



فصلنامه علمی  
سال دهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۳۷، بهار ۱۴۰۴  
Vol. 10, No. 1 Issue No. 37  
Spring 2025, Quarterly  
صفحه ۵-۱۱

Iran Polymer Technology;  
Research and Development

## واژه‌های کلیدی:

توسعه پلیمرها،  
هوش مصنوعی،  
یادگیری ماشین،  
باز یافت پلیمرها،  
پلیمرهای سبز

# کاربرد فناوری هوش مصنوعی در توسعه پلیمرها

محسن نظریان\*، ستار حسن پور  
تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر

## چکیده ...

این مقاله به بررسی نقش هوش مصنوعی (Artificial Intelligence) در علم پلیمر پرداخته و اهمیت آن را در طراحی، تولید، کنترل کیفیت و پایداری برجسته کرده است. نشان داده شده است که الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی می‌تواند توسعه پلیمرها را متحول کرده و امکان مدلسازی و شبیه‌سازی دقیق برای بهینه‌سازی خواص و بهبود قابلیت تولید را فراهم سازد. استفاده از فنون یادگیری ماشین در شبیه‌سازی فرایندها، پایش لحظه‌ای و نگهداری پیش‌بینانه منجر به کاهش نقص، حداقل‌سازی ضایعات و افزایش بهره‌وری عملیاتی شده است. این مقاله همچنین مطالعاتی را مرور کرده است که به نقش هوش مصنوعی در بازیافت و مدیریت پسماند پرداخته و راهکارهای نوآورانه‌ای برای طراحی پلیمرهای بادوام و قابل بازیافت ارائه داده است که اصول اقتصاد چرخشی را تقویت می‌کند. هوش مصنوعی با پشتیبانی از توسعه پلیمرهای زیست‌پایه و زیست‌تجزیه‌پذیر، جایگزین‌های دوستدار محیط‌زیست برای کاربردهای مختلف از جمله بسته‌بندی و تجهیزات پزشکی ارائه داده است. این پژوهش بر اهمیت همکاری بین‌رشته‌ای برای بهره‌گیری از پتانسیل هوش مصنوعی تأکید کرده و نشان می‌دهد که چگونه این فناوری‌های پیشرفته می‌توانند تولید سبزتر، کاهش مصرف منابع و دستیابی به پایداری زیست‌محیطی را به همراه داشته باشند. این مقاله هوش مصنوعی را به‌عنوان رکن اساسی در تحول علم پلیمر معرفی کرده است.

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

Mohsen.Nazarian94@gmail.com

## ۱ مقدمه

در سال‌های اخیر، هوش مصنوعی (Artificial Intelligence) به یکی از مؤلفه‌های اصلی توسعه تبدیل شده و کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف، به‌ویژه در مهندسی مواد، به‌طرز چشمگیری افزایش یافته است. طراحی، تولید و بهینه‌سازی مواد پلیمری معمولاً فرایندی زمان‌بر و پرهزینه است که به‌شدت به تجربیات علمی و آزمایش‌های فیزیکی وابسته بوده است. برای پیش‌بینی رفتار و بهبود خواص پلیمرها اغلب از روش‌های تجربی استفاده می‌شده و پیش‌بینی رفتار مواد در شرایط مختلف تنها از طریق مدل‌سازی‌های سنتی انجام می‌گرفت که محدودیت‌های زیادی داشت.

اما امروزه با ورود هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین (Machine Learning)، پیش‌بینی می‌شود این رویکرد به‌طور بنیادین تغییر کند. اکنون، مدل‌های AI قادر به پیش‌بینی دقیق‌تر خواص مواد و شبیه‌سازی فرایندهای تولید در زمان بسیار کوتاه‌تری هستند. پیشرفت‌های اخیر در بسیاری از زمینه‌ها، از جمله طراحی پلیمرها، بهبود فرایندهای تولید و بهینه‌سازی پلیمرهای مهندسی و کارا، تحولی عظیم ایجاد کرده است. به‌عنوان مثال، استفاده از شبکه‌های عصبی (Neural Networks) در طراحی پلیمرها به طراحان این امکان را می‌دهد که ساختارهای مولکولی بهینه را برای کاربردهای خاص شناسایی کرده و به سرعت خواص آن‌ها را پیش‌بینی کنند، بدون آنکه نیاز به آزمایش‌های فیزیکی گسترده باشد [۱].

در مقایسه با روش‌های قدیمی، هوش مصنوعی قادر است به‌طور خودکار الگوهای پیچیده‌ای را شناسایی کند که به راحتی از دید انسان پنهان می‌مانند و این امر باعث تسریع در فرایند نوآوری و تولید مواد جدید با خواص منحصر به فرد می‌شود. علاوه بر این، AI نقش کلیدی در بهبود فرایندهای بازیافت و مدیریت پسماندهای پلیمری ایفا می‌کند که به نوبه خود از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی مزایای فراوانی دارد [۲].

در این راستا، پژوهش‌های اخیر به بررسی کاربردهای نوین AI در توسعه و بهینه‌سازی پلیمرها پرداخته و توانسته‌اند مسیر جدیدی را برای طراحی مواد با عملکرد بالا و سازگار با محیط‌زیست ایجاد کنند. در این پژوهش‌ها به‌عنوان نمونه در حوزه بسته‌بندی که یکی از زمینه‌های پراهمیت و پرکاربرد صنعت پلیمر است، هوش مصنوعی مدل‌هایی را ارائه می‌دهد تا به کمک آن بتوان موادی سازگار با محیط زیست را توسعه دهد. هوش مصنوعی در طراحی مواد، راه‌های نوآورانه‌ای را برای پیشرفت این حوزه فراهم کرده است. با استفاده از ابزارهایی مانند یادگیری ماشین و داده‌ورزی مواد، امکان تحلیل سریع و عمیق داده‌های پیچیده فراهم شده است بدین معنی که این

فناوری توانایی شناسایی روابط پنهان میان خواص و ساختار مواد را دارد و می‌تواند فرایند کشف و طراحی مواد جدید را تسریع کند [۳، ۴].

در این مقاله کوشش شده است تا دورنمایی از آینده علوم و فناوری مهندسی پلیمر با وجود AI بررسی شود. با توجه به رویکرد جهانی به لزوم ترویج اقتصاد سبز و نیاز به توسعه پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر و دوستدار محیط‌زیست و همچنین تلاش محققان برای وسعت دادن به گستره کاربرد پلیمرها و مواد کامپوزیتی بر پایه پلیمر و اهمیت آن، ابتدا به بررسی نقش هوش مصنوعی در طراحی و بهینه‌سازی پلیمرها پرداخته شده است و سپس کاربردهای آن در مدل‌سازی فرایندهای تولید و شبیه‌سازی دقیق‌تر بررسی شده است. همچنین اهمیت هوش مصنوعی در کنترل کیفیت و پایش لحظه‌ای فرایندهای تولید و نقش هوش مصنوعی در موضوع بازیافت و مدیریت پسماندهای پلیمری تحلیل شده است.

در نهایت به کاربردهای AI در طراحی مواد پلیمری سبز و زیست‌تخریب‌پذیر و چگونگی ارتقای آن‌ها برای سازگاری بیشتر با اصول اقتصاد محیط زیست محور یا اقتصاد چرخشی پرداخته شده است.

## ۱ طراحی و بهینه‌سازی مواد پلیمری با هوش مصنوعی

هوش مصنوعی توانایی بسیار بالایی در مدل‌سازی رفتار مواد پلیمری و پیش‌بینی خواص آن‌ها دارد.

لین و همکاران [۵] در پژوهشی تشریح کرده‌اند که چگونه یادگیری ماشین و داده‌های کلان باعث تحول در طراحی مواد پلیمری شده‌اند. روش ML به محققان کمک می‌کند تا پلیمرهای جدیدی را طراحی کنند که خواص بهینه‌تری دارند. این فرایند شامل ایجاد مدل‌هایی است که رابطه بین ساختار پلیمر و خواص آن را پیش‌بینی کرده، سپس با استفاده از داده‌های گسترده، پلیمرهای جدیدی را به‌صورت مجازی طراحی و غربالگری می‌کنند. چالش اصلی این است که پلیمرها ساختارهای پیچیده‌ای دارند و داده‌های با کیفیت کافی برای این مدل‌ها در دسترس نیست. برای حل این مشکل از روش‌های پیشرفته‌ای مثل شبکه‌های عصبی گرافی یا بهینه‌سازی بیزی استفاده می‌کنند که طراحی دقیق‌تر پلیمرها را فراهم می‌کنند. به بیان ساده‌تر این فناوری مانند موتور جستجوی هوشمند عمل می‌کند که در میان ترکیبات شیمیایی مختلف جستجو کرده و بهترین گزینه را برای تولید مواد پلیمری جدید ارائه می‌دهد. در شکل ۱ طرح‌واره‌ای از کارکرد ML در طراحی پلیمرها نشان داده شده است.

حوزه‌ی دیگری که در توسعه مواد جدید پلیمری به کمک هوش

توانسته است که فرایندهای تولید را با دقت بیشتری تحلیل کرده و به تولید پلیمرهایی با خواص خاص کمک کند. شبیه‌سازی‌هایی که مبتنی بر AI هستند، می‌توانند در طراحی فرایندهای تولید جدید و بهبود فرایندهای موجود نقش اساسی ایفا کنند. بهینه‌سازی در فرایندهایی مانند اکستروژن تک‌پیچ و دوپیچ و اکسترودرهای قالبگیری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوش مصنوعی انجام می‌شود [۸].

همانگونه که اشاره شد یکی از قابلیت‌های هوش مصنوعی، شبیه‌سازی فرایندهای تولید پلیمری، مانند فرایند اکستروژن است. در این حوزه نرم‌افزارهای سنتی با قابلیت‌های ویژه برای شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده تولید، ترکیب و شکل‌دهی پلاستیک طراحی شده و توانایی تحلیل رفتار مواد در طول فرایندهای مختلف را دارا هستند. به‌عنوان نمونه نرم‌افزار Lodovic می‌تواند برای پیش‌بینی اثرات دما، فشار و سرعت مواد در فرایند اکستروژن به کار رود و کمک کند تا شرایط بهینه تولید به‌طور دقیق مشخص شوند. فلیپه و همکاران در پژوهشی با ترکیب مدل‌سازی سنتی به کمک نرم‌افزار Ludovic و یادگیری ماشین، فرایند اکستروژن واکنشی را مدل‌سازی کرده‌اند. در این تحقیق یادگیری ماشین به‌عنوان ابزاری برای تصحیح پیش‌بینی‌های این مدل در شرایطی با داده‌های محدود عمل کرده است. این رویکرد نشان داده است که تلفیق هوش مصنوعی با شبیه‌سازی‌های کلاسیک می‌تواند پیش‌بینی‌های دقیق‌تری در مهندسی مواد پلیمری ارائه کند. یادگیری ماشین و شبیه‌سازی‌های پیشرفته نقش کلیدی در طراحی فرایندهای تولید دارد. استفاده از مدیریت داده‌ها، تحلیل پیشرفته و کنترل فرایند با یادگیری ماشین می‌تواند طراحی فرایندهای پیچیده پلیمری، نظیر اکستروژن و پیش‌بینی خواص مواد را بهینه‌سازی کند [۹].

نقش فناوری‌های نوین در شبیه‌سازی تولید به ویژه فرایند اکستروژن منجر به بهینه‌سازی انرژی و زمان، گسترش دامنه پلیمرهای قابل شکل‌دهی با تأکید بر پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر و توسعه بازیافت پلیمرها شده است [۱۰].

یکی از زمینه‌های کاری مهم در علوم مهندسی پلیمر که در سال‌های اخیر توجه محققان را به خود جلب کرده است توسعه چاپ‌گرهای سه‌بعدی بوده است. تلفیق هوش مصنوعی و دانش و فناوری چاپ‌گرهای سه‌بعدی از فرایند طراحی انتخاب یا دستیابی به مواد مناسب تا تولید و کیفیت قطعه تولیدی موجب پیشرفت و بهینه‌سازی این حوزه شده است. آنچه در این حوزه حائز توجه بوده مواردی از قبیل:

الف) مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار مواد

یادگیری ماشین می‌تواند از داده‌های مربوط به خواص مکانیکی،



شکل ۱ طرح‌واره‌ای از کاربرد ML در طراحی پلیمرها نشان داده شده است. [۵].

مصنوعی به‌ویژه در طراحی و بهینه‌سازی نانوکامپوزیت‌ها اهمیت زیادی پیدا کرده است، استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی برای پیش‌بینی رفتار ترکیبات پلیمری بوده است. برای مثال، برنامه‌های شبیه‌سازی مانند Materials Studio قادرند رفتار نانوکامپوزیت‌ها را تحت شرایط مختلف شبیه‌سازی کنند و خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی آن‌ها را پیش‌بینی کنند. این برنامه‌ها به‌ویژه در طراحی پلیمرهای مهندسی و نانوکامپوزیت‌ها به کار می‌روند تا اثر ترکیب نانوذرات با ماتریس‌های پلیمری را شبیه‌سازی کنند و به نتایج دقیق‌تری برای پیش‌بینی رفتار مواد دست یابند. در همین راستا فرزین و همکاران [۶] نشان داده‌اند که چگونه شبیه‌سازی‌های پیشرفته می‌توانند به درک روابط بین ابعاد نانوذرات و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها کمک کنند. خنکدار و همکاران [۷] نشان داده‌اند که چگونه ترکیب آزمایش‌های تجربی و روش‌های پیشرفته مانند یادگیری ماشین، به ویژه الگوریتم XGBoost، می‌تواند در پیش‌بینی خواص پیچیده نانوکامپوزیت‌های پلیمری موثر باشد. نتایج این پژوهش، نقش مهم یادگیری را در پیش‌بینی گرانیوی کمپلکس (Com-plex Viscosity) و بررسی اثر توزیع نانوذرات در خواص رئولوژیکی و رسانایی الکتریکی مواد نشان داده است.

بنابراین هوش مصنوعی می‌تواند برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی ترکیب‌ها و ساختار نانوکامپوزیت‌ها بر اساس داده‌های تجربی و شبیه‌سازی‌ها استفاده شود. شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند برای پیش‌بینی خواص ترکیب‌های مختلف نانوذرات و ماتریس‌های پلیمری آموزش ببینند. این سامانه‌ها قادرند بهترین ترکیب برای خواص موردنظر مانند استحکام کششی، مقاومت در برابر دما و قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری را شناسایی کنند.

## ۲ مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایندهای تولید پلیمری با هوش مصنوعی

هوش مصنوعی در این حوزه از طریق مدل‌های پیش‌بینی‌گر،

وکاهش ضایعات تبدیل شده است. استفاده از فناوری هوش مصنوعی، شامل الگوریتم‌های یادگیری ماشین و سامانه‌های بینایی رایانه‌ای، امکان رصد کردن و کنترل لحظه‌ای تولید و ثبت و ارسال گزارش‌های لازم را فراهم کرده است [۱۴].

### مزایای استفاده از هوش مصنوعی در کنترل کیفیت تولید

الف) تشخیص عیوب در زمان واقعی

دوربین‌های هوشمند و الگوریتم‌های پیشرفته AI امکان شناسایی فوری و دقیق عیوبی مانند ترک‌ها و نقص‌های سطحی را فراهم می‌کند. به عنوان نمونه این فناوری در تولید لوله‌های پلیمری با دقتی در حدود ۹۹/۲۴ درصد و زمان پاسخگویی ۲۰ میلی ثانیه عملکرد بسیار عالی دارد. همچنین الگوریتم‌های AI در طراحی فرایندهای کنترل کیفیت برای لوله‌های پلیمری با حسگرهای عصبی به کار می‌روند. این حسگرها می‌توانند ویژگی‌هایی مانند ضخامت، استحکام کششی و مقاومت به ترک خوردگی را به طور لحظه‌ای اندازه‌گیری کنند و داده‌ها را به سامانه هوش مصنوعی ارسال کنند. سپس، سامانه با تحلیل داده‌ها، نواقص موجود در تولید را شناسایی کرده و به طور آنی پیشنهادات اصلاحی ارائه می‌دهد [۱۵].

ب) کاهش وابستگی به نیروی انسانی، کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی

هوش مصنوعی همچنین می‌تواند در طراحی نمونه‌برداری آماری برای بهبود فرایند کنترل کیفیت کمک کند. الگوریتم‌های AI می‌توانند به طور خودکار انتخاب نمونه‌ها را براساس داده‌های پیشین انجام دهند و با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی‌گر، نواقص را شناسایی کنند. به این ترتیب، می‌توان از هدررفت مواد جلوگیری کرد و کیفیت محصول را بهبود بخشید. این نوع کنترل کیفیت به‌ویژه در تولیدات مقیاس بالا که نظارت دقیق به صورت

ترکیبات شیمیایی و رفتار فراوری مواد استفاده کرده، پیش‌بینی کند که چگونه یک ماده زیست‌تخریب‌پذیر خاص در شرایط مختلف فرایندی یا کاربردی رفتار خواهد کرد. این پیش‌بینی‌ها به مهندسان تولید این امکان را می‌دهد تا موادی را انتخاب یا اصلاح کنند که برای چاپ‌گرهای سه‌بعدی مناسب‌تر باشند.

ب) بهینه‌سازی فرایندهای چاپ

با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، عواملی نظیر دما، سرعت اکستروژن و روش‌های خنک‌کاری می‌توانند بهینه شوند تا سازگاری فرایند چاپ با مواد زیست‌تخریب‌پذیر تضمین شود. این کار باعث می‌شود که محصولات نهایی از نظر استحکام ساختاری و کارایی بهبود یابند.

ج) تشخیص عیوب و اصلاح آن

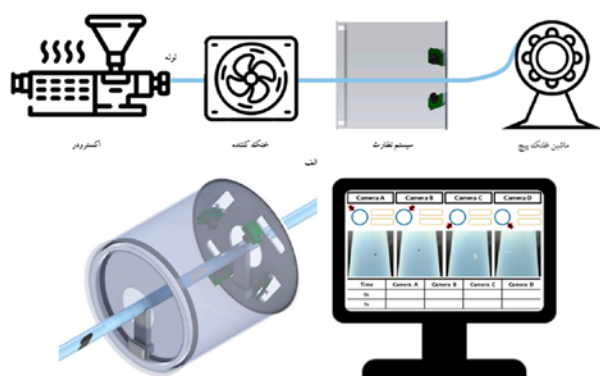
در فرایند چاپ، یادگیری ماشین می‌تواند از داده‌های حسگرها و تصاویر استفاده کند تا عیوبی نظیر ترک‌ها، ناپیوستگی‌ها و ناهمگنی‌ها را شناسایی و هشدار یا پیشنهاد اصلاح بدهد.

د) شبیه‌سازی رفتار محصول نهایی

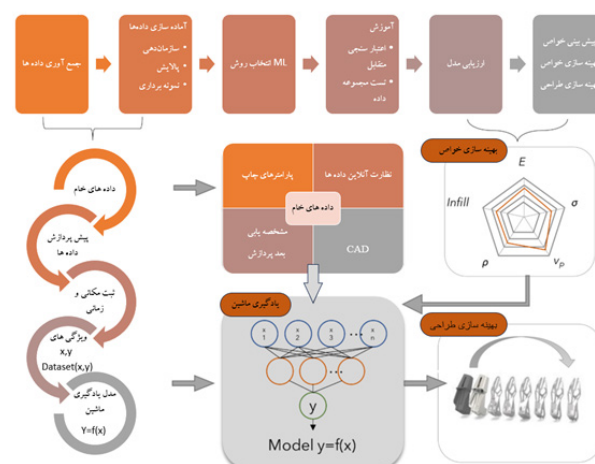
یادگیری ماشین می‌تواند رفتار محصول نهایی تحت تنش‌های محیطی از قبیل دما، فشار و رطوبت را شبیه‌سازی کند. این قابلیت باعث شده است تا مواد طراحی شده بتوانند در کاربردهای واقعی مانند کاشتنه‌های پزشکی یا بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر که کاربردهای نهایی آن بسیار حساس و حائز اهمیت است، بهتر عمل کنند [۱۱-۱۳].

## ۳ کنترل کیفیت و پایش لحظه‌ای در فرایندهای تولید پلیمری

در محیط‌های تولید نوین، به‌ویژه در صنایع پلیمری کنترل کیفیت در زمان واقعی به یکی از عوامل کلیدی برای تضمین کارایی



شکل ۳ طرح‌واره‌ای از سامانه رصد کردن و کنترل تولید لوله کیفیت (الف) خط تولید و شناساگرهای هوش مصنوعی (ب) ارسال گزارش لحظه‌ای از عیوب شناسایی‌شده [۱۵].



شکل ۲ تأثیر ML بر چاپ سه‌بعدی [۱۱].

نقش مهمی ایفا کند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق می‌توانند به شبیه‌سازی فرایندهای بازیافت و بهینه‌سازی آن‌ها کمک کنند. به عنوان مثال، با استفاده از AI، می‌توان انواع مختلف پلاستیک‌ها را به طور دقیق از هم تفکیک کرده و فرایند بازیافت شیمیایی آن‌ها را بهینه کرد. این سامانه‌ها می‌توانند بازیافت پلیمرها را به طور دقیق پیش‌بینی کنند و به کاهش هدررفت و افزایش بهره‌وری کمک کنند [۲، ۱۷].

#### ۴-۲ اقتصاد چرخشی و طراحی پایدار با هوش مصنوعی

هوش مصنوعی می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی مواد سبز و پایدار کمک کند و فرایندهای تولید مبتنی بر اقتصاد چرخشی را بهبود بخشد. این سامانه‌ها می‌توانند به طور دقیق تر ویژگی‌های مواد و فرایندها را تجزیه و تحلیل کنند و پلیمرهایی طراحی کنند که از نظر زیست‌محیطی سازگارتر و قابل بازیافت‌تر باشند. شاهرخ و همکاران در پژوهشی بر ادغام هوش مصنوعی در فناوری تولید پلیمرهای سبز تأکید کرده‌اند و از طریق مطالعه موردی نشان داده‌اند که چگونه این فناوری می‌تواند در بهینه‌سازی مصرف مواد، کاهش ضایعات و ساده‌سازی زنجیره‌های تأمین کمک کند. همچنین به چالش‌های اخلاقی و اجتماعی استفاده از هوش مصنوعی در صنعت اشاره می‌کند و بر لزوم مدیریت هوشمندانه و مسئولانه آن تأکید دارد [۱۸].

#### ۴-۳ بازیافت شیمیایی پلیمرها با استفاده از هوش مصنوعی

هوش مصنوعی می‌تواند در شبیه‌سازی واکنش‌های شیمیایی

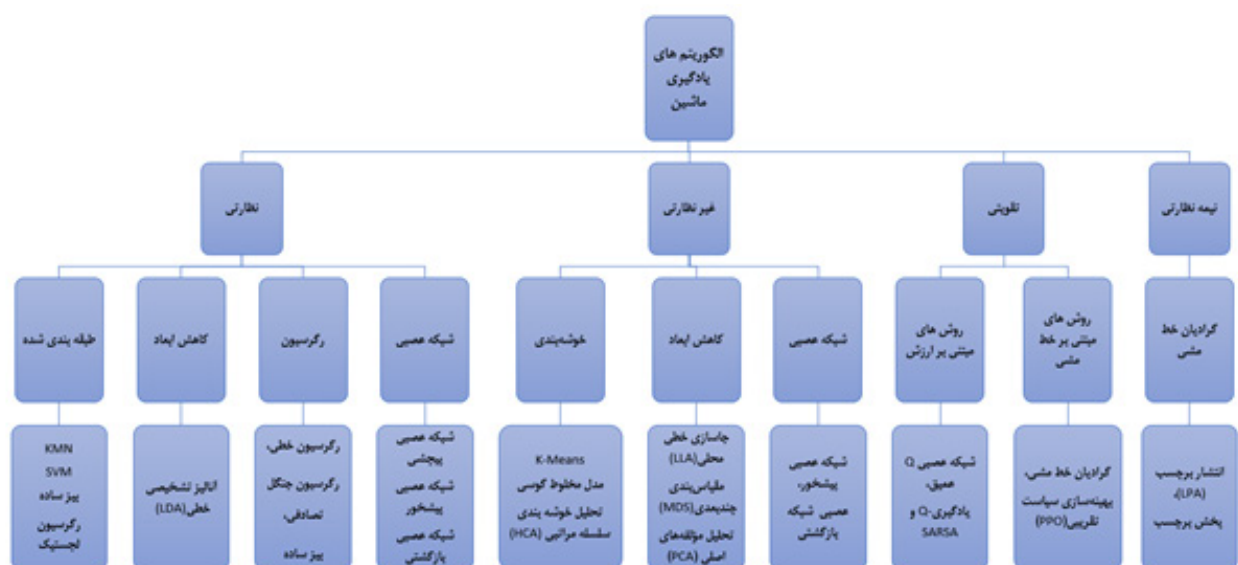
دستی دشوار است، بسیار کارآمد است کاربرد هوش مصنوعی در کنترل کیفیت تولید می‌تواند محدودیت ناشی از کاهش توانایی‌های دیداری کارکنان در این بخش را جبران کند [۳، ۱۴]. کنترل کیفیت مبتنی بر هوش مصنوعی نه تنها کیفیت محصولات را تضمین می‌کند، بلکه به واسطه کاهش ضایعات و مصرف انرژی، فرایند تولید را از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی پایدار می‌کند [۱۶].

#### ۴-۴ ایده‌های اقتصاد سبز و نقش هوش مصنوعی در آن

اقتصاد چرخشی به عنوان رویکردی نوآورانه برای کاهش ضایعات و استفاده بهینه از منابع، اهمیت فزاینده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده است. در این مدل، چرخه تولید به گونه‌ای طراحی شده است که مصرف منابع کاهش یابد و محصولات در پایان عمر خود به چرخه تولید بازگردانده شوند. در این میان، هوش مصنوعی به عنوان ابزاری کلیدی برای پیاده‌سازی اصول اقتصاد چرخشی شناخته شده است. از شبیه‌سازی زنجیره تأمین و بهینه‌سازی بازیافت تا طراحی مواد پایدار، الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند بهره‌وری و کارایی این رویکرد را افزایش دهند. در این بخش به بررسی نقش هوش مصنوعی در تسهیل و تسریع پیاده‌سازی ایده‌های اقتصاد چرخشی پرداخته شده است.

#### ۴-۱ بازیافت و مدیریت پسماند پلیمری با استفاده از هوش مصنوعی

هوش مصنوعی می‌تواند در حل مشکل مدیریت پسماند پلیمرها



شکل ۴ الگوریتم‌های ML مورد استفاده در مدیریت بازیافت [۱۷].

مصنوعی نه تنها توسعه پلیمرهای زیستی و زیست تخریب پذیر را تسریع می کند بلکه با بهبود روش های بازیافت و سامانه های بهینه استفاده از منابع، پیاده سازی اصول اقتصاد چرخشی را تسهیل می کند.

علاوه بر این، این تحقیق بر اهمیت همکاری بین رشته ای میان متخصصان هوش مصنوعی و دانشمندان مواد تأکید دارد و بر لزوم ایجاد چارچوبی جامع برای مقابله با چالش های فنی، اقتصادی و محیطی تأکید می کند. در حالی که هوش مصنوعی اثربخشی خود را در دستیابی به اهداف پایداری جهانی نشان داده است، پذیرش آن نیازمند چارچوب های قانونی قوی و ملاحظات اخلاقی است تا از پیاده سازی مسئولانه و متعادل آن اطمینان حاصل شود.

نتایج ارائه شده پایه ای برای تحقیقات آینده در زمینه کاربردهای گسترده تر هوش مصنوعی در علم پلیمرها و صنایع مرتبط فراهم می آورد. با بهره گیری از هم افزایی بین روش های پیشرفته محاسباتی و نوآوری های مواد، می توان مسیری به سوی آینده ای پایدار، کارآمد و مسئولانه در تولید پلیمرها ترسیم کرد.

بازیافت پلیمرها کمک کند و فرایندهای بازیافت شیمیایی را به طور مؤثری بهینه سازی کند. این سامانه ها می توانند بهترین شرایط بازیافت را پیش بینی کرده و فرایندهای شیمیایی و افسپارش (Depolymerization) را با دقت بیشتری شبیه سازی کنند. در پژوهشی کرن و همکاران رویکردی مبتنی بر هوش مصنوعی را برای طراحی پلیمرهایی با پلیمری شدن حلقه گشا (Ring-Opening Polymerization) با قابلیت بازیافت شیمیایی و دوام بالا مورد بررسی قرار داده اند. مدل های یادگیری ماشین برای پیش بینی خواص حرارتی، ترمودینامیکی و مکانیکی این پلیمرها که برای عملکرد خاص و قابل بازیافت حیاتی، استفاده می شوند [۱۹].

### نتیجه گیری

این مطالعه قابلیت تحول آفرین هوش مصنوعی در علم پلیمرها را به ویژه در پیشبرد فرایندهای تولید پایدار و کارآمد برجسته می کند. با ادغام روش های مبتنی بر هوش مصنوعی در طراحی مواد، بهینه سازی فرایندها و کنترل کیفیت، صنایع می توانند عملکرد، قابلیت بازیافت و سازگاری محیطی مواد پلیمری را به طور چشمگیری ارتقا دهند. یافته ها نشان می دهند که هوش



## مراجع

1. Tran H., Gurnani R., Kim C., Pilia G., Kwon H.K., Lively R.P. and Ramprasad R., Design of Functional and Sustainable Polymers Assisted by Artificial Intelligence, *Nature Reviews Materials*, 9, 866-886, **2024**.
2. Lase I.S., Tonini D., Caro D., Albizzati P.F., Cristóbal J., Roosen M., Kusenbergh M., Ragaert K., Van Geem K.M., Dewulf J. and De Meester S., How Much Can Chemical Recycling Contribute to Plastic Waste Recycling in Europe? An Assessment Using Material Flow Analysis Modeling, *Resources, Conservation and Recycling*, 192, 106916, **2023**.
3. Yakoubi S., Sustainable Revolution: AI-Driven Enhancements for Composite Polymer Processing and Optimization in Intelligent Food Packaging, *Food and Bioprocess Technology*, 18, 82-107, **2024**.
4. Badini S., Regondi S. and Pugliese R., Unleashing the Power of Artificial Intelligence in Materials Design, *Materials*, 16, 5927, **2023**.
5. Gao L., Jiaping L., Liquan W. and Lei D., Machine Learning-Assisted Design of Advanced Polymeric Materials, *Accounts of Materials Research*, 5, 571-584, **2024**.
6. Zarei A. and Farazin A., Machine Learning Insights into the Influence of Carbon Nanotube Dimensions on Nanocomposite Properties: A Comprehensive Exploration, *Journal of Computational Applied Mechanics*, 55, 462-472, **2024**.
7. Estaji S., Akbari H., Tayouri M.I., Miri F.S., Salahshoori I., Ruckdaschel H., Dawi E.A. and Khonakdar H.A., Development of Microstructure-Rheological and Electrical Properties Relationship in PS/POE/HNTs Blend Nanocomposites Using Machine Learning, *Polymer Testing*, 108, 108503, **2024**.
8. Gaspar-Cunha A., Covas J.A. and Sikora J., Optimization of Polymer Processing: A Review (Part I—Extrusion), *Materials*, 15, 384, **2022**.
9. Panesar A., Carollo V. and Jamal M., Simulation-Driven Design and the Role of Optimization in Design for Additive Manufacturing, *Additive Manufacturing Design and Applications*, 24, 138-158, **2023**.
10. Edeleva M., De Smit K., Debie S., Verberckmoes A., Marien Y.W. and D'hooge D.R., Molecular Scale-driven Upgrading of Extrusion Technology for Sustainable Polymer Processing and Recycling, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 43, 100848, **2023**.
11. Dananjaya S.A.V., Chevali V.S., Dear J.P., Potluri P. and Abeykoon C., 3D Printing of Biodegradable Polymers and their Composites—Current State-of-the-Art, Properties, Applications, and Machine Learning for Potential Future Applications, *Progress in Materials Science*, 146, 101336, **2024**.
12. Sani A.R., Zolfagharian A. and Kouzani A.Z., Artificial Intelligence-Augmented Additive Manufacturing: Insights on Closed-Loop 3D Printing, *Advanced Intelligent Systems*, 6, 2400102, **2024**.
13. Mahmood M.A., Visan A.I., Ristoscu C. and Mihailescu I.N., Artificial Neural Network Algorithms for 3D Printing, *Materials*, 14, 163, **2020**.
14. Srivastava S., Varshney B., Sharma V.P. and Ali B., Applications of Artificial Intelligence in Polymer Manufacturing, *Application of Artificial Intelligence in New Materials Discovery*, 147, 105-122, **2023**.
15. Jo C.M., Jang W.K., Seo Y.H. and Kim B.H., In Situ Surface Defect Detection in Polymer Tube Extrusion: AI-Based Real-Time Monitoring Approach, *Sensors*, 24, 1791, **2024**.
16. Dananjaya S.A.V., Chevali V.S., Dear J.P., Potluri P. and Abeykoon C., 3D Printing of Biodegradable Polymers and their Composites—Current State-of-the-Art, Properties, Applications, and Machine Learning for Potential Future Applications, *Progress in Materials Science*, 146, 101336, **2024**.
17. Lubongo C., Bin Daej M.A. and Alexandridis P., Recent Developments in Technology for Sorting Plastic for Recycling: The Emergence of Artificial Intelligence and the Rise of the Robots, *Recycling*, 9, 59, **2024**.
18. Lodhi S.K., Gill A.Y. and Hussain H.K., Green Innovations: Artificial Intelligence and Sustainable Materials in Production, *BULLET: Jurnal Multidisiplin Ilmu*, 3, 492-507, **2024**.
19. Atasi C., Kern J. and Ramprasad R., Design of Recyclable Plastics with Machine Learning and Genetic Algorithm, *Journal of Chemical Information and Modeling*, 64, 9249-9259, **2024**.

