



هوش مصنوعی، اهرمی در مدیریت پسماند آزمایشگاه‌ها

فروغ سبزواریان دزفولی^۱، امیر حسین دوامی^{۲*}، محمد ایمن پناه^۳

۱- گروه محیط زیست و HSE، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۲- گروه محیط زیست و HSE، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۳- کارشناس ارشد رشته HSE، دانشگاه علم و هنر یزد، یزد، ایران.

*ایمیل نویسنده مسول: a.davami@iau.ac.ir

چکیده

مدیریت پسماند در آزمایشگاه‌ها، به‌ویژه در مراکز تحقیقاتی و محیط‌های زیستی حساس، به‌دلیل ماهیت چندگانه، خطرات بالقوه، و پیچیدگی ترکیبات مصرفی، مستلزم توسعه راهکارهای نوین و فناوری‌محور است. هوش مصنوعی (AI) با به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و تحلیل داده‌های بزرگ (Big Data Analytics) پتانسیل ارتقاء فرآیندهای مدیریت پسماند، از مرحله تولید تا دفع نهایی، را فراهم ساخته است. این پژوهش، با مرور نظام‌مند منابع موجود، به تحلیل ظرفیت‌ها و چالش‌های کاربرد AI در بهینه‌سازی مدیریت پسماند آزمایشگاهی می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهد که ادغام فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیاء (IoT)، سامانه‌های تصمیم‌یار (DSS)، و مدل‌های توضیح‌پذیر هوش مصنوعی (XAI)، می‌تواند دقت پیش‌بینی، ایمنی فرآیندها و کارایی زیست‌محیطی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. با این حال، چالش‌هایی چون فقدان داده‌های ساختاریافته، محدودیت در زیرساخت‌های فناوری، و موانع فرهنگی در پذیرش فناوری‌های نوین، به‌عنوان موانع کلیدی شناسایی شده‌اند. توسعه زیرساخت‌های داده‌محور، استانداردسازی پروتکل‌های جمع‌آوری داده، و یکپارچه‌سازی سامانه‌های هوشمند در سطوح عملیاتی، از جمله راهبردهای پیشنهادی برای بهبود مدیریت پسماند در این حوزه است. نتایج این تحقیق بر نقش کلیدی هوش مصنوعی در ارتقاء ایمنی، پایداری و کارایی عملیاتی آزمایشگاه‌ها تأکید می‌کند.

کلمات کلیدی: هوش مصنوعی، مدیریت پسماند، پسماند آزمایشگاهی، محیط زیست، ایمنی زیستی.

۱- مقدمه

۱-۱- پسماند آزمایشگاهی و چالش‌های زیست محیطی و ایمنی

در چارچوب نظام HSE^۱، مدیریت پسماندهای آزمایشگاهی یک بخش حیاتی از "ایمنی شیمیایی" و "ایمنی زیستی" به‌شمار می‌رود. فرایند مدیریت پسماند باید به نحوی طراحی شود که کمترین خطر برای کارکنان و محیط‌زیست ایجاد گردد. از منظر ایمنی، هر پسماند باید با در نظر گرفتن ماهیت، خطرات همراه، و واکنش‌های احتمالی شناسایی و مدیریت شود. از منظر بهداشت حرفه‌ای، مخاطرات بیولوژیکی و تماس‌های پوستی یا تنفسی با مواد خطرناک باید کاهش یابد. در این مسیر، آموزش پرسنل، تأمین تجهیزات



حفاظت فردی (PPE)^۱ و تدوین رویه‌های استاندارد عملیاتی (SOP)^۲ نقش مهمی در کاهش حوادث دارند. هوش مصنوعی می‌تواند با تحلیل داده‌های ایمنی، تشخیص نقاط ضعف و پیش‌بینی شرایط بحرانی به تقویت این سیستم کمک کند [۱، ۲].

پسماندها اگر به درستی مدیریت نشوند، می‌توانند منبع آلودگی گسترده‌ای برای خاک، آب و هوا باشند. مواد شیمیایی، فلزات سنگین، مواد زیستی و پاتولوژیک، می‌توانند در صورت رهاسازی غیراصولی، وارد زنجیره غذایی شوند و سلامت انسان، جانوران و اکوسیستم‌ها را تهدید کنند. علاوه بر خطرات فیزیکی، آلودگی‌های میکروبی و بیولوژیکی حاصل از پسماند آزمایشگاهی می‌تواند بیماری‌زا و حتی کشنده باشد. از این رو مدیریت پسماند به‌عنوان بخشی از استراتژی‌های کلان توسعه پایدار، جایگاه مهمی در سیاست‌گذاری‌ها و دستورالعمل‌های بهداشتی و زیست‌محیطی دارد. پیشگیری از آلودگی، کاهش حجم پسماند، افزایش بازیافت، و شفاف‌سازی زنجیره مدیریت از جمله اهداف کلیدی در این حوزه هستند که با ابزارهای هوشمند قابل بهینه‌سازی می‌باشند [۳، ۴].

پسماندهای آزمایشگاهی از منظر نوع، ترکیب، خطر و روش دفع با سایر پسماندها تفاوت چشمگیری دارند. این پسماندها شامل مواد شیمیایی خطرناک، معرف‌های بیولوژیکی، شیشه‌های آلوده، فلزات سنگین، سرنگ‌ها، پسماندهای دارویی و گاهی ترکیبات رادیواکتیو هستند. دسته‌بندی این پسماندها بر اساس استانداردهایی چون GHS^۳ و کدهای UN^۴ انجام می‌شود و معمولاً به دو دسته خطرناک و غیرخطرناک تقسیم می‌گردند. در برخی کشورها نیز دسته‌های خاصی مانند پسماندهای زیستی قابل انتقال، پسماندهای تیز و بُرنده، و پسماندهای آتش‌زا به‌طور مجزا بررسی می‌شوند. دسته‌بندی دقیق و صحیح نقش کلیدی در تعیین روش نگهداری، حمل و دفع دارد و کوچک‌ترین اشتباه می‌تواند موجب آسیب جدی به پرسنل و محیط‌زیست شود [۴-۶].

مواد شیمیایی مانند فرمالدهید، فنول، اسیدها و بازهای قوی، در صورت نشت یا دفع نادرست، می‌توانند منجر به آلودگی منابع آبی و خاکی شوند. همچنین، ضایعات زیستی مانند نمونه‌های باکتریایی، خون و مواد ژنتیکی، در صورت انتقال ناخواسته، می‌توانند ناقل بیماری‌های عفونی باشند. خطرات ناشی از ترکیب تصادفی مواد ناسازگار نیز وجود دارد که ممکن است منجر به انفجار یا تولید گازهای سمی شود [۷، ۸]. پرسنل آزمایشگاه، کارکنان دفع پسماند و حتی جامعه اطراف، در معرض این خطرات قرار دارند. عدم رعایت استانداردهای مدیریت پسماند در کشورهای در حال توسعه منجر به آلودگی‌های پایدار، شیوع بیماری‌ها و نارضایتی‌های اجتماعی شده است. بنابراین، به‌کارگیری سیستم‌های هوشمند در شناسایی، هشداردهی، و پیگیری فرایندهای مدیریت پسماند آزمایشگاهی از اهمیت بالایی برخوردار است [۷، ۹، ۱۰].

۱-۲- افزایش حجم پسماند در پژوهش‌ها و آزمایشگاه‌ها

با گسترش پژوهش‌های علمی و افزایش تعداد آزمایشگاه‌های تحقیقاتی و صنعتی حجم پسماند‌های تولیدی به صورت قابل توجهی افزایش یافته است، که این امر نیازمند راهکارهای نوین مدیریتی برای کنترل آنهاست. مدیریت سنتی پسماند عموماً مبتنی بر نیروی انسانی، ثبت کاغذی داده‌ها و فرایندهای ایستا و غیرپویاست. این روش‌ها اغلب با عدم دقت در جداسازی، ضعف در ردگیری پسماند، هزینه‌های بالای نگهداری و خطاهای انسانی همراه‌اند. در آزمایشگاه‌ها، این چالش‌ها بیشتر خود را نشان می‌دهند چراکه دسته‌بندی نادرست ممکن است به آلودگی‌های جدی یا واکنش‌های شیمیایی خطرناک منجر شود. علاوه بر این، داده‌های مرتبط با تولید، نوع، میزان و ترکیب پسماند اغلب مستندسازی مناسبی ندارند و قابلیت تحلیل ندارد. در این میان، نبود سازوکارهای هوشمند و عدم اتصال بین واحدهای مختلف درون یک آزمایشگاه یا بین چند آزمایشگاه، مانعی اساسی برای مدیریت اثربخش است. هوش مصنوعی می‌تواند با ارائه سامانه‌های دیجیتال و خودکارسازی تصمیم‌گیری، به این چالش‌ها پاسخ دهد [۵، ۱۱، ۱۲].

1 Personal Protective Equipment
2 Standard Operating Procedure
3 Globally Harmonized System
4 United Nations



۱-۳- ظهور فناوری های نوین و نقش هوش مصنوعی در بهینه سازی فرآیند مدیریت پسماند

در حوزه های صنعتی و زیست محیطی، هوش مصنوعی به عنوان ابزاری قدرتمند برای بهینه سازی عملیات، پیش بینی رفتار سیستم ها، و کاهش منابع مصرفی و خطاهای انسانی شناخته می شود. کاربرد AI^۱ در سال های اخیر به دلیل دسترسی گسترده به داده ها و پیشرفت های سخت افزاری رشد چشمگیری داشته است. این ویژگی ها آن را به یک ابزار راهبردی در مسائل پیچیده ای مانند مدیریت پسماند و پساب تبدیل کرده است، جایی که تعامل میان عوامل متعدد مانند نوع ماده، شرایط دفع، مقررات ایمنی و محیط زیستی مطرح است [۹، ۱۳].

ریشه های توسعه هوش مصنوعی به دهه ۱۹۵۰ میلادی بازمی گردد؛ جایی که نخستین نظریه ها درباره شبیه سازی عملکرد ذهن انسان توسط ماشین ها مطرح شد. از آن زمان تاکنون، AI مسیر تکاملی متنوعی را طی کرده است. در دهه های اخیر، با ظهور قدرت های پردازشی بالا و پایگاه های داده بزرگ (Big Data) الگوریتم های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به شکل موثری وارد مرحله کاربردی شده اند. پیشرفت های اخیر در الگوریتم های CNN^۲، RNN^۳ و مدل های زبانی پیشرفته موجب شده اند تا سیستم های هوشمند بتوانند با دقت بالا وظایف پیچیده را انجام دهند. در زمینه محیط زیست، از این تحولات برای شناسایی آلودگی، پیش بینی تولید زباله، بهینه سازی انرژی، و کنترل سیستم های دفع پسماند استفاده شده است. این رشد سریع، امکان سنجی کاربرد AI را در حوزه هایی همچون مدیریت پسماندهای آزمایشگاهی - که پیچیدگی و حساسیت بالایی دارند - افزایش داده است [۵، ۱۴].

هوش مصنوعی توانسته در چند سال اخیر در پروژه های مدیریت محیط زیست و منابع، نقش چشمگیری ایفا کند. به عنوان مثال، الگوریتم های دسته بندی تصویر برای تشخیص خودکار نوع پسماند در خطوط بازیافت، سامانه های پیش بینی کننده تولید ضایعات در کارخانه ها و سامانه های تصمیم یار در انتخاب روش های دفع یا بازیافت در شهرهای هوشمند از جمله کاربردهای موفق AI بوده اند [۱۵]. همچنین در صنایع نفت و گاز و صنایع شیمیایی، مدل های یادگیری ماشین برای کاهش ضایعات تولیدی، جلوگیری از نشت مواد خطرناک و بهینه سازی عملیات استفاده شده اند [۱۶]. در حوزه پزشکی، AI در پایش مصرف مواد شیمیایی و زیستی و مدیریت پساب های عفونی کمک کرده است. این تجربیات عملی نشان می دهند که کاربردهای مشابه می توانند به شکل مؤثری در محیط های پیچیده آزمایشگاهی که با انواع پسماندهای ترکیبی مواجهه اند، پیاده سازی شوند [۱۷].

در این میان، هوش مصنوعی با توانایی های خود در حوزه هایی مانند یادگیری ماشین، بینایی ماشین، تحلیل داده های حجیم و استفاده از اینترنت اشیا، افق های نوینی برای رفع این چالش ها گشوده است. الگوریتم های یادگیری ماشین می توانند با پیش بینی میزان تولید پسماند و طبقه بندی خودکار انواع ضایعات، دقت و سرعت عملیات را افزایش دهند. همچنین فناوری بینایی ماشین امکان شناسایی تصویری خودکار زباله ها را فراهم می کند و تحلیل های مبتنی بر داده، الگوهای مصرف و تولید ضایعات را نمایان می سازد. در کنار این فناوری ها، حسگرهای هوشمند و اینترنت اشیا می توانند به پایش مستمر مخازن، شناسایی نشت ها و ارزیابی کیفیت پساب کمک کنند و بستری برای تصمیم گیری دقیق تر فراهم آورند [۱۲، ۱۸، ۱۹].

۱-۴- بررسی کاربرد های AI در مدیریت پسماند آزمایشگاهی

با توجه به رشد روزافزون تولید پسماندهای شیمیایی و زیستی در آزمایشگاه های تحقیقاتی و آموزشی، و چالش های مرتبط با جمع آوری، دسته بندی، ذخیره سازی و دفع ایمن این پسماندها، هدف اصلی این مطالعه مروری، تحلیل و تبیین ظرفیت ها و کارکردهای فناوری هوش مصنوعی به عنوان ابزاری مؤثر در بهینه سازی مدیریت پسماند آزمایشگاهی است.

^۱ Artificial Intelligence

^۲ Convolutional Neural Network

^۳ Recurrent Neural Network



این پژوهش در تلاش است تا از خلال بررسی مقالات منتخب و مطالعات کاربردی، روندهای نوین در استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در چرخه شناسایی، طبقه‌بندی، پیش‌بینی تولید پسماند و انتخاب مسیرهای دفع مناسب را شناسایی کرده و نقش آن‌ها را در ارتقاء کارایی، کاهش خطاهای انسانی، افزایش ایمنی و دستیابی به استانداردهای زیست‌محیطی تبیین کند. همچنین، این تحقیق می‌کوشد تا شکاف‌های دانشی موجود در کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت پسماندهای خاص آزمایشگاهی به‌ویژه در حوزه‌های شیمی، زیست‌شناسی و میکروبیولوژی را روشن ساخته و پیشنهادهایی برای جهت‌گیری تحقیقات آینده ارائه دهد.

۲- روش شناسی

برای نگارش این مرور تحلیلی، به‌منظور بررسی چالش‌های زیست‌محیطی و روند مدیریت پسماند در آزمایشگاه‌ها، جستجوی نظام‌مندی در پایگاه‌های داده علمی معتبر شامل PubMed, Scopus و Google Scholar انجام شد. جستجو با استفاده از کلیدواژه‌های ترکیبی مانند "biological laboratory waste management", "hazardous waste in research labs", "waste in educational laboratories", "chemical waste disposal in industry" و نیز معادل‌های آن‌ها در زبان فارسی صورت گرفت. همچنین از عملگرهای منطقی (AND, OR) و استفاده از فیلترهای موضوعی جهت محدودسازی نتایج بهره گرفته شد.

بازه زمانی بررسی‌شده، مقالات منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۴ را شامل می‌شود. معیارهای انتخاب شامل مقالات دارای مرور نظام‌مند، مطالعات موردی معتبر، راهنماهای رسمی مدیریت پسماند، و مقالات مرتبط با آزمایشگاه‌های آموزشی، تحقیقاتی و صنعتی بودند در مرحله غربالگری، ابتدا عناوین و چکیده‌ها بررسی شده و مقالات نامرتب یا فاقد رویکرد تحلیلی مطالعات بدون داده‌های تجربی، یا منابع فاقد اعتبار علمی مانند بلاگ‌ها و گزارش‌های غیررسمی حذف شدند. سپس، مقالات منتخب بر اساس متن کامل مورد ارزیابی قرار گرفتند. معیارهای انتخاب شامل تمرکز مقاله بر پسماندهای آزمایشگاهی، جنبه‌های زیست‌محیطی، و دارا بودن ساختار علمی معتبر بود. همچنین، کیفیت مقالات با توجه به جایگاه ژورنال مانند (Q1/Q2) و میزان استناد آن‌ها سنجیده شد.

۳- مبانی نظری

۳-۱- هوش مصنوعی و کاربرد آن در تحلیل داده

هوش مصنوعی (Artificial Intelligence) شاخه‌ای از علوم رایانه است که به طراحی و توسعه سیستم‌هایی می‌پردازد که قادرند رفتارهای هوشمندانه‌ای نظیر یادگیری، استدلال، تصمیم‌گیری و حل مسئله را از خود نشان دهند. این فناوری با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مانند یادگیری ماشین (Machine Learning)، یادگیری عمیق (Deep Learning) و منطق فازی، به سیستم‌ها امکان تحلیل داده‌های پیچیده، استخراج الگوهای پنهان، و اتخاذ تصمیمات مبتنی بر داده را می‌دهد [۱۰، ۱۸].

۳-۲- مفهوم جامع مدیریت پسماند

مدیریت پسماند به مجموعه فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که از مرحله تولید تا جمع‌آوری، حمل، پردازش، بازیافت، تصفیه و دفع نهایی پسماند را شامل می‌شود. این فرایند، با هدف کاهش اثرات زیان‌آور پسماند بر محیط‌زیست، سلامت عمومی و منابع طبیعی طراحی می‌شود. سطوح مختلف مدیریت پسماند بر اساس منشأ آن طبقه‌بندی می‌شوند: شهری، صنعتی، کشاورزی، بیمارستانی و آزمایشگاهی. هر سطح دارای ویژگی‌ها و مقررات خاص خود است. در این میان، مدیریت پسماند آزمایشگاهی به دلیل ماهیت خطرناک،



ترکیبات شیمیایی پیچیده و حجم کم اما اثر بالا، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مدیریت مؤثر نیازمند پایش لحظه‌ای، دسته‌بندی دقیق و اعمال روش‌های دفع تخصصی است؛ موضوعی که AI می‌تواند نقش تسهیل‌گر و تحلیل‌گر در آن ایفا کند [۸, ۶].

۳-۳- نقش آزمایشگاه‌ها در فرایندهای علمی، تحقیقاتی و تشخیصی

آزمایشگاه محیطی کنترل‌شده و تخصصی برای انجام آزمایش‌های علمی، تحقیقاتی و تشخیصی است. این فضا در دانشگاه‌ها، مراکز پژوهشی، بیمارستان‌ها و صنایع کاربرد دارد. آزمایشگاه‌ها از نظر ساختار، حوزه عملکرد و درجه خطر به انواع مختلفی چون شیمیایی، زیستی، فیزیکی و بالینی تقسیم می‌شوند. به دلیل فعالیت‌های گسترده، حجم بالای مواد مصرفی و نوع ترکیبات استفاده‌شده، پسماند تولیدی آن‌ها دارای ویژگی‌های پیچیده و منحصر به فرد است. نقشی که آزمایشگاه در تولید داده‌های علمی، اکتشافات نوآورانه و توسعه فناوری ایفا می‌کند، آن را به محیطی حساس و راهبردی تبدیل کرده است. لذا رعایت دستورالعمل‌های ایمنی، بهداشتی و زیست‌محیطی در آن از اهمیت بالایی برخوردار است و هوش مصنوعی می‌تواند در نظارت و تحلیل این ابعاد نقش مؤثری داشته باشد [۸, ۶, ۱۹].

۳-۴- ماهیت پسماندهای آزمایشگاهی، چالش‌های مدیریتی

پسماندهای تولید شده در آزمایشگاه‌ها به دلیل ماهیت فعالیت‌های علمی و تحقیقاتی، از نظر ترکیب، میزان خطر و روش‌های دفع، پیچیدگی خاصی دارند. این پسماندها شامل باقی‌مانده مواد شیمیایی واکنش‌داده‌نشده، مواد زیستی حساس مانند نمونه‌های خون و ادرار، ظروف آلوده، سرنگ و تیغ، فیلترهای آلوده، و مواد رادیواکتیو هستند. برخی از این مواد ناپایدار بوده و ممکن است در شرایط نگهداری نامناسب دچار واکنش‌های ناگهانی شوند. همچنین برخی ترکیبات، همچون جیوه، کروم، سرب، فنول و کلروفرم، اثرات پایدار و خطرناک محیط‌زیستی دارند. این تنوع و خطر، مدیریت دقیق و علمی پسماندهای آزمایشگاهی را ضروری می‌سازد. دسته‌بندی اولیه، بسته‌بندی ایمن، برچسب‌گذاری مناسب، و ثبت دیجیتال هر مورد از اصول بنیادین در این حوزه محسوب می‌شوند. مدیریت پسماند در محیط‌های آزمایشگاهی با چالش‌هایی همچون تنوع ترکیب پسماند، کمبود فضا برای تفکیک، دانش ناکافی پرسنل، نبود زیرساخت‌های الکترونیکی، و هزینه‌های بالای دفع اصولی مواجه است. اغلب آزمایشگاه‌ها فاقد سیستم متمرکز برای ثبت، ردیابی و تحلیل داده‌های پسماند هستند. همچنین، در برخی موارد، مواد ناسازگار به‌صورت نادرست در کنار هم ذخیره می‌شوند که خطر واکنش‌های ناخواسته را افزایش می‌دهد. چالش دیگر، تأخیر در واکنش به حوادث مربوط به نشت یا انتشار پسماندهاست. نبود روش‌های ارزیابی لحظه‌ای و عدم تحلیل داده‌ها به‌صورت پویا باعث شده تصمیم‌گیری‌ها صرفاً بر پایه تجربه یا تخمین انجام شود. در چنین شرایطی، AI با ایجاد مدل‌های تصمیم‌یار، هشدارهای لحظه‌ای، و یادگیری از داده‌های گذشته، می‌تواند این شکاف‌ها را پوشش دهد [۸, ۶, ۱۹].

۳-۵- کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت پسماند

کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت پسماند به معنای استفاده از الگوریتم‌هایی است که بتوانند داده‌های مرتبط با پسماند را جمع‌آوری، تحلیل و بر اساس آن تصمیم‌گیری یا پیشنهاد بهینه ارائه دهند. این سیستم‌ها در قالب تصمیم‌یار (Decision Support Systems) می‌توانند بر اساس داده‌های جاری و گذشته، پیش‌بینی کنند که چه نوع پسماندی در چه زمانی و چه مقداری تولید خواهد شد، چه واکنشی دارد، و چه روش دفعی مناسب‌تر است. سیستم‌های AI همچنین می‌توانند با تحلیل رفتاری پرسنل، الگوریتم‌هایی برای بهبود رعایت مقررات ارائه دهند. این رویکرد، سطح جدیدی از هوشمندسازی در مدیریت ایمنی و زیست‌محیطی آزمایشگاه‌ها به‌وجود می‌آورد.



۳-۶- انواع داده‌های قابل استفاده برای مدل‌های AI در مدیریت پسماند آزمایشگاهی

برای بهره‌گیری مؤثر از هوش مصنوعی در مدیریت پسماند، باید داده‌هایی ساختاریافته و قابل تحلیل از فرآیندها فراهم شود. این داده‌ها شامل نوع و حجم مواد مصرفی در هر آزمایش، زمان‌بندی تولید پسماند، نحوه ذخیره‌سازی، سوابق واکنش‌های ناخواسته، تاریخ‌های جمع‌آوری و دفع، نوع ظرف، مشخصات شیمیایی، و حتی داده‌های مربوط به رفتار کاربر (مانند میزان رعایت SOP) می‌شود. در صورت یکپارچه‌سازی این داده‌ها از طریق سامانه‌های دیجیتال، مدل‌های یادگیری ماشین قادر خواهند بود الگوهای تولید پسماند را پیش‌بینی، خطرات احتمالی را شناسایی و تصمیمات بهینه دفع یا بازیافت را پیشنهاد دهند. استفاده از سنسورها و IoT^۱ نیز می‌تواند کیفیت این داده‌ها را افزایش دهد.

۳-۷- یک سیستم هوشمند برای مدیریت پسماند آزمایشگاهی معمولاً شامل پنج لایه اصلی است:

- ۱) لایه ورودی داده‌ها شامل سنسورها، فرم‌های دیجیتال، و پایگاه داده مواد؛
 - ۲) لایه پردازش و پاک‌سازی داده‌ها برای حذف خطاهای ثبت و ناهماهنگی‌ها؛
 - ۳) لایه تحلیل هوش مصنوعی که شامل الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تحلیل آماری و تصمیم‌گیری است؛
 - ۴) لایه نمایش اطلاعات از طریق داشبوردهای گرافیکی برای کاربران؛
 - ۵) لایه واکنش و هشداردهی برای اعلام خطر، ارائه پیشنهاد و اجرای اقدامات خودکار.
- در این چارچوب، AI می‌تواند بر اساس الگوهای یادگیری‌شده، در شناسایی رفتارهای پرخطر، بهینه‌سازی فرآیند جمع‌آوری و حتی طراحی نظام بازیافت هوشمند نقش داشته باشد [۱۸، ۱۹].

۴- پیشینه علمی استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت پسماند:

۱. یادگیری ماشین و الگوریتم‌های پیشرفته :

در دهه اخیر، استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین به‌عنوان ابزاری نوین برای بهینه‌سازی فرآیندهای زیست‌محیطی، به‌ویژه در حوزه مدیریت پسماند، مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از چالش‌های اساسی در این حوزه، ارتباط مستقیم بین الگوهای ناکارآمد دفع پسماند و افزایش آلودگی هواست که نیازمند راهکارهایی هوشمند و انعطاف‌پذیر برای به حداقل رساندن اثرات زیان‌بار آن است. مقاله‌ای منتشرشده در سال ۲۰۲۵ به بررسی این موضوع پرداخته و از طریق تحلیل داده‌محور، نقش الگوریتم‌های هوش مصنوعی در بهبود راهبردهای مدیریت پسماند و کاهش آلاینده‌های جوی را تحلیل کرده است.

در این مطالعه، راتولا و همکارانش با طراحی یک چارچوب تحلیلی، ارتباط بین تصمیم‌گیری هوشمند در جمع‌آوری، تفکیک و بازیافت پسماند با شاخص‌های کیفیت هوا را ارزیابی کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی و بهینه‌سازی، نشان دادند که به‌کارگیری سیستم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین می‌تواند منجر به کاهش حجم پسماند دفنی، بهبود کارایی عملیات بازیافت و کاهش گازهای آلاینده شود. از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش می‌توان به ارائه الگویی ترکیبی برای تصمیم‌گیری محیط‌زیستی اشاره کرد که نه تنها به بهینه‌سازی منابع می‌پردازد بلکه با کاهش آلودگی هوا، اثری ملموس بر سلامت عمومی جامعه خواهد داشت. این رویکرد نوین، چشم‌انداز روشنی برای آینده پایدار شهری فراهم می‌کند [۱۹].

یکی از مطالعات قابل توجه در زمینه استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در بهینه‌سازی مدیریت پسماند، پژوهشی است که توسط السبت و همکاران در سال ۲۰۲۴ انجام شده است. این مطالعه با تمرکز بر تحلیل هم‌زمان ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی، چارچوبی جامع برای طراحی و ارزیابی راهبردهای نوین مدیریت پسماند ارائه داده است. نویسندگان در این پژوهش

1 Internet of Things



نشان داده‌اند که ترکیب الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین با داده‌های میدانی و محیطی می‌تواند به‌طور چشمگیری کارایی فرآیندهای تفکیک، بازیافت و دفع پسماند را بهبود بخشد.

از جمله دستاوردهای این تحقیق، توسعه یک سامانه تصمیم‌یار هوشمند است که قادر است با پردازش حجم بالایی از داده‌ها، پیشنهادهای بهینه‌ای برای نحوه مدیریت انواع پسماند در سناریوهای مختلف ارائه دهد. السبت و همکاران تأکید کرده‌اند که پیاده‌سازی این سیستم‌ها نه تنها منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش دقت در تفکیک ضایعات می‌شود، بلکه پیامدهای مثبت قابل توجهی برای محیط‌زیست از جمله کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، افزایش نرخ بازیافت و کاهش نیاز به دفن پسماند به همراه دارد. این تحقیق گامی مهم در جهت اتصال فناوری‌های نوظهور با سیاست‌گذاری‌های هوشمند پسماند تلقی می‌شود و می‌تواند پایه‌ای برای تدوین راهبردهای پایدار در مدیریت مواد زائد به‌شمار رود [۹].

در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از فناوری‌های هوش مصنوعی در فرآیند تصفیه فاضلاب به عنوان یک رویکرد نوآورانه و مؤثر مطرح شده است. در همین راستا، مطالعه‌ای توسط الپرول و همکاران در سال ۲۰۲۴ انجام شده که به بررسی روندهای جاری و چشم‌انداز آینده کاربرد هوش مصنوعی در تصفیه فاضلاب پرداخته است. این پژوهش، با نگاهی جامع، به تبیین نقش الگوریتم‌های یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های پیش‌بینی در بهینه‌سازی فرآیندهای پیچیده تصفیه، از جمله تنظیم دبی جریان، پیش‌بینی بار آلودگی، کنترل مصرف انرژی و شناسایی خودکار آلاینده‌ها پرداخته است. الپرول و همکاران با مرور ده‌ها مطالعه کاربردی، نشان داده‌اند که استفاده از سامانه‌های هوشمند می‌تواند موجب افزایش کارایی عملکرد تصفیه‌خانه‌ها، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، و ارتقاء سطح کنترل زیست‌محیطی شود. آن‌ها همچنین بر اهمیت داده‌محور بودن این رویکرد و ضرورت توسعه زیرساخت‌های دیجیتال برای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و پردازش داده‌ها تأکید کرده‌اند.

یافته‌های مقاله می‌تواند الهام‌بخش طراحی سامانه‌هایی در سایر حوزه‌های حساس مانند مدیریت پسماندهای آزمایشگاهی، پایش پساب‌های خطرناک و کنترل شرایط بحرانی در محیط‌های صنعتی و علمی باشد [۱۷].

استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت پسماند به‌ویژه در سال‌های اخیر توجه زیادی را جلب کرده است. تکنیک‌های هوش مصنوعی از جمله یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی، و الگوریتم‌های پیشرفته برای بهبود عملکرد در مدیریت پسماندهای صنعتی و شهری به‌کار گرفته شده‌اند. این پژوهش‌ها می‌توانند به‌طور مؤثری فرآیندهای جمع‌آوری، طبقه‌بندی و پردازش پسماندها را بهینه‌سازی کرده و در عین حال خطرات زیست‌محیطی را کاهش دهند. مقاله‌ای که توسط بریما و همکاران در ۲۰۲۴ منتشر شده است، تحلیل‌های عمیقی را درباره روندهای پژوهشی و پیشرفت‌های اخیر در این حوزه ارائه می‌دهد. نویسندگان با استفاده از روش‌های تحلیل بیلیومتریک، مطالعات مختلف را بررسی کرده و نشان داده‌اند که چگونه هوش مصنوعی می‌تواند به فرآیندهای پیچیده مدیریت پسماند کمک کرده و کارایی این سیستم‌ها را بهبود بخشد.

در این مقاله، توجه ویژه‌ای به کارکردهای مختلف فناوری‌های هوش مصنوعی در پردازش داده‌ها و تصمیم‌گیری‌های پیچیده در مدیریت پسماند شده است. یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق، شناسایی فناوری‌های نوین و نحوه کاربرد آنها در پیش‌بینی و نظارت بر تولید پسماند، کاهش زمان پردازش و ارتقای سیستم‌های جمع‌آوری است. بریما و همکاران با بررسی روندهای مختلف در این حوزه، آینده هوش مصنوعی در مدیریت پسماند را به‌طور گسترده‌ای تحلیل کرده و به چشم‌اندازهای جدیدی اشاره کرده‌اند که می‌توانند در توسعه سیاست‌ها و استراتژی‌های مؤثر در مدیریت پسماندهای شهری و صنعتی مفید واقع شوند. این پژوهش همچنین به شناسایی چالش‌ها و فرصت‌های موجود در پیاده‌سازی این تکنولوژی‌ها در مقیاس‌های مختلف پرداخته است [۱۱].

در شرایطی که روش‌های سنتی مدیریت پسماند با چالش‌های متعددی همچون ناکارآمدی، هزینه‌های بالا، و عدم انعطاف‌پذیری در مواجهه با تغییرات سریع مواجه‌اند، نوآوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی به عنوان یک راهکار نویدبخش مطرح شده‌اند. کاربرد الگوریتم‌های هوشمند در تحلیل داده‌های حجیم، پیش‌بینی الگوهای تولید پسماند، و بهینه‌سازی فرآیندهای جمع‌آوری و بازیافت،



افق‌های تازه‌ای را در این حوزه گشوده است. در همین راستا، پژوهشی که در سال ۲۰۲۴ منتشر شده است با تمرکز بر چالش‌های موجود در رویکردهای سنتی، به بررسی قابلیت‌های فناوری‌های هوش مصنوعی در تحول سیستم‌های مدیریت پسماند پرداخته است. نویسندگان این مقاله، از جمله ساکاراوارتی و همکاران، تلاش کرده‌اند تا با تحلیل ساختاری و موردی، نشان دهند که چگونه رویکردهای داده‌محور می‌توانند موجب بهبود تصمیم‌گیری، کاهش خطاهای انسانی، و ارتقاء بهره‌وری سیستم‌های مدیریت پسماند شوند. دستاورد اصلی این پژوهش در شناسایی موانع فنی و سازمانی و پیشنهاد چارچوب‌های نوین مبتنی بر هوش مصنوعی برای غلبه بر این موانع است. همچنین مقاله با نگاهی آینده‌نگرانه، تأکید دارد که پیاده‌سازی این فناوری‌ها نه تنها بهره‌وری عملیاتی را افزایش می‌دهد، بلکه به تحقق اهداف زیست‌محیطی در مقیاس گسترده‌تر نیز کمک می‌کند [۱۲].

تحول در مدیریت پسماند شهری، به‌ویژه در بستر شهرهای هوشمند، نیازمند بهره‌گیری از ابزارهای نوین مبتنی بر فناوری‌های پیشرفته است. در همین زمینه، مطالعه‌ای توسط فانگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ انجام شده که نقش فناوری‌های هوش مصنوعی را در بهینه‌سازی مدیریت پسماند در شهرهای هوشمند مورد تحلیل قرار داده است. این پژوهش با بررسی جامع فناوری‌های مختلف از جمله بینایی ماشین، یادگیری ماشین، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و اینترنت اشیا، نشان می‌دهد که چگونه این ابزارها می‌توانند فرایندهایی مانند طبقه‌بندی پسماند، مسیریابی بهینه جمع‌آوری، پیش‌بینی تولید زباله و تصمیم‌گیری خودکار را متحول کنند. فانگ و همکاران در این مرور سیستماتیک، ضمن شناسایی چالش‌ها و فرصت‌های موجود، نقشه راهی برای بهره‌برداری از هوش مصنوعی در راستای توسعه پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی پسماند ارائه کرده‌اند. آن‌ها همچنین بر اهمیت یکپارچه‌سازی داده‌های محیطی، اجتماعی و اقتصادی برای طراحی راهکارهای هوشمند مدیریت پسماند در مقیاس شهری و حتی آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد [۱۵].

۲. یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی:

در سال‌های اخیر، استفاده از سامانه‌های هوشمند در مدیریت پسماند به‌عنوان یکی از راهکارهای کلیدی برای ارتقاء بهره‌وری باز یافت و تحقق پایداری محیط‌زیستی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از رویکردهای نوین در این زمینه، به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای طراحی سیستم‌های خودکار طبقه‌بندی زباله‌هاست که می‌تواند فرآیند تفکیک را با دقت بالا، سرعت بیشتر و وابستگی کمتر به نیروی انسانی انجام دهد. در همین راستا، پژوهشی در سال ۲۰۲۵ منتشر شده است که طراحی و ارزیابی یک سامانه طبقه‌بندی خودکار پسماند با استفاده از تکنیک‌های یادگیری عمیق را هدف قرار داده است.

در این تحقیق، ناهیدوزمان و همکاران با استفاده از شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN) و مجموعه داده‌های متنوع تصویری، سیستمی طراحی کرده‌اند که قادر است انواع پسماند مانند زباله‌های آلی، پلاستیکی، فلزی و کاغذی را با دقت بالا شناسایی و دسته‌بندی کند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته نه تنها باعث افزایش نرخ تفکیک مؤثر می‌شود، بلکه از نظر زمان پردازش و هزینه عملیاتی نیز کارآمد است. از جمله دستاوردهای مهم این مقاله می‌توان به ایجاد زیرساختی هوشمند برای بهینه‌سازی فرآیند باز یافت و کاهش بار زیست‌محیطی ناشی از پسماند اشاره کرد. این مطالعه مسیر تازه‌ای را برای ادغام هوش مصنوعی در سیستم‌های مدیریت پسماند باز می‌کند و پتانسیل بالایی برای توسعه در مقیاس شهری و صنعتی دارد [۱۸].

با توجه به رشد روزافزون حجم پسماندهای شهری و صنعتی، بهینه‌سازی فرایندهای شناسایی، تفکیک و دسته‌بندی زباله‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. یکی از راهکارهای نوین در این حوزه، بهره‌گیری از هوش مصنوعی و به‌ویژه الگوریتم‌های پیشرفته تشخیص اشیاء برای طبقه‌بندی زباله‌ها به‌صورت خودکار و هوشمند است. در همین راستا، مقاله‌ای با تمرکز بر این موضوع منتشر شده که با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق، امکان شناسایی دقیق‌تر انواع پسماندها و بهبود عملکرد سیستم‌های تفکیک خودکار را بررسی کرده است. این نوآوری به‌ویژه در مراحل اولیه مدیریت پسماند، یعنی تفکیک در مبدأ و کاهش خطای انسانی، نقش مهمی ایفا می‌کند.



در میانه این مطالعه، کوانگ و همکاران با بهره‌گیری از پایگاه‌های داده تصویری گسترده و الگوریتم‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی کانولوشنی، مدل‌هایی ارائه داده‌اند که می‌توانند انواع زباله‌ها مانند پلاستیک، فلز، شیشه، و مواد آلی را با دقت بالا تشخیص دهند. از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق، افزایش دقت طبقه‌بندی، کاهش زمان پردازش و قابلیت پیاده‌سازی در مقیاس صنعتی است. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان یکی از ارکان اساسی تحول در سیستم‌های مدیریت هوشمند پسماند تلقی شود و زمینه‌ساز توسعه زیرساخت‌های پایدار در حوزه محیط زیست شهری باشد [۱۰].

در راستای توسعه مدل‌های هوش مصنوعی برای کاربردهای تحلیلی و پیش‌بینی در حوزه‌های مختلف از جمله مدیریت پسماند، مطالعه‌ای جامع توسط شیر و همکاران در سال انجام شده که به بررسی عمیق و مقایسه مدل‌های مختلف یادگیری عمیق از جمله شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN)، شبکه‌های بازگشتی (RNN)، حافظه بلندمدت کوتاه‌مدت (LSTM) 1 و واحدهای بازگشتی دروازه‌دار (GRU) 2 پرداخته است.

این پژوهش با هدف ایجاد درک روشن‌تری از قابلیت‌ها، مزایا و محدودیت‌های هریک از این معماری‌ها، تحلیل تطبیقی دقیقی از عملکرد آن‌ها در زمینه‌های مختلف ارائه می‌دهد. شیر و همکاران نشان دادند که انتخاب صحیح مدل یادگیری عمیق، بسته به نوع داده، ساختار زمانی، و میزان پیچیدگی روابط درون داده‌ای، نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت و کارایی تحلیل دارد. این مطالعه، ضمن فراهم آوردن یک مرجع فنی برای انتخاب مدل مناسب در پروژه‌های مختلف، مسیر را برای توسعه سامانه‌های هوشمند در حوزه‌هایی مانند شناسایی الگوها، طبقه‌بندی خودکار و پیش‌بینی داده‌های پیچیده هموار می‌سازد. چنین مرور جامعی می‌تواند مبنای علمی ارزشمندی برای طراحی سیستم‌های تصمیم‌یار در مدیریت هوشمند پسماند و دیگر کاربردهای زیست‌محیطی فراهم کند [۱۴].

در حوزه کاربردی‌سازی یادگیری عمیق برای تفکیک پسماند، پژوهش‌های فناوری‌محور نقش برجسته‌ای در حرکت به‌سوی سیستم‌های هوشمند و خودکار ایفا کرده‌اند. یکی از نمونه‌های موفق در این زمینه، پروژه‌ای با عنوان Convowaste است که توسط نافیز و همکاران در سال معرفی شده است.

این پژوهش که در بستر یک کنفرانس تخصصی در زمینه رباتیک و پردازش سیگنال ارائه شده، به طراحی و پیاده‌سازی یک ماشین خودکار تفکیک زباله با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق، به‌ویژه شبکه‌های کانولوشنی (CNN)، اختصاص دارد. در این سامانه، تصاویر ورودی از پسماندها با استفاده از بینایی ماشین تحلیل می‌شوند و با دقت بالا به دسته‌های مختلف مانند پلاستیک، فلز، کاغذ و زباله‌های آلی تفکیک می‌گردند. نافیز و همکاران در طراحی این سامانه نه تنها به دقت الگوریتم‌ها توجه کرده‌اند، بلکه به موضوعاتی مانند هزینه‌برداری عملیاتی، زمان پردازش و قابلیت پیاده‌سازی در مقیاس صنعتی نیز پرداخته‌اند. این پروژه یکی از نمونه‌های کاربردی و موفق استفاده از هوش مصنوعی در سطح اجرایی برای مدیریت بهینه پسماند به شمار می‌آید و می‌تواند به‌عنوان الگویی برای طراحی سیستم‌های مشابه در محیط‌های آزمایشگاهی و تحقیقاتی مورد استفاده قرار گیرد [۱۵].

۳. هوش مصنوعی در پردازش داده‌های حجیم و تصمیم‌گیری خودکار:

در زمینه کاربردهای هوش مصنوعی در بوم‌شناسی صنعتی، یکی از مطالعات مهم توسط دوناتی و همکاران (۲۰۲۲) انجام شده که به بررسی آینده هوش مصنوعی در چارچوب اکولوژی صنعتی پرداخته است. این پژوهش با تمرکز بر ارتباط میان سیستم‌های تولید، مصرف و بازیافت در مقیاس صنعتی، نقش ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی را در بهینه‌سازی جریان‌های مواد و انرژی تحلیل کرده است. نویسندگان نشان داده‌اند که ترکیب روش‌های یادگیری ماشین، پردازش داده‌های حجیم و تحلیل سیستم‌های پیچیده می‌تواند به کاهش پسماند، افزایش بهره‌وری منابع و طراحی سیاست‌های پشتیبان تصمیم کمک کند. این مقاله از جمله منابع پیشرو

1 Long Short-Term Memory

2 Gated Recurrent Unit



در تبیین جایگاه آینده نگرانه هوش مصنوعی در حوزه توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی به شمار می رود و زمینه ای نظری برای کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت پسماند آزمایشگاهی نیز فراهم می سازد [۱۳].

یکی از چالش های اساسی در به کارگیری سامانه های هوش مصنوعی در حوزه های حساس و حیاتی، مسئله ایمنی سامانه ها و قابلیت اطمینان آن ها در شرایط واقعی و پیچیده است. در همین راستا، دوبه در مقاله ای در سال، به بررسی ابعاد نظری و عملی ایمنی سامانه ها در تعامل با هوش مصنوعی پرداخت.

وی با تأکید بر پیچیدگی تصمیم گیری های خودکار و نقش الگوریتم ها در فرآیندهای بحرانی، نشان داد که نبود طراحی های مقاوم در برابر خطا، می تواند پیامدهای فاجعه باری در سیستم های هوشمند ایجاد کند، به ویژه در محیط هایی مانند زیرساخت های صنعتی، حمل و نقل هوشمند و آزمایشگاه های سطح بالا دوبه به طور خاص بر لزوم مدل سازی دقیق ریسک، تدوین چارچوب های اخلاقی برای الگوریتم ها و توسعه ابزارهای نظارت و بازنگری انسانی در فرآیند تصمیم سازی تأکید کرده است.

این مقاله، با رویکردی میان رشته ای، پلی میان مفاهیم کلاسیک ایمنی سامانه ها و نوآوری های فناوری های فناورانه هوش مصنوعی برقرار می کند و می تواند پایه ای نظری و کاربردی برای پژوهش هایی باشد که در حوزه های آزمایشگاهی یا صنعتی به دنبال یکپارچه سازی ایمنی و هوش مصنوعی هستند [۱۱].

در فضای آزمایشگاهی که با مواد شیمیایی متنوع و گاه پرخطر سروکار دارد، مدیریت پسماندهای شیمیایی نه تنها یک الزام قانونی، بلکه ضرورتی برای حفظ سلامت عمومی و زیست محیطی است. دسته بندی دقیق این پسماندها بر اساس سطح خطر و شناخت ریسک های حمل و نقل آن ها، نقشی اساسی در طراحی سیستم های ایمن دفع و مدیریت دارد. مطالعه ای منتشر شده در سال ۲۰۲۱ به بررسی نظام مند طبقه بندی پسماندهای شیمیایی آزمایشگاهی بر اساس سیستم جهانی هماهنگ شده (GHS) و ارزیابی ریسک حمل و نقل آن ها پرداخته است. این پژوهش با هدف ایجاد یک چارچوب کاربردی و استاندارد برای بهبود ایمنی در مدیریت پسماندهای شیمیایی طراحی شده است.

در این مقاله، حیوانی و همکارانش با استفاده از معیارهای GHS و تحلیل ریسک های ناشی از جابجایی، توانسته اند ابزاری دقیق برای شناسایی و تفکیک پسماندهای خطرناک ارائه دهند. یافته های آن ها حاکی از آن است که بهره گیری از این چارچوب می تواند منجر به کاهش خطاهای انسانی در دفع مواد شیمیایی، افزایش کارایی سیستم های بازیافت و حمل ایمن، و همچنین ارتقای سطح آگاهی کارکنان آزمایشگاهی شود. این پژوهش به ویژه برای محیط های آموزشی، پژوهشی و صنعتی که با تنوع بالایی از مواد شیمیایی سروکار دارند، یک راهنمای علمی و عملی محسوب می شود [۶].

در شرایطی که حجم و تنوع پسماندهای بیمارستانی به طور چشمگیری در حال افزایش است، مدیریت کارآمد این نوع پسماندها به یک چالش اساسی در نظام سلامت تبدیل شده است. اهمیت تفکیک، جمع آوری، حمل، ذخیره سازی و دفع صحیح پسماندهای بیمارستانی نه تنها به دلیل خطرات زیست محیطی، بلکه به علت پیامدهای مستقیم بر سلامت عمومی و ایمنی کارکنان مراکز درمانی است. مقاله ای منتشر شده در نشریه علوم پیراپزشکی و سلامت نظامی در سال، با تمرکز بر این موضوع، چارچوبی جامع برای مدیریت پسماندهای بیمارستانی در ایران ارائه کرده است که به ویژه برای بیمارستان های نظامی و دولتی قابل توجه است.

در این پژوهش، اسماعیلی زاده، افتخاری و اکبری با بررسی میدانی و تحلیل ساختاری فرآیندهای موجود، به شناسایی نواقص مدیریتی و اجرایی در چرخه پسماندهای بیمارستانی پرداخته اند و راهکارهایی عملی برای بهبود این فرآیندها پیشنهاد داده اند. از جمله مهم ترین یافته های آنان می توان به لزوم استانداردسازی روش های تفکیک در مبدأ، آموزش هفتمند پرسنل، و بهره گیری از فناوری های نوین در پایش و کنترل پسماند اشاره کرد. دستاورد این مقاله در بهینه سازی سیاست های کلان مدیریت پسماندهای عفونی و خطرناک بیمارستانی نقش مؤثری ایفا می کند و می تواند به عنوان مبنایی برای ارتقاء پروتکل های ملی در این حوزه به کار گرفته شود [۸].



۵- چالش ها و محدودیت های استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت پسماند آزمایشگاه:

با وجود پتانسیل های فراوان هوش مصنوعی در بهینه سازی فرآیندهای مدیریت پسماند در آزمایشگاه ها، بهره برداری کامل از این فناوری همچنان با موانع متعددی روبروست. چالش هایی مانند محدودیت های مربوط به دسترسی و کیفیت داده ها، پیچیدگی در پیاده سازی سیستم های هوشمند، و موانع فرهنگی و اجرایی در پذیرش فناوری های نو، مانع از تحقق کامل ظرفیت های AI در این حوزه می شوند. در ادامه، مهم ترین چالش ها و خلأهای موجود در مسیر هوشمندسازی مدیریت پسماند آزمایشگاهی بررسی می شود.

۱. کیفیت پایین، ناهمبستگی و پراکندگی داده ها

یکی از بزرگ ترین موانع در کاربرد AI، عدم وجود داده های قابل اعتماد و یکپارچه است. در بسیاری از آزمایشگاه ها، اطلاعات مربوط به نوع، مقدار و زمان تولید پسماندها به صورت دستی و غیرساختاری ثبت می شود. نبود فرم های استاندارد، تفاوت در نحوه ثبت داده بین بخش های مختلف، و گم شدن اطلاعات باعث می شود سیستم های هوش مصنوعی نتوانند الگوهای معنادار را تشخیص دهند یا تصمیم گیری مؤثری انجام دهند.

۲. کمبود داده های برجسته خورده و قابل استفاده برای آموزش مدل ها

الگوریتم های یادگیری ماشین برای کارایی دقیق، نیاز به داده هایی دارند که قبلاً طبقه بندی و برجسته گذاری شده باشند (labeled data). اما در حوزه پسماند آزمایشگاهی، به دلیل حساسیت اطلاعات و نبود ساختار استاندارد، چنین پایگاه داده ای به ندرت در دسترس است. در نتیجه مدل های یادگیری ضعیف، ناپایدار و وابسته به حدس زدن های غیرعلمی باقی می ماند.

۳. دانش ناکافی کارکنان نسبت به هوش مصنوعی و ابزارهای دیجیتال

بسیاری از پرسنل آزمایشگاهی، به ویژه آن هایی که تجربه طولانی تری دارند، با مفاهیم پایه ای هوش مصنوعی و سیستم های دیجیتال آشنا نیستند. این ناآشنایی باعث می شود از ابزارهای هوشمند به درستی استفاده نکنند یا حتی به آن ها بی اعتمادی نشان دهند. نبود آموزش های پیوسته و کاربردی برای کارکنان، روند هوشمندسازی را به شدت کند می کند.

۴. نبود زیرساخت دیجیتال برای جمع آوری و تحلیل داده ها

سیستم های AI برای عملکرد مؤثر به بسترهای دیجیتالی نیاز دارند که اطلاعات را از منابع مختلف (مانند سنسورها، فرم های الکترونیکی، RFID^۱، سیستم های انبارداری و...) به صورت مداوم جمع آوری کنند. با این حال، در بسیاری از آزمایشگاه ها چنین زیرساختی وجود ندارد یا محدود به چند بخش خاص است. این مسئله باعث می شود زنجیره داده ها ناقص بوده و تحلیل نهایی دچار خطا شود.

۵. هزینه های بالای طراحی، استقرار و نگهداری سیستم های هوشمند

استفاده از AI مستلزم سرمایه گذاری اولیه قابل توجهی است؛ از خرید تجهیزات و نصب سنسورها گرفته تا توسعه نرم افزار، استخدام نیروی متخصص، و نگهداری مداوم سیستم. در آزمایشگاه هایی با بودجه محدود، این هزینه ها به سادگی قابل توجیه نیستند و مانع از اجرای کامل این فناوری می شوند.

۶. پیچیدگی فنی طراحی مدل های هوشمند در محیط های ناهمگن

برخلاف محیط های صنعتی یکنواخت، آزمایشگاه ها با ترکیب متنوعی از مواد شیمیایی، زیستی، فیزیکی و پرتوزا مواجه هستند. طراحی مدل های هوشمندی که بتوانند در چنین شرایط پیچیده ای رفتار پسماندها را پیش بینی و تصمیم مناسب پیشنهاد دهند، بسیار دشوار است و نیاز به همکاری بین رشته ای متخصصان ایمنی، داده، شیمی و نرم افزار دارد.

۷. ریسک های ناشی از تصمیم گیری اشتباه توسط سیستم های AI

1 Radio Frequency Identification



اگر یک سیستم هوش مصنوعی بر پایه داده‌های ناقص یا تحلیل‌های ضعیف عمل کند، ممکن است پیشنهادهایی اشتباه در خصوص نحوه دفع، ذخیره‌سازی یا ترکیب مواد ارائه دهد. چنین خطاهایی در محیط‌های آزمایشگاهی می‌تواند منجر به واکنش‌های خطرناک، نشت مواد یا حتی انفجار شود. بنابراین، اعتماد کامل به این سیستم‌ها بدون نظارت انسانی می‌تواند ریسک‌زا باشد.

۸. نبود استانداردهای ملی و بین‌المللی در کاربرد AI در آزمایشگاه‌ها

هنوز چارچوب قانونی مشخصی برای پیاده‌سازی هوش مصنوعی در مدیریت پسماندهای آزمایشگاهی تدوین نشده است. نبود استانداردهای رسمی برای امنیت داده، صحت عملکرد، و الزامات کیفی، باعث می‌شود هر سازمان به‌صورت سلیقه‌ای عمل کند و نتایج به‌دست‌آمده قابل مقایسه و ارزیابی نباشد.

۹. مقاومت فرهنگی نسبت به تغییر و ترس از جایگزینی نیروی انسانی

در برخی محیط‌های کاری، هوش مصنوعی به‌عنوان تهدیدی برای نیروی انسانی تلقی می‌شود. این ترس که فناوری ممکن است نقش‌های کلیدی پرسنل را کاهش دهد یا جایگزین آن‌ها شود، موجب مقاومت در برابر پیاده‌سازی و همکاری ناکافی کارکنان می‌شود. این نگرش منفی باعث می‌شود حتی سیستم‌های ساده هوشمند نیز در عمل به کار گرفته نشوند.

۱۰. نگرانی از امنیت و حریم خصوصی داده‌ها

داده‌های تولیدشده در آزمایشگاه‌ها گاهی شامل اطلاعات حساس درباره نمونه‌های بیولوژیکی، ترکیبات خطرناک یا فرآیندهای ثبت‌نشده هستند. انتقال این اطلاعات به سامانه‌های متصل به اینترنت یا حتی فضای ابری، دغدغه‌های جدی در زمینه حریم خصوصی، نشت اطلاعات و سوءاستفاده‌های احتمالی را به‌وجود می‌آورد که در صورت عدم کنترل می‌تواند عواقب حقوقی و امنیتی در پی داشته باشد.

۶- بحث و نتیجه‌گیری:

در این پژوهش، به بررسی کاربرد هوش مصنوعی (AI) در بهبود فرآیندهای مدیریت پسماند آزمایشگاهی پرداخته شد. آزمایشگاه‌ها به دلیل ماهیت پیچیده و خطرناک پسماندهای تولیدی خود، به سیستم‌های پیشرفته نیاز دارند تا بتوانند این پسماندها را به‌طور مؤثر و ایمن مدیریت کنند. استفاده از AI در این حوزه می‌تواند راهکاری نوین و کارآمد برای شبیه‌سازی، پیش‌بینی و کنترل فرآیندهای مرتبط با تولید و دفع پسماندها باشد. اما علیرغم پتانسیل‌های فراوان این فناوری، هنوز موانعی همچون کمبود داده‌های معتبر و یکپارچه، مقاومت بودن در برابر پذیرش فرهنگ نوآوری و چالش‌های فنی و اجرایی در راه استفاده کامل از AI وجود دارد که باید این مسائل نیز بررسی و رفع شوند. این پژوهش به‌دنبال شناخت دقیق این فرصت‌ها و چالش‌ها در زمینه‌ی کاربرد AI بوده و با تمرکز بر آن‌ها، چشم‌اندازی دقیق برای آینده این فناوری در صنعت آزمایشگاه‌ها ارائه می‌دهد.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت پسماند در آزمایشگاه‌ها، پراکندگی و عدم یکپارچگی داده‌ها است. در بسیاری از مراکز تحقیقاتی، داده‌های مربوط به پسماندها در سیستم‌های مختلف ذخیره می‌شوند و معمولاً به‌طور دستی وارد سیستم‌ها می‌گردند. این امر می‌تواند موجب ایجاد خطاهای انسانی و تصمیم‌گیری‌های نادرست شود. هوش مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تجزیه و تحلیل داده‌ها، این مشکل را به‌طور مؤثری حل می‌کند. AI می‌تواند داده‌های پراکنده را جمع‌آوری و یکپارچه کند، آن‌ها را به‌صورت دقیق‌تر پردازش کند و الگوهای رفتاری پیش‌بینی‌شده‌ای از پسماندها ارائه دهد. به‌این‌ترتیب، فرآیندهای تصمیم‌گیری دقیق‌تر، سریع‌تر و ایمن‌تر خواهند بود، چراکه خطرات زیست‌محیطی ناشی از پسماندهای خطرناک به‌سرعت شناسایی شده و اقدامات پیشگیرانه به‌موقع انجام می‌شود.

با اینکه استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت پسماند پتانسیل‌های زیادی دارد، اما پیاده‌سازی آن در آزمایشگاه‌ها با چالش‌های خاص خود مواجه است. یکی از بزرگ‌ترین موانع، کمبود داده‌های ساختاریافته است که نیاز به جمع‌آوری و ثبت دقیق اطلاعات از



تمامی جنبه‌های پسماندها دارد. بسیاری از آزمایشگاه‌ها هنوز به سیستم‌های دیجیتال پیشرفته مجهز نیستند و در نتیجه، داده‌های آنها به‌طور دستی و پراکنده وارد می‌شود. علاوه بر این، مقاومت فرهنگی نسبت به فناوری‌های نوین و نبود دانش کافی در مورد استفاده از این سیستم‌ها نیز از دیگر موانع است. برای اینکه استفاده از AI موفقیت‌آمیز باشد، لازم است آزمایشگاه‌ها فرهنگ‌سازی کنند، پرسنل را آموزش دهند و زیرساخت‌های فناوری اطلاعات را تقویت کنند. به همین دلیل، این موانع باید در اولویت قرار گرفته و برنامه‌هایی برای حل آن‌ها طراحی شود.

برای تحقق پتانسیل‌های هوش مصنوعی در این حوزه، نیاز به تحقیقات میان‌رشته‌ای است. به‌طور خاص، توسعه مدل‌های یادگیری عمیق (Deep Learning) و سامانه‌های مبتنی بر یادگیری ماشین برای پردازش و تحلیل حجم وسیع داده‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین، پژوهش در زمینه داده‌های غیرساختاریافته و استفاده از فناوری‌های نوین مانند (IoT اینترنت اشیاء) می‌تواند به بهبود دقت داده‌ها و افزایش کیفیت تصمیم‌گیری‌ها کمک کند. از سوی دیگر، با توجه به اهمیت اعتماد کاربر به سیستم‌های هوشمند، پژوهش در زمینه سیستم‌های توضیح‌پذیر (XAI)^۱ ضروری به‌نظر می‌رسد. این سیستم‌ها می‌توانند الگوریتم‌ها و تصمیمات خود را به‌طور شفاف و قابل فهم برای کاربران توضیح دهند تا اعتماد بیشتری به این فناوری‌ها جلب شود.

با توجه به چالش‌های موجود و فرصت‌های بالقوه، پیشنهاد می‌شود که آزمایشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی به سمت پیاده‌سازی سیستم‌های هوشمند مدیریت پسماند حرکت کنند. این سیستم‌ها باید شامل اجزای مختلفی باشند: از یک سو، باید فرآیندهای جمع‌آوری داده‌های دقیق از طریق حسگرها و فرم‌های دیجیتال صورت گیرد و از سوی دیگر، پردازش و تحلیل این داده‌ها با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین انجام شود. همچنین، برای هر مرکز تحقیقاتی، یک پلتفرم مرکزی برای ردیابی و ذخیره‌سازی داده‌ها ضروری است تا یکپارچگی اطلاعات حفظ شود و تصمیم‌گیری‌ها به‌صورت آنی و کارآمد انجام گیرد. آموزش مستمر پرسنل و ارتقای زیرساخت‌های دیجیتال، از دیگر اقدامات حیاتی است که برای اجرای موفق این پروژه‌ها باید در نظر گرفته شود.

۷- آینده پژوهی کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت پسماند آزمایشگاه‌ها:

با توجه به پتانسیل‌های گسترده هوش مصنوعی (AI) در بهینه‌سازی فرآیندهای مدیریت پسماند، چشم‌انداز استفاده از این فناوری در آینده می‌تواند بسیار امیدوارکننده باشد. از پیش‌بینی رفتارهای تولید پسماند گرفته تا طراحی سامانه‌های بازیافت هوشمند، AI ظرفیت بالایی برای ایجاد تحول در مدیریت پسماند آزمایشگاهی دارد. این بخش به برخی از مهم‌ترین مسیرهای تحقیقاتی و پیشنهادهایی برای بهبود و توسعه کاربردهای AI در صنعت مدیریت پسماند آزمایشگاه‌ها می‌پردازد:

۱. پیشرفت در مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق (Deep Learning)

در آینده، مدل‌های یادگیری ماشین (ML)^۲ و یادگیری عمیق (DL)^۳ می‌توانند داده‌های پیچیده و حجیم مربوط به انواع پسماندهای آزمایشگاهی را با دقت بالا تحلیل و پیش‌بینی کنند. به‌عنوان مثال، استفاده از شبکه‌های عصبی پیچیده می‌تواند به تحلیل همزمان داده‌های مربوط به نوع ماده، واکنش‌های شیمیایی، تاریخ مصرف، و حجم تولیدی کمک کند. این مدل‌ها قادر خواهند بود خطرات بالقوه را پیش‌بینی کرده و فرآیندهای دفع را به‌صورت هوشمندانه تنظیم کنند، حتی در شرایط ناپایدار یا تغییرپذیر.

۲. یکپارچه‌سازی فناوری‌های نوین با هوش مصنوعی (AI + IoT + Blockchain)

آینده‌ی مدیریت پسماند به‌شدت به همگرایی فناوری‌های نوین وابسته خواهد بود. ترکیب AI با حسگرهای هوشمند (IoT) این امکان را فراهم می‌آورد که داده‌ها به‌صورت لحظه‌ای از ظروف نگهداری، هودها، و مخازن پسماند جمع‌آوری شوند. فناوری بلاک‌چین

1 Explainable Artificial Intelligence

2 Machine Learning

3 Deep Learning



نیز می‌تواند زنجیره دفع پسماند را شفاف، قابل‌رهگیری و امن کند؛ به‌نحوی که امکان تقلب یا خطای انسانی کاهش یابد و مسیر حرکت مواد خطرناک به‌طور دقیق ثبت شود.

۳. تحقیقات در زمینه داده‌های غیرساختاریافته در فرآیند مدیریت پسماند

بسیاری از اطلاعات در محیط آزمایشگاه به‌صورت متون گزارش، تصاویر، اسناد PDF یا فرم‌های دست‌نویس هستند که برای ماشین‌ها قابل تحلیل مستقیم نیستند. پیشرفت در تکنیک‌های (NLP پردازش زبان طبیعی) و (Computer Vision بینایی ماشین) می‌تواند این منابع را به داده‌های ساختاریافته و قابل تحلیل تبدیل کند. استخراج خودکار اطلاعات از گزارش‌های ایمنی، فرم‌های ثبت پسماند و نتایج آنالیز آزمایشگاهی می‌تواند باعث بهبود دقت مدل‌های AI و تقویت سیستم‌های پیش‌بینی خطر شود.

۴. پشتیبانی از تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی

هوش مصنوعی می‌تواند به‌عنوان پشتیبان تصمیم‌گیری (Decision Support System) در شرایط اضطراری مانند نشت مواد خطرناک، انفجارهای شیمیایی یا نارسایی‌های دفع، به کار گرفته شود. با تحلیل سریع داده‌ها و ارزیابی سناریوها، AI می‌تواند راهکارهای ایمن و سریع واکنش را پیشنهاد دهد. به‌عنوان مثال، پیشنهاد خودکار مسیر تخلیه یا توقف فعالیت در بخش خاصی از آزمایشگاه بر اساس شدت حادثه و نوع ماده دخیل.

۵. تحقیق و توسعه در سیستم‌های توضیح‌پذیر (Explainable AI - XAI)

یکی از چالش‌های اصلی استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق در محیط‌های بحرانی، شفاف نبودن تصمیمات آنهاست. در آینده، نیاز به توسعه سیستم‌های AI توضیح‌پذیر وجود دارد؛ یعنی مدلهایی که نه تنها خروجی بدهند، بلکه دلایل انتخاب آن خروجی را نیز به‌زبان قابل‌درک برای انسان ارائه کنند. این قابلیت به‌ویژه در آموزش کارکنان و جلب اعتماد تیم‌های ایمنی اهمیت زیادی دارد.

۶. توسعه سیستم‌های خودکار برای بهینه‌سازی انرژی و کاهش آلاینده‌ها

هوش مصنوعی می‌تواند با تحلیل الگوهای مصرف انرژی در آزمایشگاه و ارتباط آن با میزان تولید پسماند، الگوهای بهینه مصرف و ذخیره‌سازی را پیشنهاد دهد. همچنین با پایش لحظه‌ای پارامترهایی مانند دما، pH، تهویه، و شرایط ذخیره‌سازی، می‌توان پسماندها را به‌گونه‌ای مدیریت کرد که کمترین میزان گازهای گلخانه‌ای یا آلودگی‌های زیست‌محیطی تولید شوند. این مسأله در آینده به‌ویژه با الزام به رعایت استانداردهای زیست‌محیطی بین‌المللی، اهمیت دوچندان خواهد داشت.

۷. شبیه‌سازی‌های چندعاملی (Agent-Based Simulation)

با استفاده از مدل‌های چندعاملی، می‌توان رفتار سیستم مدیریت پسماند را در مواجهه با سناریوهای مختلف شبیه‌سازی کرد. برای مثال، رفتار هم‌زمان انسان‌ها، ماشین‌ها و مواد در زمان بروز خطا یا خرابی در سامانه دفع. این ابزارها می‌توانند به عنوان بستر آموزش و تحلیل ایمنی نیز استفاده شوند تا تیم‌ها قبل از رخداد واقعی، آماده‌ی مواجهه با بحران باشند.

۸. طراحی چارچوب‌های اخلاقی و قانونی برای AI در مدیریت پسماند

کاربرد هوش مصنوعی در حوزه‌های حساس مانند پسماندهای بیولوژیکی و شیمیایی باید در چارچوب‌های اخلاقی و مقرراتی انجام شود. در آینده نیاز به چارچوب‌های بومی شده برای تضمین مسئولیت‌پذیری سیستم‌های AI، رعایت حریم داده‌ها، و اطمینان از عدم تبعیض یا خطای سیستمی به‌شدت احساس خواهد شد.

۹. پیشرفت در رباتیک هوشمند برای حمل و بازیافت پسماند

در آینده نزدیک، ربات‌هایی طراحی خواهند شد که به کمک AI بتوانند حمل‌ونقل پسماند، تفکیک خودکار مواد خطرناک، و حتی پاک‌سازی محل‌های آلوده را با دقت و ایمنی بالا انجام دهند. این فناوری می‌تواند ریسک مواجهه انسانی با عوامل زیان‌آور را به شدت کاهش دهد.



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

در نهایت، آینده استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت پسماند آزمایشگاهی به طور چشمگیری در بهبود ایمنی، پایداری و کاهش اثرات زیست محیطی پسماندها مؤثر خواهد بود. با بهره گیری از این فناوری، آزمایشگاهها قادر خواهند بود نه تنها در شبیه سازی و پیش بینی روند تولید پسماند، بلکه در کنترل و بازیافت آنها نیز گام های مؤثری بردارند. همچنین، سیستم های هوشمند می توانند به مدیریت بهتر منابع انرژی در آزمایشگاهها و کاهش هزینه های عملیاتی کمک کنند. این تحول دیجیتال می تواند زمینه ساز بهبود سیستم های ایمنی و مدیریت منابع در مراکز تحقیقاتی و حتی بیمارستانها باشد. به این ترتیب، در درازمدت، AI نه تنها موجب کاهش ریسک های ناشی از حوادث زیست محیطی می شود بلکه فرهنگ ایمنی و حفاظت از محیط زیست را در این مراکز تقویت خواهد کرد.

منابع:

1. Dobbe, R. *System safety and artificial intelligence*. in *Proceedings of the 2022 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*. 2022.
2. Singh, J., et al., *Smart waste management: a systematic review and scientometric analysis of artificial intelligence applications*. *Environment, Development and Sustainability*, 2025: p. 1-31.
3. Briffa, J., E. Sinagra, and R. Blundell, *Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans*. *Heliyon*, 2020. 6(9): p. e04691.
4. Council, N.R., et al., *Prudent practices in the laboratory: handling and management of chemical hazards, updated version*. 2011.
5. Fang, B., et al., *Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review*. *Environmental Chemistry Letters*, 2022. 20(4): p. 1959-1989.
6. Giovanni, C., F.L.N. Marques, and W.M.R. Günther, *Laboratory chemical waste: hazard classification by GHS and transport risk*. *Rev Saude Publica*, 2021. 55: p. 102.
7. EDITION, F., *Laboratory Biosafety Manual*. *J. Lab. Biosaf. Man*: 2003. 2(2): p. 1-109.
8. Esmaeilzadeh, A., Eftekhari, and R. Akbari, *Hospital Waste Management*. *Paramedical Sciences and Military Health*, 2020. 15(4): p. 50-63.
9. Alsabt, R., et al., *Optimizing waste management strategies through artificial intelligence and machine learning - An economic and environmental impact study*. *Cleaner Waste Systems*, 2024. 8: p. 100158.
10. Kuang, E.Z., K.R. Bhandari, and J. Gao, *Optimizing Waste Management with Advanced Object Detection for Garbage Classification*. *arXiv preprint arXiv:2410.09975*, 2024.
11. Baarimah, A.O., et al., *Artificial intelligence in wastewater treatment: Research trends and future perspectives through bibliometric analysis*. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2024. 10: p. 100926.
12. Sakkaravarthy, S., N. Jano, and A. Vijayakumar, *Overcoming Challenges in Traditional Waste Water Treatment Through AI-Driven Innovation*. 2024. p. 53-81.
13. Donati, F., et al., *The future of artificial intelligence in the context of industrial ecology*. *Journal of Industrial Ecology*, 2022. 26(4): p. 1175-1181.
14. Shiri, F.M., et al., *A comprehensive overview and comparative analysis on deep learning models: CNN, RNN, LSTM, GRU*. *arXiv preprint arXiv:2305.17473*, 2023.
15. Nafiz, M.S., et al. *Convowaste: An automatic waste segregation machine using deep learning*. in *2023 3rd International conference on robotics, electrical and signal processing techniques (ICREST)*. 2023. IEEE.
16. Mitchell, D., et al., *A review: Challenges and opportunities for artificial intelligence and robotics in the offshore wind sector*. *Energy and AI*, 2022. 8: p. 100146.



همایش ملی فناوری و نوآوری در آبرزی پروری

امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست



National Conference Technology and Innovation in Aquaculture Food Security and Environmental Protection

زمان برگزاری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

17. Alprol, A.E., et al., *Artificial Intelligence Technologies Revolutionizing Wastewater Treatment: Current Trends and Future Prospective*. Water, 2024. **16**(2): p. 314.
18. Nahiduzzaman, M., et al., *An automated waste classification system using deep learning techniques: Toward efficient waste recycling and environmental sustainability*. Knowledge-Based Systems, 2025. **310**: p. 113028.
19. Rautela, K.S., M.K. Goyal, and R.Y. Surampalli, *AI and Machine Learning for Optimizing Waste Management and Reducing Air Pollution*. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2025. **29**(3): p. 04025014.