش‌بینی توالی‌های زمانی و تحلیل داده‌های کلان، می‌تواند تقاضای بازار را با دقت بسیار بالایی پیش‌بینی کند [۱۹]. همچنین، مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی و یادگیری تقویت‌شده می‌توانند مسیرهای بهینه حمل‌ونقل را تعیین کرده، سطح بهینه موجودی را در انبارها، با هدف کاهش هزینه‌های نگهداری، مدیریت کنند [۲۰]. این فناوری امکان هماهنگی لحظه‌ای میان تولید و تقاضا را فراهم می‌آورد [۲۰]. شرکت بی‌بی (BP) از سامانه‌های هوشمند برای مدیریت زنجیره تأمین جهانی و پیش‌بینی دقیق میزان تقاضا در بازارهای مختلف استفاده می‌کند. ازدیدگاه اقتصادی با مدیریت بهینه موجودی، شرکت می‌تواند هزینه‌های سرمایه‌ای مربوط به فضای انبارداری را کاهش داده، هزینه‌های عملیاتی مربوط به حمل‌ونقل اضطراری را به حداقل برساند. این امر منجر به بهبود جریان نقدی و افزایش نرخ بازگشت سرمایه در بخش زنجیره تأمین می‌شود. در برخی از شرکت‌های بزرگ پتروشیمی و بخش محصولات پلیمری ایران تلاش‌هایی برای استفاده از سامانه‌های مدیریت موجودی و برنامه‌ریزی تولید بر اساس پیش‌بینی از داده‌های فروش، انبارداری و برنامه‌ریزی تولید صورت گرفته است و از محاسن این روش می‌توان به کاهش محصولات انبارشده و تلاش برای هماهنگی بهتر بین برنامه تولید و نیازهای بازار داخلی اشاره کرد و از معایب آن می‌توان به عدم یکپارچگی داده‌ای بخش‌های مختلف (فروش، تولید و انبار) و استفاده از روش‌های سنتی در بخش حمل و نقل اشاره کرد. این کار به‌طور مستقیم سودآوری را از طریق کاهش هزینه‌های نگهداری و مدیریت بهتر جریان کالا بهبود می‌بخشد. از نظر سطح بلوغ فناوری، شرکت‌های خارجی مانند بی‌بی پی از سامانه‌های خودکار و یکپارچه برای مدیریت جهانی استفاده می‌کنند که در آن تصمیمات به صورت خودکار بر اساس داده‌ها اتخاذ می‌شود. در مقابل، شرکت‌های داخلی بیشتر در سطح سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری (که به انسان کمک می‌کنند) فعالیت می‌کنند. از نظر اقتصادی، تمرکز شرکت‌های خارجی بر بهینه‌سازی هزینه‌های تدارکاتی جهانی و مدیریت نوسانات قیمت است، اما در شرکت‌های داخلی، هدف اصلی کاهش هزینه‌های انبارداری و جلوگیری از انباشت محصولات فاقد تقاضا است. چالش اصلی در شرکت‌های خارجی، مدیریت داده‌های پراکنده در سطح جهانی است، در

حسگرهای ارتعاش، دما، فشار و جریان، می‌تواند الگوهای نشانگر خرابی را شناسایی کند [۱۴]. الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادرند با تحلیل روند تغییرات عوامل عملیاتی، زمان دقیق وقوع خرابی را پیش‌بینی کنند [۱۵].

این امر امکان انتقال از راهبرد نگهداری زمان‌بندی‌شده به سمت نگهداری مبتنی بر وضعیت را فراهم می‌آورد [۱۶]. واحد تعمیرات و نگهداری شرکت آرامکو از فناوری دوقلوی رقومی و مدل‌های یادگیری عمیق برای پایش مداوم تجهیزات حساس نظیر کمپرسورها و توربین‌های عظیم استفاده می‌کند. هوش مصنوعی سبب شناسایی زود هنگام علائم فرسایش و جلوگیری از توقف‌های ناگهانی در خطوط تولید اصلی می‌شود. با توجه به هزینه بسیار بالای توقف هر واحد تولیدی در آرامکو، استفاده از این سامانه‌ها منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌های عملیاتی می‌شود؛ اگرچه هزینه‌های سرمایه‌ای برای نصب حسگرهای پیشرفته و زیرساخت‌های رقومی بالاست، اما جلوگیری از حتی یک توقف غیرمنتظره در سال، نرخ بازگشت سرمایه را بالا می‌برد. در واحدهای نیروگاهی و پتروشیمی‌های بزرگ کشور مانند مجتمع‌های اتیلن از سامانه‌های پایش ارتعاش و دمای تجهیزات برای نظارت بر وضعیت موتورها و پمپ‌های اصلی استفاده می‌شود. بدیهی است افزایش طول عمر قطعات و پیش‌بینی زمان مناسب برای تعمیرات دوره‌ای برای جلوگیری از توقف ناگهانی باعث جلوگیری از هدررفت منابع می‌شود. این رویکرد باعث بهبود سودآوری بلندمدت از طریق مدیریت بهینه هزینه‌های تعمیرات و کاهش ضررهای ناشی از توقف تولید می‌شود. در مقایسه از نظر سطح فناوری، شرکت آرامکو در مرحله استفاده از «دوقلوی رقومی» قرار دارد که بالاترین سطح شبیه‌سازی است، درحالی‌که شرکت‌های داخلی بیشتر در سطح «پایش وضعیت» فعالیت می‌کنند. از نظر اقتصادی، تمرکز شرکت‌های خارجی بر مدیریت مخاطرات در مقیاس کلان و کاهش هزینه‌های عملیاتی است. در حالی که در شرکت‌های داخلی، هدف اصلی مدیریت بهتر، کاهش هزینه‌های مربوط به قطعات یدکی و افزایش طول عمر تجهیزات موجود در شرایط دشوار است. به نظر می‌رسد چالش اصلی در شرکت‌های خارجی، دقت مدل‌های شبیه‌سازی بوده درحالی‌که چالش اصلی در شرکت‌های داخلی دسترسی به تجهیزات پایش هوشمند و توان تحلیل داده‌هاست.

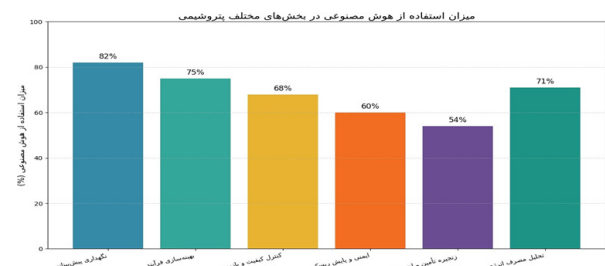
۴ مدیریت زنجیره تأمین

مدیریت زنجیره تأمین در صنایع پتروشیمی به دلیل ماهیت پیچیده مواد اولیه، محصولات واسطه و توزیع گسترده، نیازمند

پایداری سودآوری شرکت را تضمین می‌کند. در برخی از واحدهای پتروشیمی بزرگ کشور، تلاش‌هایی برای به‌کارگیری سامانه‌های پایش هوشمند برای نظارت بر تجهیزات ایمنی و شناسایی نشت‌های احتمالی در خطوط لوله صورت گرفته است. از دیدگاه اقتصادی با توجه به اهمیت حفظ سلامت نیروی کار و جلوگیری از توقف‌های ناشی از حوادث، این سرمایه‌گذاری بسیار ارزشمند است و منجر به کاهش هزینه‌های مربوط و توقف‌های ناخواسته تولید می‌شود که مستقیماً به بهبود سودآوری کمک می‌کند؛ در مقایسه از نظر سطح فناوری، شرکت ادنوک از رویکرد «پیش‌بینانه و خودکار» استفاده می‌کند که در آن سامانه‌ها به‌طور فعال به دنبال کشف مخاطره هستند، درحالی‌که شرکت‌های داخلی، تمرکز بیشتر بر «پایش و واکنش» است. به عبارتی الگوی خارجی بر پایه مدیریت مخاطرات در سطح راهبردی و جلوگیری از بحران‌های عظیم استوار است؛ درحالی‌که شرکت‌های داخلی بر پایه کاهش هزینه‌های ناشی از حوادث کوچک و بهبود شرایط محیط کار استوار است. چالش اصلی در شرکت‌های خارجی، مدیریت امنیت داده‌ها و زیرساخت‌های عظیم رقومی است، درحالی‌که در شرکت‌های داخلی، چالش اصلی پوشش‌دهی کامل مناطق عملیاتی با تجهیزات هوشمند و یکپارچه‌سازی آن‌هاست.

۶ خودکارسازی فرایندها و مدیریت هوشمند واحدهای تولیدی

خودکارسازی در صنایع پتروشیمی از سامانه‌های کنترلی ساده به سمت سامانه‌های تصمیم‌گیر هوشمند در حال حرکت است [۲۷]. در روش‌های سنتی، کنترل‌کننده‌ها بر اساس متغیرهای مشخص و از پیش تعیین‌شده عمل می‌کنند، اما در مواجهه با تغییرات پیچیده در ترکیب مواد اولیه یا شرایط محیطی، ممکن است پاسخ‌های بهینه ارائه ندهند [۲۸]. هوش مصنوعی با پیاده‌سازی کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل و یادگیری تقویت شده، امکان مدیریت هم‌زمان و هوشمند متغیرهای متعدد را فراهم می‌آورد [۲۹]. این فناوری می‌تواند تنظیمات دقیق تجهیزات، مانند نرخ جریان، فشار و دما را به گونه‌ای انجام دهد که فرایند در نقطه بهینه عملیاتی باقی بماند [۳۰]. علاوه بر این، خودکارسازی هوشمند باعث کاهش خطاهای انسانی ناشی از خستگی یا تصمیمات نادرست در شرایط بحرانی شده، پایداری تولید را به‌شدت افزایش می‌دهد، شرکت شل در حال پیاده‌سازی سامانه‌های کنترل خودکار پیشرفته در واحدهای پالایشی و پتروشیمی خود است که با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق عمل می‌کند که منجر به دستیابی پایداری



شکل ۲ میزان استفاده از هوش مصنوعی در بخش‌های مختلف پتروشیمی.

حالی که در شرکت‌های داخلی، چالش اصلی نبود سامانه‌های یکپارچه برای تبادل داده میان بخش‌های مختلف شرکت است. شکل ۲ کاربرد هوش مصنوعی در بخش‌های مختلف صنعت پتروشیمی را نشان می‌دهد.

۵ ارتقای ایمنی و مدیریت ریسک عملیاتی

ایمنی در صنایع پتروشیمی به‌دلیل ماهیت پرخطر فرایندها، شامل کار با مواد شیمیایی سمی، دماهای بسیار بالا و فشارهای شدید، نیازمند بالاترین استانداردهای نظارتی است [۲۲]. روش‌های سنتی ایمنی، عمدتاً بر پایه پروتکل‌های ثابت، پایش‌های دوره‌ای و واکنش به حوادث استوار هستند که در مواجهه با تغییرات ناگهانی فرایند، ممکن است با تأخیر روبرو شوند [۲۳]. هوش مصنوعی با استفاده از سامانه‌های بینایی ماشین و حسگرهای هوشمند، می‌تواند محیط‌های عملیاتی را به‌صورت لحظه‌ای پایش کرده، هرگونه انحراف از شرایط ایمن را شناسایی کند [۲۴]. الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادرند با تحلیل داده‌های تاریخی حوادث و گزارش‌های نقص فنی، مخاطرات بالقوه را پیش‌بینی کرده و قبل از وقوع حادثه، هشدارهای پیشگیرانه صادر کنند [۲۵]. هم‌چنین، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی پیشرفته به مدیریت بحران و بررسی اثرات احتمالی نشت مواد یا انفجار در محیط‌های مجازی کمک می‌کند [۲۶]. شرکت ادنوک از مراکز داده هوشمند و سامانه‌های پایش لحظه‌ای برای مدیریت مخاطرات در تمامی مکان‌های عملیاتی خود در مرکز کنترل ایمنی و مدیریت بحران استفاده می‌کند. در این زمینه می‌توان به شناسایی سریع نشت گازها یا حرارت‌های غیرعادی از طریق دوربین‌های هوشمند و تحلیل خودکار تصاویر و کاهش زمان واکنش به حوادث اشاره کرد.

اگر چه هزینه‌های سرمایه‌ای برای استقرار این زیر ساخت‌های امنیتی سنگین است، اما جلوگیری از حادثه بزرگ می‌تواند از خسارات مالی فوق‌العاده سنگین، جریمه‌های قانونی و ازدست‌رفتن اعتبار برند جلوگیری کند. این امر در بلندمدت،

جدول ۱ تاثیر پیاده‌سازی هوش مصنوعی در برخی شرکت‌های پتروشیمی خارجی.

نام شرکت	تغییرات پس از پیاده‌سازی هوش مصنوعی
شرکت اکسون	واحد تقطیر (حفظ کیفیت خوراک)
شرکت آرامکو	واحد توسعه کاتالیزور (پیش‌بینی خواص فیزیکی و شیمیایی مواد جدید)
شرکت بی بی	واحد مدیریت انبار (کاهش سطح موجودی انبار بدون ایجاد مخاطره کمبود محصول)
شرکت اندوک	واحد ایمنی و مدیریت بحران (شناسایی سریع نشت گازها)
شرکت شل	واحد فرایند (دستیابی به پایداری فرایند در بالاترین سطح ممکن و کاهش نوسانات در خروجی محصولات)

کیفیت محصول متمرکز هستند. چالش اصلی در شرکت‌های خارجی، مدیریت پیچیدگی‌های محاسباتی و امنیت سامانه‌های مستقل است و چالش اصلی در شرکت‌های داخلی ارتقای زیرساخت‌های سخت‌افزاری و دسترسی به ابزارهای نرم‌افزاری روز دنیاست.

نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی فرایندهای تولید یکی از مهم‌ترین حوزه‌های اثرگذاری هوش مصنوعی در صنعت پتروشیمی است که در این حوزه هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های عملیاتی و تنظیم دقیق متغیرهای فرایندی مانند دما، فشار و ترکیب خوراک، باعث افزایش بازده، کاهش مصرف انرژی، کاهش ضایعات و بهبود کیفیت محصول می‌شود. از آنجا که تولید، محور اصلی فعالیت پتروشیمی است، هرگونه بهبود در این بخش بیشترین اثر اقتصادی و عملیاتی را به همراه دارد.

نگه‌داری تجهیزات و پیش‌بینی خرابی‌ها دومین نتیجه مهم این بررسی است. با استفاده از داده‌ی حسگرها، سوابق تعمیرات و الگوریتم‌های پیش‌بینی، می‌توان خرابی تجهیزات را پیش از وقوع شناسایی کرد و از توقف ناگهانی خطوط تولید، افزایش هزینه‌های تعمیرات و کاهش عمر تجهیزات جلوگیری کرد. این موضوع در صنعتی که به تجهیزات پیچیده و سرمایه‌بر وابسته است، اهمیت بسیار زیادی دارد.

افزایش ایمنی و کاهش خطرات مربوط یکی از مهم‌ترین مزایای پیاده‌سازی هوش مصنوعی است؛ به‌طوری‌که هوش مصنوعی می‌تواند با پایش مستمر شرایط عملیاتی، تشخیص نشت،

فرایند در بالاترین سطح ممکن، کاهش نوسانات در خروجی محصولات و کاهش نیاز به مداخلات دستی کاربرها می‌شود. اگر بخواهیم اقتصادی فکر کنیم خودکارسازی پیشرفته منجر به افزایش بازدهی کلی واحدها می‌شود. با ثابت نگه‌داشتن فرایند در شرایط بهینه، مصرف انرژی کاهش یافته و کیفیت محصول افزایش می‌یابد که این امر مستقیماً هزینه‌های عملیاتی را کاهش و سود حاصل از فروش محصولات با کیفیت بالاتر را افزایش می‌دهد. در برخی از واحدهای پتروشیمی بزرگ کشور، استفاده از سامانه‌های کنترل توزیع شده با قابلیت‌های هوشمند برای مدیریت خودکار برخی از بخش‌های فرایندی در حال توسعه است. در بخش کنترل فرایند و مهندسی فرایند بهبود دقت در کنترل متغیرهای اصلی و تلاش برای کاهش وابستگی به تصمیمات لحظه‌ای و دستی کاربر در فرایندهای تکرارپذیر است؛ اما محدودیت در دسترسی به برخی از نرم‌افزارهای پیشرفته بین‌المللی و چالش در ارتقای سخت‌افزارهای قدیمی به سطحی که قابلیت پردازش داده‌های هوشمند را داشته باشند، وجود دارد.

از نظر سطح خودکارسازی، شرکت شل به سمت «خودکارسازی هوشمند و خود مختار» حرکت کرده که در آن سامانه می‌تواند تصمیمات پیچیده را با کمترین دخالت انسان اتخاذ کند؛ درحالی‌که در شرکت‌های داخلی، تمرکز اصلی بر «خودکارسازی تقویت‌شده» است که در آن فناوری صرفاً دقت تصمیمات انسانی را بالا می‌برد. بنابراین، شرکت‌های خارجی بر افزایش بهره‌وری کل سامانه و کاهش هزینه‌های انرژی تمرکز دارند، در حالی که شرکت‌های داخلی، بر کاهش ضایعات تولید و پایداری

شناسایی موقعیت‌های پرخطر و هشداردهی سریع، احتمال وقوع حادثه را کاهش دهد. با توجه به ماهیت حساس و پر مخاطره صنعت پتروشیمی، این کاربرد نقش مهمی در حفاظت از نیروی انسانی، تجهیزات و محیط زیست دارد. بهینه سازی زنجیره تأمین مواد اولیه و مدیریت توزیع نیز از نتایج مهم استفاده از هوش مصنوعی است. این فناوری از طریق پیش بینی تقاضا، کنترل موجودی، بهینه‌سازی سفارش‌گذاری و بهبود برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، موجب کاهش هزینه‌ها، جلوگیری از کمبود یا مازاد مواد و افزایش هماهنگی در جریان تأمین و توزیع می‌شود. خودکارسازی عملیات و تصمیم‌گیری هوشمند یکی دیگر از نتایج قابل‌توجه این بررسی است. هوش مصنوعی می‌تواند بخشی از تصمیم‌های عملیاتی و مدیریتی را سریع‌تر و دقیق‌تر از روش‌های سنتی انجام دهد و با کاهش وابستگی به مداخله مستقیم انسانی، سرعت واکنش

و کیفیت تصمیم‌گیری را افزایش دهد. این موضوع به‌ویژه در محیط‌های پیچیده و داده محور اهمیت دارد. یکی دیگر از مزایای پیاده‌سازی هوش مصنوعی، شناسایی ترکیبات جدید و توسعه محصولات است. اگرچه این حوزه از نظر راهبردی بسیار ارزشمند است، اما در مقایسه با حوزه‌های عملیاتی و تولیدی، اثر آن بیشتر در میان‌مدت و بلندمدت نمایان می‌شود. هوش مصنوعی در این بخش می‌تواند با تحلیل داده‌های پژوهشی، شبیه‌سازی رفتار مواد و تسریع فرایند تحقیق و توسعه، زمینه تولید محصولات جدید و رقابت‌پذیرتر را فراهم کند. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که هوش مصنوعی در صنعت پتروشیمی بیش از همه در بهبود عملکرد عملیاتی، کاهش هزینه‌ها و افزایش ایمنی اثرگذار است و سپس در حوزه‌های مدیریتی و نوآورانه نقش‌آفرینی می‌کند.

مراجع

1. Albert J., Plastics and the Environment: A Comprehensive Overview, *Springer Publishing*, 45-60, **2019**.
2. Hopewell J., R. Dvorak, & E. Kosior, Plastics Recycling: Challenges and opportunities, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2115-212, **2009**.
3. Mohsen Z., Nasrullah, Recycling of Plastics: An Overview, *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 15, **2017**.
4. Andrady A. L., Plastics and the Environment, *Wiley Publishing*, P. 112-130, **2015**.
5. United Nations Environment Program, Global Trends in Plastics Recycling and Waste Management, Official Report, 10-25, **2021**.
6. Hiemenz P. C., & Lodge T. P., Polymer Science and Technology, *API Publications*, 88, **2018**.
7. William Lee, Introduction to Plastics Engineering, *Academic Press*, 210, **2016**.
8. Brydson J. A., Plastics Materials, *Scientific Press*, 55, **2014**.
9. Society of Plastics Engineers (SPE), Specialized Publications in Polymer Engineering, *SPE Annual Yearbook*, 300, **2020**.
10. Multiple Researchers, Biodegradable Plastics: Standards, Policies, and Impacts, *Journal of Environmental Sustainability* 45-50, **2022**.
11. American Chemistry Council, Polyethylene (HDPE) Recycling, *Technical Report*, 12, **2011**.
12. European Association of Plastic Recycling and Recovery Organisation (EPRO), Recycling of HDPE Bottles, *Annual Report*, 34, **2019**.
13. Mat Web, Physical Properties of Polymers, Online Database, **2023**.
14. Morton S., Smart Supply Chain Management in Process Industries, *Journal of Supply Chain Management*, 88-95, **2021**.
15. Kurzen R., Demand Forecasting Algorithms in Petrochemical Industries, *Journal of Industrial Computing*, 112, **2022**.
16. Li et al., Optimization of Logistics and Transportation for Polymeric Products, *Journal of Intelligent Transportation*, 40, **2020**.
17. Sanders D., Supply Chain Management in Major Energy Corporations (BP Case Study), *Journal of Industrial Strategy*, 150, **2018**.
18. Market Analysis Report, Distribution Systems of Polymeric Products in the Iranian Market, *Market Analysis Report*, 22, **2023**.
19. Williams K., Machine Learning Applications in Raw Material Demand Forecasting, *Journal of Digital Economy*, 77, **2021**.
20. Garcia M., Optimization of Distribution Routes for Petrochemical Products, *Journal of Global Logistics*, 90, **2019**.
21. Chen H., Data Integration in Supply Chain Management via Artificial Intelligence, *Journal of Information Management*, 130, **2022**.
22. Peterson J., Computer Vision in Environmental Safety Monitoring for Heavy Industries, *Journal of Industrial Safety*, 55, **2021**.
23. Fischer L., Smart Sensors for Risk Management in Petrochemical Units, *Journal of Safety Technology*, 88, **2020**.
24. ADNOC Research Group, Utilizing AI in Reducing Operational Accidents, *ADNOC Safety Report*, 10-15, **2022**.
25. M. Ahmed, Real-time Process Monitoring via Internet of Things (IoT), *Journal of Process Control*, 45, **2023**.
26. Case Study, Risk Management in Large-scale Petrochemical Operational Units in Iran, Risk Analysis Report, 30, **2021**.
27. Taller R., Transition from Classical to Model Predictive Control (MPC), *Journal of Intelligent Control*, 200, **2019**.
28. Shell Technology Report, Autonomous Automation in Smart Refineries, *Shell Technology Report*, 50, **2022**.
29. Gupta V., Intelligent Model Predictive Control in Non-linear Petrochemical Processes, *Journal of Chemical Engineering*, 112, **2021**.
30. Technical Research, Status of Automation in Leading Petrochemical Units in Iran, *Technology Development Report*, 15, **2023**.