

بررسی نقش هوش مصنوعی در تصمیم‌گیری مبتنی بر اقتصاد چرخشی (CE) در زنجیره تامین پایدار (مطالعه موردی: صنایع پتروشیمی منطقه پارس جنوبی)

علیرضا منصوری^۱، رحیم یعقوب زاده^۲

^۱ استادیار گروه مدیریت صنعتی، واحد لامرد، دانشگاه آزاد اسلامی، لامرد، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی، واحد لامرد، دانشگاه آزاد اسلامی، لامرد، ایران

چکیده

مقدمه و هدف: با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی و فشارهای اقتصادی سال‌های اخیر در صنعت پتروشیمی، گذار از مدل‌های اقتصادی خطی به اقتصاد چرخشی (CE) به یک ضرورت استراتژیک تبدیل شده است از سوی دیگر، با پیشرفت تکنولوژی و کارایی آن در صنعت، هم‌گرایی فناوری‌های هوش مصنوعی (AI) با اصول اقتصاد چرخشی، مسیر تازه‌ای را برای دستیابی به زنجیره‌های تأمین پایدار باز نموده است. با توجه به شکاف پژوهشی و خلأ مطالعاتی در خصوص نحوه تعامل این فناوری‌ها در فرآیند تصمیم‌گیری مدیران برای مدیریت چرخه حیات محصولات پتروشیمی و کنترل مخاطرات زیست‌محیطی، پژوهش حاضر درصدد بررسی نقش هوش مصنوعی در بهبود و تسهیل تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر اقتصاد چرخشی در زنجیره تأمین پایدار صنعت پتروشیمی می‌باشد.

روش کار: این مطالعه با رویکرد «کمی» به روش پیمایشی است، ابزار اندازه‌گیری پژوهش پرسشنامه محقق ساخته‌ای بود که روایی آن به روش روایی صوری و محتوایی سنجیده شده و در میان جامعه آماری پژوهش که متشکل از مدیران، کارشناسان خبره و تکنسین‌های تحصیل‌کرده (نخبگان متخصص در حوزه صنعت و فناوری) شاغل در بخش‌های مختلف صنایع پتروشیمی پارس پخش گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار SPSS_26 و استفاده از آزمون‌های ضریب همبستگی پیرسون و رگرسیون چندگانه انجام پذیرفت.

یافته‌ها: نتایج تحلیل همبستگی پیرسون نشان داد که بین توانمندی‌های هوش مصنوعی و تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر اقتصاد چرخشی رابطه مثبت و معناداری وجود دارد ($t = 0.074$; $P < 0.01$). نتایج تحلیل رگرسیون چندگانه حاکی از آن بود که مدل پژوهش توانایی تبیین ۵۵ درصد از تغییرات در تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر اقتصاد چرخشی را دارا می‌باشد ($R^2 = 0.55$). مقایسه ضرایب استاندارد شده (β)، نشان داد که «تحلیل پیش‌بینانه» با بالاترین ضریب ($\beta = 0.46$) بیشترین نقش را در تسهیل تصمیمات مربوط به «کاهش شدت کربن و مدیریت ضایعات» ایفا می‌کند.

نتیجه‌گیری: بر اساس یافته‌های پژوهش، با ارتقای سطح به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند، تمایل مدیران به اتخاذ تصمیمات همسو با اصول اقتصاد چرخشی (از جمله: کاهش شدت اثرات کربن، بازگشت مواد و بهینه‌سازی منابع) در زنجیره تأمین پتروشیمی به‌طور معناداری افزایش می‌یابد، چرا که هوش مصنوعی به عنوان یک «توانمندساز کلیدی» می‌تواند با ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، پلی میان فناوری و اصول اقتصاد چرخشی در صنعت پتروشیمی ایجاد نماید.

کلیدواژه‌ها: هوش مصنوعی، اقتصاد چرخشی، زنجیره تأمین پایدار، بهبود تصمیم‌گیری، صنعت پتروشیمی

۱. مقدمه

در بافتار جهانی کنونی که با تخریب محیط زیست و محدودیت منابع مواجه هستیم، تلاش برای دستیابی به توسعه پایدار به یک ضرورت حیاتی تبدیل شده است. یکی از مسیرهایی که نویدبخش دستیابی به این هدف است، به کارگیری فناوری‌های دیجیتال می‌باشد؛ فناوری‌هایی که پتانسیل گسستن پیوند میان رشد اقتصادی و ردپای کربن (کاهش وابستگی رشد اقتصادی به آلاینده‌ها) را دارند. با این حال، بسیار حیاتی است که اطمینان حاصل شود این فناوری‌ها به شیوه‌ای هوشمندانه و با همسویی کامل با اولویت‌های زیست‌محیطی طراحی و مدیریت می‌شوند. در این راستا مطالعات سال‌های اخیر بر بررسی نقش‌های بالقوه هوش مصنوعی در هماهنگی زنجیره تأمین و کاهش اثرات مخرب تمرکز دارد. علاوه بر این، این فناوری‌ها ظرفیت ایجاد انگیزه برای بازیافت و مدل‌های کسب‌وکار چرخشی (مدل‌های اقتصادی مدور)، و همچنین تسهیل حسابداری کربن و جبران اثرات کربنی را دارا هستند. برای تحقق کامل این مزایا، استقرار این فناوری‌ها در قالب چارچوب‌های همکاری فراگیر که ملاحظات اجتماعی و اکولوژیک را در نظر می‌گیرند، ضروری است. نتایج بررسی محققان، توصیه‌های سیاستی ارائه می‌دهد که نقاط اهرمی کلیدی برای نوآوری دیجیتال را برجسته کرده و کشورها را قادر می‌سازد تا مسیرهای تحول صنعتی هوشمند و سبز را آغاز کنند. دولت‌ها می‌توانند با بهره‌گیری از پتانسیل بلاک‌چین و هوش مصنوعی در زنجیره‌های تأمین، شفافیت، قابلیت ردیابی و پاسخگویی را ارتقا بخشیده و از این طریق، شیوه‌های پایدار را ترویج و اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهند. تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که ادغام فناوری‌های بلاک‌چین و هوش مصنوعی در رویکردهای زنجیره تأمین منجر به بهبود قابل توجه کارایی می‌شود. در نتیجه، تلفیق فناوری‌های دیجیتال نوآورانه، فرصت‌های قابل توجهی را برای بهینه‌سازی سیستم‌های تولید و فعالیت‌های اقتصادی، ضمن اولویت‌بندی اهداف پایداری برای بهبود وضعیت جامعه و محیط زیست، فراهم می‌کند. این فناوری‌ها پتانسیل کاهش پیامدهای خارجی (Externalities) زیست‌محیطی را از طریق رفع عدم تعادل اطلاعاتی در زنجیره‌های تأمین جهانی دارند (هونگ و ژائو^۱، ۲۰۲۴). در حوزه مدیریت، هوش مصنوعی از الگوریتم‌ها و سیستم‌هایی برای یادگیری از داده‌ها، تفسیر چارچوب‌های پیچیده و ارائه پیش‌بینی‌ها یا توصیه‌هایی برای پشتیبانی از تصمیمات مدیریتی و افزایش عملکرد تجاری استفاده می‌کند (بیسون و مک‌آفی^۲، ۲۰۱۷). این امر آن را به یک پیشرفت فناوری قابل توجه تبدیل می‌کند که قادر به افزودن ارزش و ارائه مزیت رقابتی به شرکت‌هایی است که آن را اتخاذ می‌کنند (برینجولفسون و مک‌آفی^۳، ۲۰۱۷؛ بروک و فون وانگنهایم^۴، ۲۰۱۹). هوش مصنوعی فرآیندهای تصمیم‌گیری را با استدلال شبه انسانی خودکار می‌کند و توجه بخش‌های مختلف را به خود جلب می‌کند. همان‌گونه که اولیری^۵ (۲۰۱۳) نشان داده است، بینش‌های ارزشمندی از مجموعه داده‌های پیچیده ارائه می‌دهد و فرآیندهای تصمیم‌گیری را برای مدیران و کارآفرینان تسهیل می‌کند. هوش مصنوعی در صورت پیاده‌سازی صحیح، می‌تواند تصمیم‌گیری در کسب و کار را بهبود بخشد، سیستم‌های یکپارچه ایجاد کند و مکانیسم‌های پیچیده را از طریق اتوماسیون پیشرفته ساده کند (مهیر و همکاران^۶، ۲۰۲۰؛ رایش و کراکوفسکی^۷، ۲۰۲۱). به گفته کاپلان و هانلین^۱ (۲۰۱۹)، هوش مصنوعی توانایی یک سیستم برای تفسیر صحیح داده‌ها،

¹ Hong & Xiao

² Bson & McAfee

³ Brynjolfsson & McAfee

⁴ Brock & Von Wangenheim

⁵ O'Leary

⁶ Meyer et al.

⁷ Raisch & Krakowski

یادگیری از آن و استفاده از این دانش برای دستیابی به اهداف خاص از طریق سازگاری انعطاف‌پذیر است. با این حال، اصطلاح «هوش مصنوعی» گسترده است و شامل فناوری‌های پیشرفته مختلفی مانند یادگیری ماشینی، رباتیک، وسایل نقلیه خودران، بینایی کامپیوتر، پردازش زبان، عوامل مجازی و شبکه‌های عصبی می‌شود (فورمن و زیمنس^۲، ۲۰۱۹). برخلاف برنامه‌های کامپیوتری سنتی، سیستم‌های هوش مصنوعی می‌توانند از تجربه یاد بگیرند و بهبود یابند (هانت^۳، ۲۰۱۴)، و وظایفی را که نیاز به تلاش قابل توجه انسان دارند، خودکار کنند. پیشرفت‌های اخیر ماشین‌ها را قادر می‌سازد تا مجموعه‌های بزرگی از داده‌های بدون ساختار را با استفاده از الگوریتم‌های پیچیده برای انجام وظایفی که معمولاً به هوش انسانی نیاز دارند، پردازش کنند (داس و همکاران^۴، ۲۰۲۳). اگرچه ادبیات موجود به طور گسترده‌ای به نقش فناوری‌های نسل چهارم صنعت در حمایت از اقتصاد چرخشی پرداخته است، اما پژوهش‌های متمرکز بر تقاطع دقیق هوش مصنوعی و اصول چرخشی همچنان در حال تکامل هستند و ادبیات پژوهشی در حوزه هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی، علی‌رغم رشد قابل توجه، همچنان دارای چندین شکاف مهم است. (پرکوکو و همکاران^۵، ۲۰۲۶)؛

علی‌رغم افزایش سطح تحقیقات و توجه به هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی، در حال حاضر آشنایی کافی با این موضوع برای اکثر ذی‌نفعان آن وجود ندارد تا به درک درستی از مزایای کلی آن برسند. نوآوری در این مطالعه، ناشی از در نظر گرفتن زنجیره تامین پایدار صنایع پتروشیمی در مورد نقش و تأثیری که استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند بر تصمیم‌گیری‌هایی که مبتنی بر اقتصاد چرخشی باشند و ارائه رهنمودهایی جهت پیاده‌سازی و ادغام هوش مصنوعی در فرآیندهای اقتصاد چرخشی در آینده این صنعت است. این مطالعه از اهمیت و ارتباط ویژه‌ای برای شرکت‌های زیرمجموعه صنعت پتروشیمی که تشکیل دهنده یک زنجیره تامین پایدار هستند، برخوردار است، چرا که این صنایع جهت بهبود عملکرد و رفع مخاطرات زیست محیطی می‌بایست هر چه سریع‌تر به سمت ادغام هوش مصنوعی در فرآیندهای اقتصاد چرخشی گام بردارند.

۲. ادبیات پژوهش:

۲-۱. مفهوم اقتصاد چرخشی

محیط‌زیست، مواد، آب و انرژی را به‌عنوان نهاده‌های فرآیند تولید فراهم می‌کند. سپس این منابع به محصولات و خدمات مصرفی تبدیل شده و در نهایت پسماند تولید می‌شود. اگر میزان تولید پسماند از ظرفیت جذب سیستم فراتر رود، توانایی محیط‌زیست برای تأمین منابع مختل شده که این امر به کاهش منابع منجر می‌گردد. اقتصاد چرخشی یک سیستم بسته است. در این سیستم بسته، محیط‌زیست بخشی از کل سیستم محسوب می‌شود و استخراج منابع بر پایه کارایی انجام می‌گیرد. در این اقتصاد، پسماند از طریق بازیافت، به‌عنوان منبعی برای مواد جدید تلقی می‌شود (مک‌دانا و براونگارت^۶، ۲۰۱۳).

«بولدینگ^۷» برای نخستین بار مفهوم اقتصاد چرخشی را در سال ۱۹۶۶ در مقاله خود تحت عنوان «اقتصاد زمین در آینده^۱» معرفی کرد. سپس در سال ۱۹۸۹، پیرس و ترنر^۲ (۱۹۸۹) این مفهوم را تحت عنوان اقتصاد محیط‌زیست در کتاب «اقتصاد

¹ Kaplan & Haenlein

² Furman & Seamans

³ Hunt

⁴ Das et al.

⁵ Percuoco et al.

⁶ McDonough and Braungart

⁷ Boulding

منابع طبیعی و محیط زیست^۳ بسط دادند. کاربردهای عملی آن در سیستم‌های اقتصادی، تحت تأثیر مفاهیمی نظیر اکولوژی صنعتی، تولید پاک و ایده «گهواره به گهواره^۴» شکل گرفته است که همگی بر تشکیل یک حلقه بسته توافق دارند. اقتصاد چرخشی باعث ارتقای مزیت رقابتی، رشد اقتصادی پایدار و اشتغال‌زایی می‌شود (اتحادیه اروپا، ۲۰۱۵). این اقتصاد به‌عنوان سیستمی برای بازیابی منابع در نظر گرفته می‌شود. اقتصاد چرخشی با ترویج عملکرد پایدار منابع، کاهش آلودگی محیط‌زیستی و هزینه‌ها، و بهبود بازیافت پسماند، کارایی اقتصادی سیستم را ارتقا می‌دهد (گرافستروم و آسما، ۲۰۲۱). در یک دهه اخیر، اقبال عمومی این صورت از اقتصاد در آموزش عالی (دانشگاه‌ها)، صنعت و سیاست‌گذاری‌های زیست محیطی به عنوان مدل جایگزینی که زمینه‌ساز کاهش مصرف منابع شده، اتلاف و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به حداقل می‌رساند، رو به افزایش است (گیس‌دورفرا و همکاران^۵، ۲۰۲۰؛ متولی و همکاران، ۲۰۲۰). اقتصاد چرخشی بر استفاده کارآمد از مواد، کاهش پسماند و بازیافت مواد تمرکز دارد و از طریق مدل‌های تجاری سودآور، اکوسیستم زمین را بهبود می‌بخشد و فرصت‌های شغلی پنهان ایجاد می‌کند این رویکرد بر استفاده از مواد خام سالم، حذف مواد مضر، کاهش تولید پسماند، استفاده از مواد قابل استفاده مجدد و بازیافت، انرژی‌های تجدیدپذیر، مدیریت آب (تصفیه فاضلاب و افزایش کیفیت آن برای استفاده مجدد و کاهش مصرف آب) و آگاهی اجتماعی تأکید دارد. در سال ۲۰۱۸، اتحادیه اروپا شاخص‌های عملکرد صنعتی را در چهار حوزه تولید و مصرف، مدیریت پسماند، مواد خام دست دوم، و رقابت‌پذیری و نوآوری به اقتصاد چرخشی معرفی کرد. ماسی و همکاران^۶ (۲۰۱۸) بیان می‌کنند که اقتصاد چرخشی نوعی سیستم اقتصادی است که نشان‌دهنده تغییر پارادایمی در نحوه ارتباط جامعه بشری با طبیعت است و هدف آن جلوگیری از کاهش منابع، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و مواد، و تسهیل توسعه پایدار است. دستیابی به یک مدل چرخشی نیازمند نوآوری زیست‌محیطی و بازنگری در قوانین، تولید و مصرف در جامعه است. در سال‌های اخیر، مطالعات مختلفی به ادبیات اقتصاد چرخشی کمک کرده‌اند که برخی از آن‌ها در ادامه ذکر شده‌اند:

بیورنبت و همکاران^۷ (۲۰۲۱) با انجام مطالعه‌ای با عنوان «نقش اقتصاد چرخشی در صنایع تولیدی^۸»، تلاش کردند تا رابطه بین اقتصاد چرخشی و توسعه پایدار را درک و برقرار کنند. نتایج نشان داد که بهبود عملکرد پایدار سازمان‌ها از طریق اجرای اقتصاد چرخشی با تأکید بر ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی حاصل می‌شود. گرافستروم و آسما (۲۰۲۱) مطالعه‌ای را جهت شناسایی موانع اقتصاد چرخشی انجام دادند. نتایج نشان داد که موانع فناورانه، سازمانی، بازاری و فرهنگی، موانع کلیدی برای اجرای اقتصاد چرخشی هستند

¹ The Earth Economy of the Future

² Pierce & Turner

³

⁴

⁵ European Union

⁶ Grafstrom & Aasma

⁷ Geissdoerfer et al.

⁸ Masi et al

⁹ Bjornbet et al

¹⁰ study entitled The role of circular economy in manufacturing industries

۲-۲. نقش اقتصاد چرخشی در زنجیره تامین پایدار

نقش اقتصاد چرخشی در زنجیره تامین پایدار موضوعی بوده که مورد توجه ویژه محققان قرار گرفته است؛ و این موضوع از چند منظر مورد بررسی قرار گرفته است:

۲-۲-۱. تحول دیجیتال و سیستم‌های تصمیم‌گیری در اقتصاد چرخشی

یکی از حیاتی‌ترین ابعاد در پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی، طراحی شبکه‌های تأمین دیجیتال است. تسولاکیس^۱ و همکاران (۲۰۲۳)، در مطالعه خود با معرفی مفهوم «اقتصاد چرخشی ۴.۰»^۲ بر ضرورت وجود سیستم‌های تصمیم‌گیری هوشمند، جهت مقابله با چالش‌های دنیای واقعی تأکید کرده اند. به استدلال نتایج این مطالعه، طراحی شبکه تأمین در عصر دیجیتال باید به نحوی باشد که بتواند تصمیمات پیچیده مربوط به بازگشت مواد و پایداری زنجیره تامین را در قالب یک سیستم تصمیم‌گیری منسجم مدیریت نماید. این دیدگاه، نقش فناوری را از یک ابزار ساده به یک «سیستم مدیریت تصمیم» ارتقا می‌دهد.

در همین راستا، وقاص^۳ و همکاران (۲۰۲۵) به مفهوم «تحول دوقلو» (Twin Transformation) اشاره می‌کنند که طی آن ترکیب دیجیتالی‌سازی (شامل هوش مصنوعی و کلان‌داده‌ها) با زنجیره تأمین چرخشی، منجر به بهبود عملکرد اقتصاد چرخشی و در نتیجه منجر به پایداری می‌گردد.

۲-۲-۲. چارچوب‌های یادگیری ماشین و مدیریت عملیات صنعتی

یادگیری ماشین (ML) می‌تواند با بهبود مدیریت منابع، بهینه‌سازی فرآیندها و رسیدگی به پیچیدگی‌های ذاتی در زنجیره‌های تأمین چرخشی، پتانسیل ارتقای آن‌ها را داشته باشد. یادگیری ماشین می‌تواند با ارائه بینش‌های داده‌محور و تقویت قابلیت‌های تصمیم‌گیری، ابزاری قدرتمند برای پشتیبانی از عملیات زنجیره‌های تأمین چرخشی باشد برای تحقق عملیاتی این مفاهیم، استفاده از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین ضروری است (فرشادفر و تانسکانن، ۲۰۲۴). در این زمینه، تاتوادکار و ماهانکال^۴ (۲۰۲۵) یک چارچوب یادگیری ماشین را در راستای گذار به سوی اقتصاد چرخشی تا سال ۲۰۴۰ ارائه کرده‌اند که نشان می‌دهد چگونه و به چه نحوی هوش مصنوعی می‌تواند زنجیره‌های تأمین را برای مدیریت چرخه‌های بازگشتی در آینده آماده سازد. همچنین، اولاداپو و همکاران^۵ (۲۰۲۴) تأکید دارند که اقتصاد چرخشی مبتنی بر هوش مصنوعی، منجر به افزایش چشمگیر کارایی در عملیات صنعتی می‌شود که این امر مستقیماً بر کاهش هزینه‌های تولید و مدیریت پسماند اثرگذار است. در حوزه صنایع پلاستیک که با چالش‌های سنگین زیست‌محیطی روبروست، پرناتا^۶ (۲۰۲۴) به بررسی پذیرش هوش مصنوعی برای مدیریت زنجیره تأمین پایدار پرداخته است که پیوندی مستقیم با پیچیدگی‌های صنایع پتروشیمی دارد.

¹ Tsolakis

² Circular Economy 4.0

³ Waqas

⁴ Tathavadekar & Mahankale

⁵ Oladapo

⁶ Perneta

۲-۳. هوش مصنوعی و تصمیم‌گیری در اقتصاد چرخشی

به‌کارگیری فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در زنجیره تأمین پایدار، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر تقاضا و بهینه‌سازی جریان‌های معکوس (Reverse Logistics) را مهیا می‌سازد. مدل‌های یادگیری ماشین^۱ قادرند با تحلیل الگوهای بازگشت محصولات، نرخ بازیافت و بازتولید را به میزان چشمگیری افزایش دهند. در این رابطه، مطالعه خان و همکاران^۲ (۲۰۲۳) نشان داد که الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند با شناسایی نقاط ناکارآمد در زنجیره، میزان ضایعات را کاهش و بهره‌وری منابع را ارتقا بخشند. علاوه بر این، ترکیب هوش مصنوعی با اینترنت اشیا (IoT) و بلاک‌چین، بستری را برای ردیابی دقیق محصولات در طول چرخه حیات فراهم کرده است که منجر به شفافیت بیشتر و «تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده»^۳ می‌گردد. همان‌گونه که در پژوهش‌های اخیر انعکاس یافته، پیاده‌سازی این فناوری‌ها به سازمان‌ها و صنایع این امکان را می‌دهد تا تعادل ظریف (با دقتی) میان اهداف اقتصادی و الزامات زیست‌محیطی برقرار سازند (ژئو و همکاران^۴، ۲۰۲۵).

۲-۴. ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی در زنجیره تأمین پایدار

به نظر می‌رسد هوش مصنوعی در اقتصاد چرخشی بیشترین کاربرد را برای بهینه‌سازی منابع، لجستیک معکوس، انتخاب تأمین‌کننده، مدیریت پسماند و طراحی شبکه حلقه بسته دارد. (فرشادفر و تانسکانن^۵، ۲۰۲۴)

هوش مصنوعی به عنوان موتور محرک این تحول، پتانسیل‌های بی‌نظیری در بهینه‌سازی فرآیندها دارد. به اعتقاد باشینسکا پروکوپنکو^۶ (۲۰۲۴)، بهره‌گیری از هوش مصنوعی می‌تواند مدیریت منابع، زنجیره‌های تأمین و شیوه‌های تولید را در راستای اهداف اقتصاد چرخشی متحول کند. این نقش، شامل بهینه‌سازی چرخه حیات محصولات و کاهش ضایعات از طریق پیش‌بینی دقیق نیازهاست. ابراهیم و عبدالعمر^۷ (۲۰۲۵) نیز با ارائه یک مدل میانجی-تعدیل‌گر، نشان دادند که چگونه استفاده از تحلیل‌های زنجیره تأمین مبتنی بر هوش مصنوعی و فناوری‌های صنعت ۴.۰، عملکرد زنجیره تأمین پایدار را به سوی دست یابی به اهداف خالص صفر (Net-Zero) سوق می‌دهد. مطالعه که هوش مصنوعی نه تنها یک ابزار کمکی، بلکه یک عامل میانجی کلیدی در بهبود عملکرد زیست‌محیطی و اقتصادی است. علاوه بر این، چلیک و همکاران^۸ (۲۰۲۶) با تمرکز بر پتانسیل‌های هوش مصنوعی مولد (Generative AI)، فرصت‌های جدیدی را برای تسهیل پذیرش اقتصاد چرخشی در زنجیره‌های تأمین شناسایی کرده‌اند.

۳. مروری بر سوابق موضوع (پیشینه تحقیق)

در سال‌های اخیر، هم‌گرایی فناوری‌های مبتنی هوش مصنوعی (AI) با اصول اقتصاد چرخشی (CE)، مسیر جدیدی را برای دستیابی به زنجیره‌های تأمین پایدار هموار کرده است. بررسی سوابق موضوع نشان می‌دهد هر چند این موضوع، در داخل

¹ Machine Learning

² Khan et al

³ Data-driven decision making

⁴ Zhu et al

⁵ Farshadfar, Mucha, & Tanskanen

⁶ Bashynska & Prokopenko

⁷ Ibrahim & Abdulameer

⁸ Celik

کشور (به ویژه در صنایع پتروشیمی) و زنجیره تامین صنعت پتروشیمی مورد بررسی قرار نگرفته است، اما پژوهش‌ها و مطالعات اخیر در جهان نشان می‌دهند که گذار از مدل‌های خطی به مدل‌های چرخشی، نیازمند ابزارهای تصمیم‌گیری پیشرفته‌ای است که این قابلیت را دارند که پیچیدگی‌های بازگشت منابع و مدیریت چرخه حیات را هدایت نمایند. در ادامه به تحلیل و مرور این پژوهش‌ها در ابعاد مختلف و بصورت دسته بندی شده پرداخته می‌شود:

دسته نخست مطالعات؛ نقش هوش مصنوعی مولد، به‌ویژه از طریق مدل‌های زبانی پیشرفته، را در ارتقای همزیستی صنعتی (IS) و اقتصاد چرخشی تجزیه و تحلیل می‌کند (جنز^۱، ۲۰۲۴). مدل‌های مختلفی مانند Gemini، CoPilot، ChatGPT-Classic و ChatGPT-Advanced را مقایسه می‌کند و توانایی آن‌ها را در شناسایی فرصت‌های همزیستی صنعتی و تعریف کدهای طبقه‌بندی زباله و کدهای بخشی در صنعت ساخت‌وساز ارزیابی می‌کند. این مطالعه تفاوت‌های قابل توجهی در عملکرد را برجسته می‌کند و بر اهمیت ترکیب تخصص انسانی با هوش مصنوعی تأکید می‌کند. از سوی دیگر، جنز^۲ (۲۰۲۵)؛ به‌طور خاص هوش مصنوعی ChatGPT-4 را در زمینه اقتصاد چرخشی بررسی می‌کند. این مطالعه به وضوح پتانسیل مدل را در شناسایی فرصت‌های همزیستی صنعتی نشان می‌دهد. به طور کلی، هوش مصنوعی شناسایی خودکار همکاری‌های همزیستی را تسهیل می‌کند و مدیریت جریان زباله را بهبود می‌بخشد. نویسندگان برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌کنند که دقت زمینه‌ای مدل‌های هوش مصنوعی اصلاح شود، کاربرد آن‌ها به بخش‌های صنعتی متعدد گسترش یابد، پایگاه‌های داده دقیقی برای همزیستی صنعتی ایجاد شود و ادغام بین تخصص انسانی و ابزارهای دیجیتال افزایش یابد.

مطالعات چند سال اخیر، بر ضرورت همگرایی فناوری‌های دیجیتال و استراتژی‌های پایداری تأکید ویژه‌ای دارند. در همین راستا، پرکوکو و همکاران^۳ (۲۰۲۶) با مرور سیستماتیک ادبیات موجود جامع بر روی پایگاه داده Web of Science، نقش تحول‌آفرین هوش مصنوعی را در تسهیل گذار از اقتصاد خطی به اقتصاد چرخشی تبیین کرده‌اند. بر اساس یافته‌های این پژوهش‌ها، هوش مصنوعی نه تنها به عنوان یک ابزار محاسباتی، بلکه به عنوان یک توانمندساز (Enabler) کلیدی برای بازطراحی سیستم‌های اقتصادی عمل می‌کند که از طریق تحلیل داده‌های عظیم، بهینه‌سازی منابع و مدیریت هوشمند چرخه عمر محصول، امکان بستن حلقه‌های مواد را فراهم می‌آورد. این مطالعات با استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای نظیر تحلیل شبکه هم‌آیی و نقشه‌برداری مضمونی، نشان می‌دهند که تلاقی هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی منجر به ظهور خوشه‌های پژوهشی جدیدی در حوزه‌هایی چون کاهش پسماند، بهینه‌سازی انرژی و لجستیک معکوس شده است. کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه‌هایی مانند نگهداری پیش‌بینانه، طراحی هوشمند محصول و بهینه‌سازی زنجیره تأمین، شکاف‌های دانشی موجود در مدیریت پسماند و مصرف منابع را پوشش می‌دهد. این همگرایی دیجیتال-پایداری، چارچوبی را برای توسعه استراتژی‌های مبتنی بر داده فراهم می‌کند که می‌تواند چالش‌های مربوط به مدیریت منابع در اقتصادهای مدرن را مرتفع سازد. همچنین، این ادبیات تأکید می‌کند که ادغام هوش مصنوعی می‌تواند مدل‌های تولید سنتی را به سیستم‌های داده‌محور و پایدار تبدیل کند که برای سیاست‌گذاران و مدیران صنعتی در جهت دستیابی به رشد پایدار حائز اهمیت است.

توتور و همکاران^۴ (۲۰۲۴) در پژوهشی با هدف ادغام دو حوزه هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی، «یک مدل مفهومی از اثرات هوش مصنوعی بر اقدامات اقتصاد چرخشی» به بررسی نقش فناوری‌های نوظهور در گذار از مدل‌های اقتصادی خطی به سمت الگوهای پایدار پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش مرور سیستماتیک ادبیات و چک لیست

¹ Genc

² Tutore

پرسیمما (PRISMA) و تحلیل ۶۳ مقاله منتخب، چارچوبی مفهومی را توسعه دادند که تعامل هوش مصنوعی با اقتصاد چرخشی را در چهار سطح «بهینه‌سازی سیستم»، «بازطراحی سیستم»، «بازطراحی مدل کسب‌وکار» و «نوآوری در زیست‌بوم» تبیین می‌کند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه هوش مصنوعی در حال حاضر به طور گسترده در بهینه‌سازی فعالیت‌های خرد اقتصاد چرخشی (بر اساس چارچوب (ReSOLVE) به کار گرفته می‌شود، اما کاربرد آن در سطوح استراتژیک مانند بازطراحی کل مدل‌های کسب‌وکار و ایجاد نوآوری‌های کلان در زیست‌بوم‌های صنعتی، همچنان حوزه‌ای کمتر کاوش‌شده و دارای پتانسیل‌های تبیین‌نشده است، به عبارتی؛ هوش مصنوعی می‌تواند با حمایت از شرکت‌ها در بازتعریف استراتژیک مدل‌های کسب‌وکارشان، تلاش‌های مربوط به اقتصاد چرخشی را تقویت کند؛ اما پتانسیل آن به عنوان یک ابزار برنامه‌ریزی استراتژیک برای بازطراحی مدل کسب‌وکار و نوآوری در زیست‌بوم، همچنان ناشناخته مانده است.

تمرکز برخی از مطالعات نیز بر تحلیل نقش هوش مصنوعی بر اقتصاد چرخشی در زنجیره تامین پایدار بوده است، از جمله: زارعی محمودآبادی و ترک زبان (۱۴۰۵)، در مطالعه خود به شناسایی و تحلیل عوامل کلیدی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی در بستر زنجیره تامین هوشمند (SSC) و پایدار پرداختند. داده‌ها از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و نظرسنجی از خبرگان صنعت و دانشگاه گردآوری و با تکنیک دیمتل تحلیل شدند. بر اساس نتایج حاصله، عوامل حیاتی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی در زنجیره تامین هوشمند و پایدار در پنج بُعد مدیریتی، فناوری، همکاری شبکه‌ای، فرآیندی و پایداری شناسایی شدند. بر اساس نتایج این مطالعه، ابعاد مدیریتی و فناوری به‌عنوان عوامل علی و اثرگذار اصلی شناخته می‌شوند. در مقابل، ابعاد فرآیندی و پایداری بیشترین میزان تأثیرپذیری را از سایر حوزه‌ها دارند. همچنین بُعد «همکاری شبکه‌ای» با بالاترین مقدار ارتباط کلی، نقش واسطه‌ای کلیدی میان ابعاد مدیریتی و «پایداری» ایفا می‌کند. نتایج پژوهش منجر به ارائه یک چارچوب مفهومی تلفیقی گردید که نشان می‌دهد ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی از طریق تقویت ابعاد مدیریتی، فناوری و همکاری شبکه‌ای می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیندها، ارتقای پایداری و ایجاد زنجیره تامین هوشمند و تاب‌آور منجر گردد. این چارچوب، ارتباط علی و ساختاری میان عوامل کلیدی موفقیت را تبیین کرده و مسیر تحقق توسعه پایدار و مزیت رقابتی پایدار را برای سازمان‌ها و صنایع فراهم می‌سازد.

دسته دوم؛ شامل مطالعاتی است که با کلمات کلیدی مرتبط با هوش مصنوعی، اقتصاد چرخشی و یادگیری ماشینی مشخص می‌شوند. این گروه عمدتاً شامل تحقیقاتی است که در زمینه‌های مختلف تجاری، از شرکت‌های خرد، کوچک و متوسط (MSME) گرفته تا شرکت‌های نوپا و تولیدی انجام شده است (مانگادا و همکاران^۱، ۲۰۲۴؛ موکرگی و همکاران^۲، ۲۰۲۴؛ شفیق و عادل^۳، ۲۰۲۴؛ سوئانگار و میشر^۴، ۲۰۲۴). مطالعات تحلیل‌شده نشان می‌دهند که هوش مصنوعی می‌تواند از طریق راه‌حل‌های نوآورانه و پایدار در بخش‌های مختلف، به طور قابل توجهی باعث ارتقای لجستیک معکوس مبتنی بر هوش مصنوعی شود. به طور خاص، موکرگی و همکاران (۲۰۲۴) پذیرش لجستیک معکوس مبتنی بر هوش مصنوعی را در MSME‌های هند بررسی می‌کنند و نشان می‌دهند که عواملی مانند مزیت نسبی، اعتماد و حمایت مدیریتی و دولتی، پذیرش این فناوری‌ها را تسهیل می‌کنند. به طور خاص، هوش مصنوعی باز یافت و استفاده مجدد از مواد را افزایش می‌دهد، فرآیندهای لجستیک را بهینه می‌کند و ردپای کربن را کاهش می‌دهد. منگادا و همکاران (۲۰۲۴) و سوئانگار و میشر (۲۰۲۴) بر

¹ Manganda

² Mukherjee

³ Shafique, Adeel

⁴ Suthagar & Mishra

بخش‌های خاصی مانند کشاورزی-غذا و مراقبت‌های بهداشتی تمرکز دارند. مانگاندا و همکاران (۲۰۲۴) نشان می‌دهند که چگونه استارت‌آپ‌های کشاورزی-غذایی برزلی، فناوری‌های نوآورانه‌ای مانند کشاورزی دقیق و هوش مصنوعی را برای افزایش پایداری زیست‌محیطی، بهبود مدیریت منابع کشاورزی و کاهش ضایعات و انتشار گازهای گلخانه‌ای به کار می‌گیرند. سوتاگار و میشرا (۲۰۲۴) یک مدل زنجیره تأمین مراقبت‌های بهداشتی پایدار مبتنی بر استفاده از پهپادها و هوش مصنوعی برای نظارت بر محصولات پزشکی پیشنهاد می‌کنند که در نتیجه باعث بهبود کارایی، پایداری و سودآوری سیستم مراقبت‌های بهداشتی می‌شود. شفیق و همکاران (۲۰۲۴) کاربرد فناوری‌های پیشرفته صنعت ۵.۰، مانند هوش مصنوعی، کلان داده، اینترنت اشیا، یادگیری ماشینی و بلاکچین را در شرکت‌های تولیدی چینی تجزیه و تحلیل می‌کنند و نشان می‌دهند که چگونه این فناوری‌ها شیوه‌های چرخه‌ای را ترویج می‌دهند و عملکرد پایدار شرکت‌ها را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. هوش مصنوعی و تجزیه و تحلیل داده‌ها، شرکت‌ها را قادر می‌سازد تا در مورد ابتکارات پایداری خود تصمیمات آگاهانه‌تر و استراتژیک‌تری بگیرند، زیرا درک عمیق‌تر از تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی عملیات آن‌ها، اجرای شیوه‌های مؤثرتر برای دستیابی به اهداف پایداری را تسهیل می‌کند (موکرچی و همکاران، ۲۰۲۴). به طور خلاصه، هوش مصنوعی با بهبود فرآیندهای لجستیک، کاهش ضایعات و بهینه‌سازی مدیریت پایدار منابع در بخش‌های کلیدی مانند تولید، کشاورزی-غذایی و مراقبت‌های بهداشتی از گذار به اقتصاد چرخشی پشتیبانی می‌کند.

سومین دسته از پژوهش‌ها، که در میان موضوعات اساسی این حوزه قرار دارد، مباحث مربوط به یادگیری عمیق، بینایی کامپیوتر و پایداری محیط زیست را بررسی می‌کند. مطالعات این خوشه بر نقش حیاتی هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در بهینه‌سازی مدیریت پسماند و ترویج اقتصاد چرخشی تأکید دارد. از طریق تکنیک‌های پیشرفته یادگیری عمیق، مانند شبکه‌های عصبی کانولوشن (CNN) و مدل‌های پیش‌بینی، هوش مصنوعی به عنوان ابزاری کلیدی در بهبود طبقه‌بندی مواد، کاهش ضایعات و بهینه‌سازی منابع در زنجیره‌های تأمین نشان داده شده است. چاند و عساف^۱ (۲۰۲۴) و هودنورکار و همکاران^۲ (۲۰۲۴) بر استفاده از یادگیری عمیق برای تشخیص و مدیریت مواد زائد و قطعات الکترونیکی استفاده شده تمرکز دارند. تحقیقات آنها نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی کانولوشن به طور قابل توجهی دقت مرتب‌سازی مواد را بهبود می‌بخشند و در نتیجه استفاده مجدد و بازیافت را تسهیل می‌کنند. از سوی دیگر، السابت و همکاران^۳ (۲۰۲۴) و چا و همکاران^۴ (۲۰۲۴) پتانسیل هوش مصنوعی را در بهینه‌سازی مدیریت پسماند بررسی می‌کنند. السابت و همکاران (۲۰۲۴) نشان می‌دهند که ادغام مدل‌های پیش‌بینی، کارایی عملیاتی را افزایش می‌دهد و تخصیص بهتر منابع را ممکن می‌سازد و در نتیجه به کاهش ضایعات و بهبود مدیریت پسماند صنعتی کمک می‌کند. چا و همکاران (۲۰۲۴) مدلی مبتنی بر جنگل تصادفی برای پیش‌بینی تولید زباله‌های تخریب پیشنهاد می‌کنند که بازیابی و برنامه‌ریزی مقصد نهایی مواد را تسهیل می‌کند. تحقیقات آینده پیشنهاد می‌کند که مجموعه داده‌ها را گسترش دهند تا ظرفیت تعمیم مدل‌های یادگیری عمیق را با گنجاندن تصاویر متنوع‌تر افزایش دهند. برای انتخاب قطعات الکترونیکی مورد استفاده، نویسندگان توصیه می‌کنند معیارهایی را اتخاذ کنند که پیچیدگی محاسباتی را با دقت متعادل می‌کنند، با هدف توسعه مدل‌های کارآمدتر و پایدارتر. به طور کلی، نتایج روشن می‌کند که چگونه هر مرحله تحلیلی به طور مشترک به سؤالات تحقیق پاسخ می‌دهد و به درک جامعی از پیوند هوش

¹ Chand and Assaf

² Hudnurkar et al

³ Alsabt et al.

⁴ Cha et al.

مصنوعی-الکترونیکی کمک می‌کند. سهم اصلی این مطالعه در ارائه یک چارچوب یکپارچه مفید برای محققان در ترسیم مطالعات آینده، برای متخصصان بهینه‌سازی فرآیندهای چرخشی و برای سیاست‌گذاران در ترویج انتقال دیجیتال پایدار است.

۳-۱. تحلیل مطالعات و شکاف پژوهشی

با مرور جامع ادبیات فوق، مشخص است که اگرچه مطالعات گسترده‌ای بر نقش فناوری‌های دیجیتال در پایداری انجام شده است، اما یک شکاف پژوهشی قابل توجه وجود دارد: بیشتر پژوهش‌ها یا بر جنبه‌های فنی هوش مصنوعی تمرکز دارند و یا بر اصول کلی اقتصاد چرخشی. با این حال، «نحوه یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی در سیستم‌های تصمیم‌گیری^۱ برای مدیریت چرخه‌های بازگشت در زنجیره تأمین صنایع پتروشیمی» با توجه به ویژگی‌های خاص این صنعت (مانند جریان‌های پیچیده مواد و حساسیت‌های زیست‌محیطی)، همچنان نیازمند بررسی‌های ساختارمند است. رساله حاضر با تمرکز بر نقش هوش مصنوعی در «فرآیند تصمیم‌گیری» مبتنی بر اقتصاد چرخشی، قصد دارد این شکاف را در حوزه صنایع پتروشیمی پوشش دهد.

۳-۲. شکاف پژوهشی

در پژوهش حاضر تاکید روی فرایند تصمیم‌گیری^۲ مبتنی بر اقتصاد چرخشی است. تصمیم‌گیری صرفاً یک الگوریتم نیست، بلکه شامل تعامل بین هوش مصنوعی و تصمیم‌گیرنده انسانی (مدیران زنجیره تأمین) است. با توجه به اینکه اکثر پژوهش‌های پیشین (مانند چا و همکاران یا السابت) بر «بهینه‌سازی عملیاتی» (مثل تشخیص نوع پسماند) تمرکز دارند، اما به این موضوع که «هوش مصنوعی چگونه فرآیند تصمیم‌گیری انسانی را در زنجیره تأمین پایدار تغییر می‌دهد یا تسهیل می‌کند» یعنی جنبه‌های رفتاری، شناختی و مدیریتی تصمیم‌گیری مبتنی بر رهیافت اقتصاد چرخشی) کمتر پرداخته شده است. از سوی دیگر، زنجیره تأمین در ایران به دلیل محدودیت‌های زیرساختی، چالش‌های تأمین انرژی، شرایط ژئوپلیتیک و ساختار خاص صنعت پتروشیمی در منطقه، با مدل‌های جهانی تفاوت‌هایی دارد. مدل‌های توسعه یافته در کشورهای پیشرفته یا اقتصادهای بزرگ (مانند چین یا برزیل)، ممکن است در مواجهه با محدودیت‌های زنجیره تأمین در ایران (مانند نوسانات تأمین مواد اولیه یا محدودیت‌های تکنولوژیک خاص) قابل تعمیم نباشند. لذا، ضرورت انجام مطالعه‌ای که «نقش هوش مصنوعی را در محیط پتروشیمی ایران با رعایت محدودیت‌ها و فرصت‌های بومی» مورد بررسی قرار دهد، بسیار برجسته است.

۴. روش کار (روش شناسی تحقیق)

مطالعه حاضر در دسته تحقیقات توصیفی - همبستگی است که به روش پیمایشی و کمی اجرا گردید. جامعه آماری پژوهش که متشکل از مدیران، کارشناسان خبره و تکنسین‌های تحصیل کرده (نخبگان متخصص در حوزه صنعت و فن‌آوری) شاغل در بخش‌های مختلف صنایع پتروشیمی پارس پخش گردید. با توجه به اینکه کلیه افراد شاغل در بخش‌های مختلف پتروشیمی، شانس انتخاب داشته باشند و اینکه مجتمع پتروشیمی پارس از بخش‌های مختلف و مجزا تشکیل شده نمونه‌گیری به روش

¹ Decision-making Systems

² Decision-making

خوشه ای و طبقه ای انجام گرفت و از هر بخش به عنوان یک طبقه عده ای منتخب تعیین گردید. در مجموع با احتساب ریزش های احتمالی، ۷۸ پرسشنامه از متخصصین مربوطه جمع آوری گردید.

ابزار اندازه گیری در پژوهش حاضر «پرسشنامه» می باشد. پرسشنامه محقق ساخته «نقش هوش مصنوعی در تصمیم گیری های اقتصاد چرخشی» که هدف آن سنجش نقش ابعاد مختلف هوش مصنوعی در ارتقای تصمیم گیری های مبتنی بر اصول اقتصاد چرخشی در صنایع پتروشیمی. که دارای ۲۵ سوال است، سوالات پرسشنامه بر اساس ادبیات پژوهش و منابع علمی مرتبط با موضوع با سنتز تحقیقات پیشین توسط افراد متخصص در این حوزه طرح گردید. رای این پرسشنامه با روش روایی محتوی مورد سنجش قرار گرفت. این پرسشنامه از چند بخش تشکیل شده است:

بخش اول: مشخصات دموگرافیک که شامل اطلاعاتی در خصوص (سن، جنسیت، سطح تحصیلات، سوابق کاری، نقش سازمانی (مدیر، سرپرست، کارشناس فنی) و میزان آشنایی با مفاهیم AI و CE می باشد)

بخش دوم: میزان پذیرش و زیرساخت های هوش مصنوعی (AI Capability Scale)

این بخش می سنجد که صنایع پتروشیمی پارس در چه سطحی از تکنولوژی قرار دارد. بخ طور مثال: گویه: "سازمان ما از الگوریتم های یادگیری ماشین برای پیش بینی جریان مواد و تقاضا استفاده می کند."

بخش سوم: اجرای اصول اقتصاد چرخشی (CE Implementation Scale)

این بخش میزان موفقیت در پیاده سازی چرخه بسته را می سنجد. به طور مثال: گویه: "فرآیندهای بازیافت و بازگشت مواد در زنجیره تأمین ما به صورت سیستماتیک مدیریت می شوند."

بخش چهارم: نقش هوش مصنوعی در تسهیل اقتصاد چرخشی (CE → The Link: AI)

این بخش مهمترین قسمت پرسشنامه است در ای بخش سوالاتی در خصوص اینکه آیا AI واقعاً به CE کمک می کند؟ به طور مثال: مثال: گویه: "استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی، شناسایی فرصت های همزیستی صنعتی (Industrial Symbiosis) را تسهیل کرده است."

بخش پنجم: کیفیت تصمیم گیری مدیریتی (Decision-Making Quality Scale)

این بخش اثر نهایی را می سنجد. مثال: گویه: "داده های مستخرج از سیستم های هوشمند، دقت تصمیمات ما را در زمینه کاهش اثرات زیست محیطی افزایش داده است."

بخش ششم: دقت و سرعت تصمیم گیری (Speed & Decision Accuracy)

تجزیه و تحلیل داده ها با نرم افزار Spss_26 و استفاده از آزمون های ضریب همبستگی پیرسون و رگرسیون چندگانه انجام جهت تحلیل فرضیه های پژوهش استفاده شد.

۵. یافته ها

۵-۱. ویژگی های دموگرافیک نمونه پژوهش

در مطالعه حاضر، ۷۸ نفر از متخصصان حوزه صنعت و فناوری در بخش های مختلف مجتمع پتروشیمی پارس به روش نمونه گیری در دسترس انتخاب شدند. از نظر ویژگی های جمعیت شناختی، اکثریت شرکت کنندگان را مردان (۷۹.۵٪) تشکیل می دادند و زنان (۲۰.۵٪) سهم کمتری در نمونه داشتند. در بررسی توزیع سنی، بیشترین فراوانی متعلق به گروه سنی ۴۰ تا

۴۹ سال (۳۸.۵٪) و پس از آن گروه سنی ۳۰ تا ۳۹ سال (۳۴.۶٪) بود. افراد حاضر در محدوده سنی ۲۰ تا ۲۹ سال ۱۶.۷٪ از کل نمونه را شامل می‌شدند و کمترین میزان فراوانی نیز مربوط به افراد بالای ۵۰ سال با ۱۰.۲٪ بود. از نظر توزیع شغلی، ۴۵ نفر (۵۷.۷٪) در بخش عملیات، ۱۶ نفر (۲۰.۵٪) در بخش لجستیک، ۱۰ نفر (۱۲.۸٪) در بخش فناوری و ۷ نفر (۹.۰٪) در پست‌های مدیریت و معاونت مشغول به فعالیت بودند که بیشترین فراوانی مربوط به بخش عملیات بود. در خصوص سوابق شغلی، ۱۱ نفر (۱۴.۱٪) زیر ۳ سال، ۲۰ نفر (۲۵.۶٪) ۳ تا ۵ سال، ۳۷ نفر (۴۷.۴٪) ۵ تا ۱۰ سال و ۱۰ نفر (۱۲.۸٪) بیش از ۱۰ سال سابقه فعالیت در بخش تخصصی خود را داشتند که بیشترین فراوانی مربوط به گروه دارای ۵ تا ۱۰ سال سابقه بود.

۲-۵. تحلیل فرضیه های پژوهش:

جدول تحلیل همبستگی (Pearson Correlation)

این جدول نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل پژوهش با متغیر وابسته (تصمیم‌گیری اقتصاد چرخشی) رابطه مثبت و قوی دارند.

جدول ۱: ضرایب همبستگی پیرسون بین متغیرهای پژوهش

متغیرها	زیرساخت و مدیریت داده‌ها	تحلیل پیش‌بینانه	بهینه‌سازی منابع و مدیریت پسماند	کاهش شدت کربن و اثرات محیطی	دقت و سرعت تصمیم‌گیری	همسویی با اهداف پایداری
زیرساخت و مدیریت داده‌ها	■					
تحلیل پیش‌بینانه	۰/۶۸**	■				
بهینه‌سازی منابع و مدیریت پسماند	۰/۵۹**	۰/۷۱**	■			
کاهش شدت کربن و اثرات محیطی	۰/۶۴**	۰/۷۴**	۰/۶۵**	■		
دقت و سرعت تصمیم‌گیری	۰/۶۲**	۰/۶۴**	۰/۵۴*	۰/۷۰**	■	
همسویی با اهداف پایداری	۰/۶۶**	۰/۷۸**	۰/۵۸**	۰/۷۲**	۰/۷۶**	■

$P < 0.001$

«جدول (۱)، ضرایب همبستگی پیرسون را بین ۶ زیرمقیاس اصلی پژوهش نشان می‌دهد. یافته‌ها حاکی از آن است که تمامی زیرمقیاس‌ها با متغیر هدف (همسویی با اهداف پایداری) رابطه مثبت و معناداری دارند ($P < 0.01$)»

به‌طور مشخص، قوی‌ترین همبستگی مشاهده شده مربوط به رابطه بین «پذیرش و به‌کارگیری تحلیل‌های هوشمند» و «هم‌سویی با اهداف پایداری» است ($r = 0.71$). این یافته نشان می‌دهد که با افزایش سطح پذیرش ابزارهای هوشمند و به‌کارگیری تحلیل‌های پیش‌بینانه در مدیریت، تمایل سازمان به اتخاذ تصمیماتی که با اصول اقتصاد چرخشی (مانند کاهش ضایعات و مدیریت منابع) همسو است، به صورت مستقیم افزایش می‌یابد. همچنین، همبستگی بالای بین زیرمقیاس‌های مربوط به مدیریت پسماند و کاهش شدت کربن با زیرمقیاس‌های هوش مصنوعی، تاییدکننده این است که زیرساخت‌های هوشمند، بستری لازم برای عملیاتی کردن مفاهیم نظری اقتصاد چرخشی در صنعت پتروشیمی فراهم می‌کنند.

جدول (۲) تحلیل رگرسیون چندگانه برای پیش‌بینی تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر اقتصاد چرخشی

متغیرهای مستقل	ضریب استاندارد شده بتا (β)	خطای استاندارد (SE)	مقدار t	سطح معناداری P-Value
تحلیل پیش‌بینانه	۰/۴۶**	۰/۰۵	۹.۲۲	<۰/۰۰۱
زیرساخت و مدیریت داده‌ها	۰/۲۲	۰/۰۴	۳.۶۸	۰/۰۰۲
بهینه‌سازی منابع و مدیریت پسماند	۰/۲۴	۰/۰۶	۳.۳۴	۰/۰۰۳
کاهش شدت کربن و اثرات محیطی	۰/۲۸	۰/۰۵	۴.۵۸	<۰/۰۰۱
دقت و سرعت تصمیم‌گیری	۰/۳۰	۰/۰۷	۳.۷۲	۰/۰۰۲
هم‌سویی با اهداف پایداری	۰/۲۶	۰/۰۸	۳.۶۴	۰/۰۰۱

نتایج تحلیل رگرسیون در خصوص قدرت تبیین‌کنندگی مدل نشان می‌دهد که ۵۵ درصد از تغییرات در تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر اقتصاد چرخشی در صنعت پتروشیمی توسط توانمندی‌های هوش مصنوعی توضیح داده می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر بسیار بالا و عملیاتی این فناوری است. ($R^2 = 0.55$)

نقش سایر عوامل: سایر متغیرها از جمله «دقت و سرعت تصمیم‌گیری» ($\beta = 0.30$) و «کاهش شدت کربن» ($\beta = 0.28$) نیز نقش مثبت و معناداری در مدل دارند، اما اهمیت آن‌ها در مقایسه با تحلیل پیش‌بینانه کمتر است.

۶. بحث

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که هوش مصنوعی با تضمین‌گیری مبتنی بر اقتصاد چرخشی دارای رابطه مثبت و معنادار است. این رابطه نشان می‌دهد که هوش مصنوعی در این صنعت دیگر یک ابزار دیجیتال صرف نیست، بلکه به عنوان یک تسهیل‌گر استراتژیک برای گذار از مدل‌های خطی به مدل‌های پایدار عمل می‌کند. این یافته، وجود این رابطه معنادار با استدلال توتور و همکاران (۲۰۲۴) کاملاً همسو است. آن‌ها معتقدند که ادغام AI در زیرساخت‌های صنعتی، پیچیدگی‌های مرتبط با مدیریت جریان‌های مواد (Material Flows) را کاهش می‌دهد. نتایج پژوهش ما این ادعا را تأیید می‌کند که افزایش قابلیت‌های هوش مصنوعی، مستقیماً «کیفیت تصمیم‌گیری» در مدیریت پسماند و بازیابی منابع را ارتقا می‌دهد. از سوی دیگر نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که میان «توانمندی‌های تحلیل پیش‌بینانه» و «هم‌سویی با اهداف پایداری» همبستگی مثبت و بسیار بالایی برقرار است. این همبستگی پیش‌زمینه‌ای، به‌طور مستقیم نتایج حاصل از رگرسیون

چندگانه را تأیید می‌کند؛ جایی که مدل با $(R^2 = ۰/۵۵)$ نشان داد بخش عمده‌ای از تصمیم‌گیری‌های چرخشی در صنعت پتروشیمی، متکی بر قابلیت‌های هوش مصنوعی است.

در سطح تحلیل رگرسیون، «تحلیل پیش‌بینانه» با ضریب $(\beta = ۰/۴۶)$ به عنوان قوی‌ترین پیش‌بیننده عمل می‌کند. این همخوانی آماری (همبستگی بالا در گام اول و اثرگذاری قوی در رگرسیون)، نشان‌دهنده یک الگوی استراتژیک است: در صنعت پتروشیمی، داده‌های پیش‌بینانه صرفاً یک ابزار جانبی نیستند، بلکه «ستون فقرات» هم‌سویی با پایداری محسوب می‌شوند. این یافته کاملاً با دیدگاه **چاند و عساف (۲۰۲۴)** همسو است که استدلال می‌کنند دقت مدل‌های هوش مصنوعی (در بخش پیش‌بینی) مستقیماً به کاهش ضایعات در چرخه‌های تولیدی منجر می‌شود. علاوه بر این، اگرچه «دقت و سرعت تصمیم‌گیری» و «کاهش شدت کربن» $(\beta = ۰/۲۹)$ نیز نقش مثبتی در مدل دارند، اما وزن کمتر آن‌ها نسبت به تحلیل پیش‌بینانه نشان می‌دهد که در صنعت پتروشیمی، تغییرات واکنش‌گرا (Reactive) اهمیت کمتری نسبت به پیش‌بینی‌های کنش‌گرایانه (Proactive) برای مدیریت پسماند و کربن دارد. این سلسله‌مراتب از اهمیت، با چارچوب **توتور و همکاران (۲۰۲۴)** مبنی بر اینکه «بلوغ عملیاتی» پیش‌نیاز گذار به استراتژی‌های پایدار است، مطابقت دارد.

یافته‌های حاصل از ماتریس همبستگی نشان‌دهنده رابطه مثبت و معنادار بین «قابلیت‌های هوش مصنوعی» و «اقدامات اقتصاد چرخشی» (به ویژه در ابعاد کاهش شدت کربن و اثرات محیطی و بهینه‌سازی منابع) است. این یافته با نتایج **شفیق و عادل (۲۰۲۴)** همسو است که نشان دادند فناوری‌های پیشرفته صنعت ۵۰٪ شیوه‌های چرخه‌ای را ترویج می‌دهند. همچنین، همبستگی مشاهده شده در مدیریت چرخه عمر محصول با یافته‌های **السابت و همکاران (۲۰۲۴)** در خصوص کارایی عملیاتی مدل‌های پیش‌بینی، مطابقت کامل دارد. این نشان می‌دهد که استفاده از ابزارهای هوشمند، ارتباطی مستقیم با کاهش پسماند در زنجیره تأمین هوشمند دارد. در نهایت، شواهد پژوهش حاضر می‌دهد که همبستگی بالا میان پیش‌بینی و پایداری، در واقع منعکس‌کننده توانایی بنگاه‌ها در تبدیل داده‌های خام پتروشیمی به استراتژی‌های عملیاتی اقتصاد چرخشی است؛ موضوعی که **السابت و همکاران (۲۰۲۴)** آن را به عنوان هسته‌ی مرکزی هوش مصنوعی در صنعت ۵۰٪ توصیف کرده‌اند. ازم به دکر است که کاربردهای هوش مصنوعی، از تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی پیش‌بینانه گرفته تا اتوماسیون و طراحی هوشمند محصول، به محرک‌های کلیدی رقابت‌پذیری و پایداری تبدیل شده‌اند. این تکامل فناورانه توسط دسترسی رو به رشد به داده‌های عظیم^۱ و قدرت محاسباتی پیشرفته حمایت شده است که در کنار هم، هوش مصنوعی را قادر ساخته‌اند تا به عنوان یک مؤلفه ضروری در اکوسیستم‌های تجاری مدرن عمل کند (پروکو و همکاران^۲، ۲۰۲۲).

در ادبیات گسترده‌تر زنجیره تأمین پایدار، عملکردهای کلیدی هوش مصنوعی شامل پیش‌بینی تقاضا، بهینه‌سازی موجودی، نگهداری پیش‌بینی‌شده، بهینه‌سازی لجستیک و مدیریت ریسک است که همگی به کاهش ضایعات و تلفات منابع که برای عملکرد اقتصاد چرخشی امری ضروری و مهم هستند، کمک می‌نمایند (ساموئلز^۳، ۲۰۲۵؛ ابیانه و همکاران^۴، ۲۰۲۵).

^۱ Big Data

^۲ Percuoco

^۳ Samuels et al.

^۴ Abyaneh et al.

۷. نتیجه گیری

گذار از اقتصاد خطی به اقتصاد چرخشی در صنعت پتروشیمی، مستلزم تصمیم‌گیری‌هایی است که هم‌زمان کاهش ضایعات، بازیافت مواد، افزایش بهره‌وری منابع و کاهش انتشار کربن را دنبال کنند. در این میان، هوش مصنوعی قادر است که به‌عنوان یک توانمندساز کلیدی، کیفیت و سرعت تصمیم‌گیری مدیران را در زنجیره تأمین پایدار ارتقا دهد. به‌ویژه در صنایع فرایندی پیچیده مانند پتروشیمی، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تحلیل پیش‌بینانه و سامانه‌های هوشمند پشتیبان تصمیم، امکان پیش‌بینی تقاضا، برآورد میزان ضایعات، شناسایی الگوهای مصرف انرژی و بهینه‌سازی جریان مواد را فراهم می‌کند؛ امری که با اهداف اقتصاد چرخشی هم‌راستا است (قباخلو^۱، ۲۰۲۰؛ تسولاکیس و همکاران^۲، ۲۰۲۳).

هوش مصنوعی از طریق تحلیل داده‌های عملیاتی، داده‌های حسگرها و اطلاعات زنجیره تأمین، می‌تواند به مدیران کمک کند تا در مراحل مختلف چرخه حیات محصول، تصمیم‌هایی مبتنی بر اصول چرخشی اتخاذ کنند. برای مثال، در مرحله طراحی، مدل‌های هوشمند قادرند ترکیب مواد و ویژگی‌های طراحی را به‌گونه‌ای پیشنهاد دهند که قابلیت بازیافت و بازاستفاده افزایش یابد. در مرحله تولید، سیستم‌های هوش مصنوعی با پایش لحظه‌ای فرایندها، از اتلاف انرژی و مواد جلوگیری کرده و ناهنجاری‌ها را شناسایی می‌کنند. همچنین در حوزه لجستیک معکوس، الگوریتم‌های پیش‌بینانه می‌توانند زمان و حجم بازگشت مواد را تخمین زده و تصمیم‌گیری درباره جمع‌آوری، جداسازی و بازتوزیع مواد را تسهیل کنند (تسولاکیس و همکاران، ۲۰۲۳؛ برسانلی و همکاران^۳، ۲۰۲۳). از منظر مدیریتی، مهم‌ترین مزیت هوش مصنوعی کاهش عدم قطعیت و پیچیدگی در تصمیم‌گیری است. تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر اقتصاد چرخشی معمولاً با متغیرهای مبهمی مانند کیفیت مواد بازیافتی، هزینه بازگردانی، نوسانات قیمت انرژی و مقررات زیست‌محیطی همراه‌اند. در این شرایط، ابزارهای هوشمند می‌توانند سناریوهای مختلف را شبیه‌سازی کرده و پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی هر گزینه را برای مدیران روشن سازند. بدین ترتیب، تصمیم‌گیرندگان قادر خواهند بود انتخاب‌هایی انجام دهند که نه تنها از نظر مالی مقرون‌به‌صرفه‌اند، بلکه با اهداف پایداری نیز سازگار هستند (نوبر و تاوارز^۴، ۲۰۱۷؛ جیوور و همکاران^۵، ۲۰۱۹).

با وجود این ظرفیت‌ها، پیاده‌سازی هوش مصنوعی در راستای اقتصاد چرخشی با موانع متعددی مواجه است:

- نخست، کمبود داده‌های باکیفیت و یکپارچه، یکی از جدی‌ترین چالش‌هاست؛ زیرا مدل‌های هوش مصنوعی برای عملکرد دقیق به داده‌های دقیق، به‌روز و قابل اشتراک نیاز دارند
- دوم، هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه برای زیرساخت‌های دیجیتال و سامانه‌های تحلیلی، به‌ویژه در صنایع سرمایه‌بر مانند پتروشیمی، می‌تواند مانع توسعه این رویکرد شود. سوم، شکاف مهارتی میان متخصصان فنی و تحلیلگران داده، و نیز مقاومت سازمانی در برابر تغییر، از دیگر موانع مهم است. افزون بر این، نبود استانداردهای روشن برای داده‌های چرخشی، الزامات قانونی و دغدغه‌های امنیت سایبری نیز می‌تواند سرعت بهره‌گیری از این فناوری‌ها را کاهش دهد.

¹ Ghobakhloo

² Tsolakis et al

³ Bressanelli et al

⁴ Nobre & Tavares

⁵ Jabbour et al

در مجموع، هوش مصنوعی می‌تواند با افزایش دقت، سرعت و شفافیت تصمیم‌گیری، نقش مؤثری در تحقق اقتصاد چرخشی در صنعت پتروشیمی ایفا کند؛ اما تحقق کامل این ظرفیت، نیازمند زیرساخت داده‌ای مناسب، سرمایه‌گذاری هدفمند، توسعه مهارت‌های دیجیتال و هم‌راستاسازی راهبردهای فناوری با اهداف پایداری است.

۸. راهکارها و پیشنهاد

در حالی که پذیرش هوش مصنوعی در زنجیره تأمین پایدار با تأکید بر رهیافت اقتصاد چرخشی با چالش‌هایی نظیر هزینه‌های اولیه و کمبود مهارت‌های فنی مواجه است، اما مزایای استراتژیک آن در کاهش ردپای کربن و افزایش انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین غیرقابل انکار است. تحقیقات آینده باید بر توسعه چارچوب‌های یکپارچه برای هماهنگی این فناوری‌ها با مبانی اقتصاد چرخشی در صنایع مختلف تمرکز نمایند

در حوزه مدیریت سبز، اتخاذ فناوری‌های نوآورانه برای نظارت و کنترل مصرف انرژی و منابع برای کاهش اثرات زیست‌محیطی در زنجیره تأمین پتروشیمی حیاتی است. این امر مستلزم پیاده‌سازی فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی و بلاکچین است. با استفاده از فناوری‌های نوظهور مانند بلاکچین و هوش مصنوعی در مدیریت زنجیره تأمین، سازمان‌ها می‌توانند تغییراتی در فرآیندهای خود ایجاد کنند که منجر به بهبود کیفیت محصول، کاهش ضایعات و افزایش کارایی شود. این تغییرات می‌توانند تأثیر مهمی بر ارتقای پایداری زیست‌محیطی و حفاظت از منابع طبیعی داشته باشند که با اصول مهندسی سبز و مدیریت سبز نیز همسو می‌باشند.

منابع و مآخذ:

الف: منابع فارسی:

۱. رعیت پیشه، سعید؛ احمدی کهنعلی، رضا و عباسی، میثم. (۱۳۹۷). شناسایی و ارزیابی شاخص‌های زنجیره تامین پایدار در صنعت پتروشیمی با رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره. *مجله مطالعات مدیریت صنعتی*، (۵۱): ۱۸۰-۱۴۵.
۲. رئوفی‌راد، مسعود و فتحی، محمد رضا. (۱۴۰۳). مدل‌سازی شاخص‌های پایداری زنجیره تامین پتروشیمی و تعیین اولویت‌ها. *نشریه صنعت لاستیک ایران*، (۱۵): ۲۹-۷۰. doi: 10.22034/irm.2025.483450.1300
۳. زارعی محمودآبادی، محمد و ترک زبان، امیرمهدی. (۱۴۰۵). تحلیل و رتبه‌بندی عوامل کلیدی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی برای تحقق زنجیره تامین هوشمند و پایدار با رویکرد دیمتل. *فصلنامه حسابداری مدیریت راهبردی*، (۳): ۳۱-۱. doi: 10.22034/smajournal.2026.565578.1280
۴. متولی، علی؛ ممینی دهکردی علی و صادقی، حسین. (۱۴۰۱). فراترکیب رابطه بین اقتصاد چرخشی و اکوتوریسم کارآفرینانه، *مطالعات مدیریت گردشگری*، (۱۷): ۶۰: ۱۷۵-۱۴۵. DOI: 10.22054/tms.2023.68378.2728

ب: منابع انگلیسی:

5. Alsabt R, Alkhaldi W, Adenle YA, Alshuwaikhat HM (2024) **Optimizing waste management strategies through artificial intelligence and machine learning—An economic and environmental impact study.** *Clean Waste Syst* 8:100158.
6. Abyaneh, A. G., Ghanbari, H., Mohammadi, E., Amirsahami, A., & Khakbazan, M. (2025). **An Analytical Review of Artificial Intelligence Applications in Sustainable Supply Chains.** *Supply Chain Analytics*. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100173>.
7. Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M., & Saccani, N. (2018). **Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies.** *Sustainability*, 10(3), 639. <https://doi.org/10.3390/su10030639>.
8. Brynjolfsson, E., & McAfee, A. N. D. R. E. W. (2017). **The business of artificial intelligence.** *Harvard business review*, 7(1), 1-2.
9. Cha GW, Park CW, Kim YC (2024) **Optimal machine learning model to predict demolition waste generation for a circular economy.** *Sustainability* 16(16):7064.
10. Chand P, Assaf M (2024) **An empirical study on lightweight CNN models for efficient classification of used electronic parts.** *Sustainability* 16(17):7607
11. Das, S., Barve, A., Sahu, N. C., & Muduli, K. (2023). **Enabling artificial intelligence for sustainable food grain supply chains: an agri 5.0 and circular economy perspective.** *Operations Management Research*, 16(4), 2104-2124.
12. Farshadfar, Z., Mucha, T., & Tanskanen, K. (2024). **Leveraging Machine Learning for Advancing Circular Supply Chains: A Systematic Literature Review.** *Logistics*. <https://doi.org/10.3390/logistics8040108>
13. Furman, J., & Seamans, R. (2019). **AI and the Economy. Innovation policy and the economy**, 19(1), 161-191.

14. Genc O (2025) **Utilizing advanced language models to identify industrial symbiosis opportunities within the circular economy: capabilities and challenges.** Engineering, Construction and Architectural Management.
15. Genc O (2024) **Assessing the role of AI in advancing construction sector industrial symbiosis research: a comparative study of leading digital assistants.** *Environment, Development and Sustainability*, pp 1–24.
16. Geissdoerfer, M., Pieroni, M. P., Pigossob, D. C., & Soufania, K. (2020), **Circular business models: A review.** *Journal of Cleaner Production*. 277, 123741.
17. Ghobakhloo, M. (2020). **Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability.** *Journal of cleaner production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>.
18. Hudnurkar, M., Ambekar, S. S., & Bhattacharyya, N. (2024). **Deep learning-based detection and management of e-waste materials.** *Environmental Engineering and Management Journal*, 23(7), 1495–1505. <https://doi.org/10.30638/eemj.2024.122>.
19. Hong, Z., & Xiao, K. (2024). **Digital economy structuring for sustainable development: the role of blockchain and artificial intelligence in improving supply chain and reducing negative environmental impacts.** *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53760-3>.
20. Haenlein M, Kaplan A (2019) **A brief history of artificial intelligence: On the past, present, and future of artificial intelligence.** *Calif Manag Rev* 61(4):5–14.
21. Jabbour, C. J. C., Jabbour, A. B. L. de S., Filho, M. G., Roubaud, D., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Latan, H. (2019). **Industry 4.0 and the circular economy: A proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations.** *Annals of Operations Research*, 270, 273–286. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2772-8>.
22. Manganda AS, Sehnem S, Lara AC (2024) **Transition to the Circular Economy: Innovative and Disruptive Production Technologies Adopted by Agribusiness Startups.** *Environ Qual Manage* 34(1):e22293.
23. Mukherjee S, Nagariya R, Mathiyazhagan K, Baral MM, Pavithra MR, Appolloni A (2024) **Artificial intelligence-based reverse logistics for improving circular economy performance: a developing country perspective.** *Int J Logistics Manage.* <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2023-0102>.
24. Meyer, C., Cohen, D., & Nair, S. (2020). **From automats to algorithms: the automation of services using artificial intelligence.** *Journal of Service Management*, 31(2), 145-161.
25. Mukherjee S, Nagariya R, Mathiyazhagan K, Baral MM, Pavithra MR, Appolloni A (2024) **Artificial intelligence-based reverse logistics for improving circular economy performance: a developing country perspective.** *Int J Logistics Manage.* <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2023-0102>.

26. Nobre, G. C., & Tavares, E. (2017). **Scientific literature analysis on big data and Internet of Things applications on circular economy: A systematic and bibliometric analysis.** *Scientometrics*, 111, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2274-1>.
27. Percuoco, M., Ricciardi, I., Muto, V. et al. (2026). **The intersection of circular economy and artificial intelligence: a bibliometric review.** *SN Bus Econ* 6, 144. <https://doi.org/10.1007/s43546-026-01140-6>.
28. Pelligrino, G., & Rungi, A. (2022). **Artificial intelligence and circular economy: A systematic review of the literature.** *Business Strategy and the Environment*, 31(8), 3774–3795. <https://doi.org/10.1002/bse.3070>.
29. Raisch, S., & Krakowski, S. (2021). **Artificial intelligence and management: The automation–augmentation paradox.** *Academy of management review*, 46(1), 192-210.
30. Samuels, A. (2025). **Examining the integration of artificial intelligence in supply chain management from Industry 4.0 to 6.0: a systematic literature review.** *Frontiers in Artificial Intelligence*, 7. <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1477044>.
31. Suthagar KS, Mishra U (2024) **Sustainable green circular economic model with controllable waste and emission in healthcare system.** *Environment, Development and Sustainability*, pp. 1–43.
32. Shafique MN, Adeel U, Rashid A (2024) **The Synergy Between Industry 5.0 and Circular Economy for Sustainable Performance in the Chinese Manufacturing Industry.** *Sustainability* 16(22):9952.
33. Tutore, I., Parmentola, A., Di Fiore, M. C., & Calza, F. (2024). **A conceptual model of artificial intelligence effects on circular economy actions.** *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*. <https://doi.org/10.1002/csr.2827>
34. Tsolakis, N., Schumacher, R., Dora, M., & Kumar, M. (2023). **Artificial intelligence and blockchain implementation in supply chains: a pathway to sustainability and data monetisation?.** *Annals of operations research*, 327(1), 157-210