

### فرآیندهای تصفیه پساب پرتابل با هوش مصنوعی

فروغ سبزواریان دزفولی<sup>۱</sup>، فروزان فرخیان<sup>۲\*</sup>، محمد ایمن پناه<sup>۳</sup>

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

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

\*مسئول مکاتبات: foroz.farrokhan@iau.ac.ir

#### چکیده

افزایش آلودگی منابع آب ناشی از تخلیه پسابهای صنعتی حاوی آلایندههای پیچیده‌ای مانند فلزات سنگین، فسفات‌ها و سورفکتانت‌ها، چالشی جدی برای سلامت انسان و پایداری محیط‌زیست ایجاد کرده است. در پاسخ به ناکارآمدی روش‌های سنتی، فناوری‌های نوین مانند فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) غشاهای پیشرفته، نانوذرات و سامانه‌های پرتابل به کار گرفته شده‌اند. با این حال، بهره‌برداری از این روش‌ها در مقیاس صنعتی با چالش‌هایی مانند مصرف بالای انرژی، نیاز به پایش مداوم، و عدم تطبیق‌پذیری با شرایط متغیر همراه است. این مقاله مروری با هدف تحلیل جامع قابلیت‌های هوش مصنوعی در بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه پساب صنعتی تدوین شده است. تمرکز اصلی بر بررسی عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم‌های پشتیبان تصمیم در بهبود بازده، کنترل پلادرنگ، کاهش هزینه و ارتقای قابلیت انعطاف سامانه‌های پرتابل تصفیه است. نتایج مرور منابع علمی نشان می‌دهد که تلفیق هوش مصنوعی با فناوری‌های تصفیه می‌تواند منجر به توسعه سامانه‌هایی با عملکرد هوشمند، پایدار و خودکار شود. این رویکرد نه تنها کیفیت تصفیه را بهبود می‌بخشد، بلکه مصرف انرژی، مواد شیمیایی و وابستگی به اپراتور انسانی را نیز کاهش می‌دهد. با این وجود، چالش‌هایی مانند کمبود داده‌های ساختاریافته، پیچیدگی مدل‌سازی و فقدان استانداردهای بین‌المللی همچنان مانع توسعه فراگیر این فناوری در صنعت شده است. به کارگیری هوش مصنوعی در تصفیه پساب، گامی مؤثر در جهت تحقق اهداف توسعه پایدار خواهد بود.

**واژگان کلیدی:** تصفیه پرتابل، هوش مصنوعی، پساب صنعتی، بهینه‌سازی.

#### مقدمه

در دنیای صنعتی امروز، تولید پساب‌های صنعتی به یکی از چالش‌های اساسی زیست‌محیطی تبدیل شده است (Villarín and Merel, 2020). این پساب‌ها، به‌ویژه در کارخانه‌های تولید مواد شوینده، حاوی ترکیبات سمی، مواد شیمیایی پایدار، و آلاینده‌هایی هستند که می‌توانند به‌طور جدی منابع آب و اکوسیستم‌های طبیعی را تحت تأثیر قرار دهند. این مواد شامل سورفکتانت‌ها، آنیون‌ها، کاتیون‌ها، مواد آلی و ترکیبات شیمیایی قوی که اگر به‌درستی تصفیه نشوند، می‌توانند آسیب‌های طولانی‌مدتی به محیط زیست وارد کنند (Giagnorio et al., 2017; Ivanković and Hrenović, 2010).

با توجه به کمبود منابع آب شیرین در بسیاری از مناطق جهان، بازیافت و استفاده مجدد از پساب‌های صنعتی اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است. فناوری‌های نوین تصفیه پساب، علاوه بر حذف آلاینده‌ها، امکان بازیابی آب را فراهم می‌کنند که می‌تواند در مصارف صنعتی، کشاورزی و حتی شهری مورد استفاده قرار گیرد (Lin and Zhang, 2023).

طبق گزارش‌های سازمان جهانی بهداشت (WHO) و برنامه محیط زیست سازمان ملل (UNEP)، بیش از ۸۰ درصد از بیماری‌های انسان‌زا در کشورهای در حال توسعه ناشی از آلودگی آب و منابع طبیعی است که عمدتاً به دلیل پساب‌های صنعتی و خانگی غیر تصفیه‌شده به وقوع می‌پیوندد (UNEP, 2010). در این میان، صنایع شوینده با مصرف مقادیر زیادی آب و استفاده از مواد شیمیایی مختلف، نقش ویژه‌ای در این بحران ایفا می‌کنند (Mortazavi and Rahman, 2014).

در همین راستا، مطالعات نشان داده‌اند که روش‌های اکسیداسیون پیشرفته، مانند فرآیند فنتون، می‌توانند در حذف آلاینده‌های پایدار پساب‌های صنعتی مؤثر باشند که فرآیند فنتون توانسته است به‌طور قابل توجهی COD پساب صنایع شوینده را کاهش دهد. این مطالعات



همچنین تأکید دارند که تنظیم دقیق پارامترهای عملیاتی این فرآیند می‌تواند بازدهی تصفیه را بهبود بخشد و کارایی آن را افزایش دهد. این یافته‌ها اهمیت استفاده از فناوری‌های نوین در مدیریت پساب صنعتی را برجسته می‌کنند (Pignatello *et al.*, 2006).

### چالش‌های پساب صنعتی در صنعت شوینده

صنایع تولید مواد شوینده با چالش‌های خاصی در مدیریت پساب مواجه هستند. پساب‌های تولیدی در این کارخانه‌ها معمولاً حاوی ترکیبات شوینده مانند سورفکتانت‌ها هستند که می‌توانند به راحتی در محیط آبی حل شده و تأثیرات منفی زیادی بر زندگی آبزیان و اکوسیستم‌های آبی داشته باشند (Alprol and Khairy, 2025). این ترکیبات به عنوان آلاینده‌های مقاوم در برابر تجزیه زیستی شناخته می‌شوند که می‌توانند مدت‌ها در محیط باقی بمانند (Alprol *et al.*, 2024).

علاوه بر این، پساب‌های صنعتی معمولاً شامل ترکیبات شیمیایی پیچیده‌ای مانند فلزات سنگین، ترکیبات آلی پایدار و محصولات جانبی ناشی از فرآیندهای ضدعفونی هستند. تحقیقات نشان داده است که بسیاری از این ترکیبات می‌توانند حتی پس از تصفیه اولیه و ثانویه در آب باقی بمانند و اثرات نامطلوبی بر سلامت انسان و محیط زیست داشته باشند (Jin *et al.*, 2013).

### فناوری‌های نوین در تصفیه پساب صنعتی

در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوین تصفیه پساب توانسته‌اند تحولات چشمگیری در صنعت شوینده ایجاد کنند. از جمله این فناوری‌ها می‌توان به اسمز معکوس (RO)، فیلتراسیون غشایی (UF و MF)، نانوتکنولوژی و فرآیندهای بیولوژیکی پیشرفته اشاره کرد که به‌ویژه در تصفیه مواد شیمیایی مقاوم مؤثر هستند (Fadaei Tehrani and Heidari Savadjani, 2024).

### استفاده از سیستم‌های تصفیه پرتابل

یکی از نوآوری‌های مؤثر در این صنعت، استفاده از سیستم‌های تصفیه پساب پرتابل است. این سیستم‌ها با قابلیت جابجایی و انعطاف‌پذیری بالا، به کارخانه‌ها این امکان را می‌دهند که پساب‌های خود را به صورت محلی و فوری تصفیه کنند. این فناوری‌ها نه تنها هزینه‌ها را کاهش می‌دهند، بلکه به حفظ منابع آبی و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی کمک می‌کنند (Núñez *et al.*, 2022).

### بهینه‌سازی فرآیند تصفیه پساب با هوش مصنوعی

یکی از تحولات عمده در فرآیند تصفیه پساب، استفاده از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی مصرف منابع و انرژی است. بهینه‌سازی فرآیندها با استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند مشکلات رایج در تصفیه سنتی مانند مصرف زیاد مواد شیمیایی و انرژی را حل کند (Behera *et al.*, 2024).

### برخی از کاربردهای هوش مصنوعی در فرآیند تصفیه پساب

۱. تنظیم هوشمند مصرف مواد شیمیایی: با استفاده از سنسورهای آنالیز، کیفیت پساب در لحظه آنالیز شده و الگوریتم‌های هوش مصنوعی بر اساس این داده‌ها مقدار دقیق مواد شیمیایی مورد نیاز را تعیین می‌کنند. این سیستم‌ها از مصرف بیش از حد مواد شیمیایی جلوگیری کرده و به کاهش هزینه‌ها و حفاظت از محیط زیست کمک می‌کنند (Tavakoli, 2024; Alam *et al.*, 2022).

۲. بهینه‌سازی سیستم هوادهی: هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های سنسورها، میزان هوادهی مورد نیاز برای تصفیه بیولوژیکی را تنظیم می‌کند تا مصرف انرژی کاهش یابد و بازده تصفیه افزایش یابد (Mao *et al.*, 2024).

۳. تنظیم اتوماتیک دبی و سرعت جریان آب: پیش‌بینی و تنظیم جریان آب به‌طور هوشمندانه به جلوگیری از فشار بیش‌ازحد به سیستم‌ها کمک کرده و کارایی تصفیه را بهبود می‌بخشد (Alam *et al.*, 2021).

در این راستا، بهینه‌سازی فرآیند تصفیه پساب با بهره‌گیری از تکنولوژی‌های نوین، از جمله هوش مصنوعی، می‌تواند راه‌حلی مؤثر برای مقابله با چالش‌ها باشد. مطالعات انجام شده، نشان می‌دهد که افزایش بارگذاری مواد آلی می‌تواند تأثیر منفی بر کیفیت پساب و کارایی سیستم‌های تصفیه بگذارد. این تحقیق نشان می‌دهد که عملکرد سیستم‌های تصفیه در پساب‌های صنعتی با مقدار بالای آلاینده‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد و بهینه‌سازی فرآیند تصفیه برای دستیابی به استانداردهای زیست‌محیطی ضروری است (Iran *et al.*, 2010). بنابراین، استفاده از هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند تصفیه می‌تواند این تأثیرات منفی را کاهش دهد و به بهبود عملکرد سیستم‌های تصفیه کمک کند.



### پیشینه علمی استفاده از هوش مصنوعی در تصفیه پساب پرتابل

در سال‌های اخیر، استفاده از هوش مصنوعی (AI) به‌ویژه الگوریتم‌های یادگیری ماشین (ML) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به عنوان یک ابزار تحول‌آفرین در بهینه‌سازی فرایندهای تصفیه پساب مورد توجه محققان قرار گرفته است. این الگوریتم‌ها قابلیت تحلیل حجم زیادی از داده‌های فرآیندی را دارند و می‌توانند الگوهای پیچیده‌ای را شناسایی کنند که در روش‌های سنتی قابل تشخیص نیستند. یکی از مهم‌ترین کارهای اخیر که مروری جامع بر تکنولوژی‌های هوش مصنوعی در تصفیه پساب ارائه می‌دهد، مطالعه Alprol و همکاران (۲۰۲۵) در این تحقیق، تأکید شده که مدل‌های یادگیری عمیق توانسته‌اند در پیش‌بینی پارامترهای کلیدی مانند COD, BOD, TSS و عملکرد بسیار دقیقی داشته باشند. همچنین، کاربرد شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) برای مدل‌سازی دینامیکی سیستم‌های تصفیه در شرایط ناپایدار نشان داده شده است. همچنین در مطالعه کاربرد الگوریتم‌های هوشمند A'alami و همکاران (۲۰۲۱) به پایش هوشمند کیفیت پساب در سیستم‌های پرتابل پرداخته‌اند. آن‌ها از الگوریتم‌های ترکیبی مانند شبکه عصبی بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک بهره برده‌اند تا میزان دقت پیش‌بینی و تصمیم‌گیری در زمان واقعی را ارتقاء دهند.

### مدل‌های پیش‌بینی کیفیت پساب با هوش مصنوعی

پیش‌بینی کیفیت پساب در سیستم‌های تصفیه، به‌ویژه در واحدهای پرتابل که در شرایط محیطی ناپایدار فعالیت می‌کنند، یکی از چالش‌های کلیدی در مدیریت بهینه فرایندهای تصفیه است. روش‌های سنتی مبتنی بر سنجش‌های متوالی آزمایشگاهی، معمولاً کند و پرهزینه‌اند و نمی‌توانند پاسخگوی نیاز به پایش لحظه‌ای باشند. در این میان، مدل‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه الگوریتم‌های یادگیری ماشین، قابلیت پیش‌بینی دقیق و بلادرنگ پارامترهای کلیدی پساب مانند BOD (نیاز بیوشیمیایی به اکسیژن)، COD (نیاز شیمیایی به اکسیژن)، TSS (جامدات معلق کل) و pH را فراهم کرده‌اند، در مطالعه Alprol و همکاران (۲۰۲۵) نشان داده شده که استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) توانسته است با دقت بالا کیفیت خروجی پساب را در واحدهای تصفیه کوچک و پرتابل پیش‌بینی کند. همچنین، این مدل‌ها با داده‌های عملیاتی آموزش‌دیده‌اند و قادرند تغییرات ناگهانی در ورودی سیستم را نیز در نظر بگیرند. در پژوهش کاربرد الگوریتم‌های هوشمند A'alami و همکاران (۲۰۲۱) نیز یک مدل ترکیبی شامل شبکه عصبی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک (GA-ANN) استفاده کرده‌اند که توانسته است دقت پیش‌بینی BOD را به بیش از ۹۵ درصد برساند. این روش‌ها به‌ویژه در شرایطی که پایش سنسوری محدود است، عملکرد قابل‌اعتمادی ارائه داده‌اند. در مطالعه کاربرد ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها توسط Noori و همکاران (۲۰۱۹) مدل SVM در مقایسه با مدل‌های آماری کلاسیک، دارای ضریب همبستگی بالاتر و خطای پیش‌بینی کمتر گزارش شده است.

### مدل‌های کنترلی هوشمند در سیستم‌های تصفیه پساب پرتابل

سیستم‌های پرتابل تصفیه پساب، به دلیل محدودیت در فضا، انرژی و منابع انسانی، نیازمند کنترل خودکار، پایدار و هوشمند هستند. مدل‌های کنترلی مبتنی بر هوش مصنوعی، به‌ویژه در محیط‌هایی با بار آلودگی متغیر و شرایط غیرخطی، توانسته‌اند جایگزین مناسبی برای روش‌های کنترلی کلاسیک مانند PID و کنترل دستی شوند. در سال‌های اخیر، کنترل تطبیقی بر پایه شبکه‌های عصبی (Adaptive Neural Control) و کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل (Model Predictive Control - MPC) به کمک الگوریتم‌های یادگیری عمیق، برای تنظیم پارامترهای کلیدی مانند زمان ماند، نرخ جریان، و دوز مواد شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌ویژه در سیستم‌های پرتابل که معمولاً با نوسانات شدید ورودی روبه‌رو هستند، این مدل‌ها قابلیت یادگیری و تطابق با شرایط جدید را بدون نیاز به بازتنظیم دستی فراهم می‌کنند. مطالعه Alprol و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد که با استفاده از الگوریتم Deep Q-Learning می‌توان سیستم‌های تصفیه خاکستری پرتابل را به‌گونه‌ای کنترل کرد که همزمان مصرف انرژی، استفاده از مواد شیمیایی و خطای خروجی کاهش یابد. این مدل‌ها قابلیت یادگیری تقویتی را به سیستم می‌دهند و اجازه می‌دهند تا سیستم از تجربیات گذشته خود برای بهینه‌سازی تصمیم‌گیری استفاده کند.

### بهینه‌سازی مصرف انرژی و مواد شیمیایی با الگوریتم‌های هوش مصنوعی



یکی از چالش‌های اساسی در بهره‌برداری از سیستم‌های تصفیه پساب، به‌ویژه در واحدهای پرتابل، مصرف بالای انرژی و مواد شیمیایی است که می‌تواند بهره‌وری سیستم را کاهش دهد و هزینه‌های عملیاتی را افزایش دهد. در این راستا، الگوریتم‌های هوش مصنوعی نقش برجسته‌ای در بهینه‌سازی چندهدفه مصرف منابع ایفا کرده‌اند. الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم مورچگان (ACO) به‌صورت گسترده‌ای برای جستجوی فضای بهینه پارامترهای عملیاتی به کار رفته‌اند. این الگوریتم‌ها با ترکیب با شبکه‌های عصبی یا مدل‌های یادگیری ماشین، قادر به کشف نقاط تعادل بین مصرف انرژی، دوز مواد شیمیایی و کیفیت خروجی پساب هستند. Alprol و همکاران (۲۰۲۴) از مدل ترکیبی PSO-ANN برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های بیولوژیکی پرتابل استفاده شد. نتایج نشان داد که این روش باعث کاهش ۱۸ درصد مصرف انرژی در فرآیند هوادهی بدون افت کیفیت پساب خروجی شد. همچنین A'alami و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی دوز کلر و مواد منعقدکننده، توانستند تعادلی بین مصرف مواد شیمیایی و کیفیت گندزدایی برقرار کنند که در سیستم‌های سیار و کم‌ظرفیت اهمیت زیادی دارد (Villarín and Merel, 2020). مطالعه دیگری که با استفاده از رویکرد چندهدفه مبتنی بر الگوریتم NSGA-II توسط Ibrahim و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد می‌توان همزمان چندین شاخص عملکردی از جمله انرژی، هزینه، زمان ماند و آلودگی خروجی را بهینه‌سازی کرد.

### کاربرد سیستم‌های تصمیم‌یار (Decision Support Systems) در تصفیه پرتابل

با پیچیده‌تر شدن سیستم‌های تصفیه و افزایش داده‌های مربوط به کیفیت پساب، شرایط محیطی و بهره‌برداری، نیاز به سامانه‌هایی که تصمیم‌گیری را برای اپراتورها تسهیل و بهینه کنند، بیش از پیش احساس می‌شود. در این میان، سیستم‌های تصمیم‌یار (DSS) مبتنی بر هوش مصنوعی نقش کلیدی در تحلیل داده‌ها، پیشنهاد راهکارهای بهینه و افزایش پایداری عملکرد سیستم‌های پرتابل ایفا می‌کنند. سیستم‌های DSS با یکپارچه‌سازی مدل‌های پیش‌بینی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و پایگاه‌های دانش، می‌توانند به‌صورت بلادرنگ (real-time) در فرآیند تصمیم‌گیری درباره تنظیمات بهینه، تعمیر و نگهداری پیش‌بینی شده و پاسخ به نوسانات ورودی مشارکت کنند. در سیستم‌های پرتابل، این قابلیت منجر به کاهش نیاز به حضور نیروی انسانی متخصص در محل و افزایش خودمختاری سیستم می‌شود. به‌عنوان نمونه، در مطالعه یک سیستم DSS مبتنی بر مدل Random Forest برای پیش‌بینی افت کیفیت پساب خروجی طراحی شد که Alprol و همکاران (۲۰۲۴) توانستند به‌صورت خودکار تغییرات در دوز مواد شیمیایی را پیشنهاد دهند. این سیستم با استفاده از داده‌های سنسورهای آنلاین، هشدارهای هوشمند برای اپراتور صادر می‌کرد. در مدل‌های پیشرفته‌تر، DSS‌ها از ترکیب شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) با تحلیل حساسیت برای پیش‌بینی نوسانات مصرف انرژی و تحلیل اثر تغییرات عملیاتی استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها با طراحی رابط کاربری ساده، قابلیت استفاده در سایت‌های دورافتاده و دور از دسترس را نیز دارند.

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه پساب صنعتی در صنایع انجام شده است، با تمرکز بر بهره‌گیری از فناوری‌های نوین تصفیه و هوش مصنوعی، و همچنین استفاده از سیستم‌های تصفیه پرتابل به‌عنوان راهکاری انعطاف‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه. با توجه به حضور ترکیبات پیچیده و پایداری همچون سورفکتانت‌ها، ترکیبات آلی مقاوم و فلزات سنگین در پساب این صنایع، به‌کارگیری روش‌هایی مانند فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)، فیلتراسیون غشایی و یوراکتورهای غشایی (MBR) به‌منظور افزایش بازدهی تصفیه ضروری است. در این راستا، پژوهش حاضر نقش الگوریتم‌های هوش مصنوعی را در بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی، کاهش مصرف انرژی و ارتقای کارایی فرآیندهای تصفیه تحلیل می‌کند. و در قالب یک مطالعه مروری، کاربرد این فناوری‌ها بررسی می‌شود. این مطالعه با هدف ارائه راهکارهایی برای ارتقای عملکرد سیستم‌های تصفیه، در راستای دستیابی به توسعه پایدار و مدیریت بهینه منابع آبی انجام شده است. پیشنهادها مطرح‌شده در این پژوهش شامل آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی، استفاده از مدل‌های هیبریدی و چندمعیاری، تلفیق هوش مصنوعی با سیستم‌های بازیابی منابع، و تقویت همکاری‌های بین‌المللی برای استانداردسازی فناوری‌های مبتنی بر AI است. این موارد می‌توانند زمینه‌ساز بهره‌گیری مؤثرتر از هوش مصنوعی در صنعت تصفیه پساب و ارتقای عملکرد آن باشند.





### مبانی نظری تحقیق

#### ۱. ترکیبات شیمیایی پساب صنعتی

۱.۱. سورفکتانت‌ها: سورفکتانت‌ها ترکیبات فعال سطحی هستند که به دلیل ساختار آمفیپاتیک خود، کشش سطحی آب را کاهش داده و موجب افزایش انحلال‌پذیری مواد آلی در آب می‌شوند (Ghosh *et al.*, 2020). این ترکیبات به چهار دسته آنیونی، کاتیونی، غیر یونی و آمفوتریک تقسیم می‌شوند که هر یک کاربردهای مشخصی در صنایع دارند (Aksenenk, 2001).

۱.۲. فسفات‌ها: فسفات‌ها به‌عنوان نرم‌کننده آب در شوینده‌ها به کار می‌روند. افزایش غلظت فسفات‌ها در منابع آبی منجر به پدیده اوتریفیکاسیون شده و موجب رشد بی‌رویه جلبک‌ها، کاهش اکسیژن محلول در آب و مرگ آبزیان می‌شود (Bunce *et al.*, 2018).

۱.۳. مواد آلی و معدنی: پساب صنعتی حاوی ترکیبات آلی مانند روغن‌ها، چربی‌ها و پروتئین‌ها که می‌توانند کیفیت آب را تحت تأثیر قرار دهند (Imai *et al.*, 2002).

#### ۲. شاخص‌های کیفیت پساب

پارامترهای کلیدی در سنجش کیفیت پساب عبارت‌اند از: اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) و اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (BOD) که نشان‌دهنده میزان آلاینده‌های آلی در آب هستند (Merdy *et al.*, 2024). جامدات معلق کل (TSS) که بر شفافیت و کیفیت آب اثرگذار است. pH و دما که نقش مهمی در فرآیندهای تصفیه ایفا می‌کنند (Galdeano *et al.*, 2018).

#### ۳. تأثیرات زیست‌محیطی پساب صنعتی

۳.۱. آلودگی منابع آب: ورود این پساب‌ها به منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌تواند منجر به آلودگی گسترده و اثرات بلندمدت بر سلامت انسان شود (Takdastan *et al.*, 2015).

۳.۲. تأثیر بر اکوسیستم‌های آبی: ترکیبات شیمیایی موجود در پساب می‌توانند موجب مسمومیت آبزیان، کاهش تنوع زیستی و تخریب زیستگاه‌های آبی شوند (Sarkar *et al.*, 2021). پدیده اوتریفیکاسیون نیز از دیگر اثرات مخرب این پساب‌ها است (Smith and Schindler, 2009).

۳.۳. مخاطرات بهداشتی: تماس با آب آلوده ممکن است باعث بیماری‌های پوستی، گوارشی و عصبی شود (Tayyibi, 2017).

۳.۴. مقاومت در برابر تجزیه زیستی: برخی ترکیبات شیمیایی نظیر سورفکتانت‌های شاخه‌دار به‌سختی تجزیه می‌شوند و می‌توانند اثرات مخرب طولانی‌مدتی بر محیط‌زیست داشته باشند (Aksenenko, 2021).

#### ۴. فناوری‌های نوین تصفیه پساب

۴.۱. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)

فرآیند فنتون: واکنش بین یون آهن ( $+Fe^{2+}$ ) و هیدروژن پراکسید ( $H_2O_2$ ) منجر به تولید رادیکال‌های هیدروکسیل ( $OH$ ) شده و موجب تجزیه آلاینده‌های آلی می‌شود (Pignatello *et al.*, 2006).

UV/ $H_2O_2$ : ترکیب اشعه فرابنفش (UV) و هیدروژن پراکسید منجر به تولید رادیکال‌های هیدروکسیل شده و در حذف آلاینده‌های آلی مقاوم مؤثر است (Kermani, 2018). الکترواکسیداسیون: این فرآیند با استفاده از الکترودها، آلاینده‌های آلی را تجزیه کرده و می‌تواند در حذف فلزات سنگین مؤثر باشد (Krystynik *et al.*, 2019).

#### ۴.۲. فناوری‌های غشایی

نانوفیلتراسیون (NF): حذف یون‌های چند ظرفیتی و ترکیبات آلی با وزن مولکولی بالا، اولترافیلتراسیون (UF) و میکروفیلتراسیون (MF): حذف ذرات معلق در اندازه‌های مختلف به‌عنوان پیش‌تصفیه یا روش‌های مستقل تصفیه (Mobini Lotfabad and Khodabakhshi, 2022).

#### ۴.۳. فناوری‌های جذب سطحی و نانوتکنولوژی



کربن فعال به دلیل ساختار متخلخل و سطح ویژه بالای خود، یکی از پرکاربردترین جاذبها در تصفیه پساب صنعتی محسوب می‌شود و به‌ویژه در حذف آلاینده‌های آلی مانند سورفکتانت‌ها، رنگ‌ها و ترکیبات فنولی موجود در پساب کارخانه‌های مواد شوینده نقش مؤثری دارد (Chaharkam *et al.*, 2024). همچنین، نانومواد جاذب نظیر نانوذرات اکسید آهن و نانولوله‌های کربنی، به‌دلیل ویژگی‌های سطحی منحصر به فرد، ظرفیت جذب بالا و فعالیت شیمیایی زیاد، در حذف فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی از جریان‌های پساب صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Siyahi *et al.*, 2021). استفاده از این مواد می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در ارتقاء کیفیت پساب و کاهش بار آلودگی زیست‌محیطی در صنایع شوینده مطرح شود.

### ۴.۴. هوش مصنوعی و انرژی‌های تجدیدپذیر در تصفیه پساب

هوش مصنوعی: استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی کیفیت پساب، بهینه‌سازی فرآیندها و کنترل سیستم‌های تصفیه (A'alami *et al.*, 2021). انرژی‌های تجدیدپذیر: بهره‌گیری از انرژی خورشیدی و باد برای کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی و افزایش پایداری سیستم‌های تصفیه. ترکیب فناوری‌های نوظهور نظیر هوش مصنوعی (AI) و انرژی‌های تجدیدپذیر در فرایندهای تصفیه پساب، به‌ویژه در سیستم‌های پرتابل و غیرمتمرکز، در سال‌های اخیر به‌عنوان یک رویکرد نوین و تحول‌آفرین مورد توجه محققان و صنعت قرار گرفته است. سیستم‌های تصفیه متداول، اغلب با محدودیت‌هایی مانند مصرف بالای انرژی، هزینه‌های عملیاتی زیاد و نیاز به نظارت انسانی دائمی مواجه‌اند؛ در حالی که هوش مصنوعی با فراهم‌سازی بسترهای تحلیل داده‌های محیطی، فرایندهای تصمیم‌گیری خودکار و یادگیری از الگوهای عملکرد، راهکارهایی برای بهبود این چالش‌ها ارائه می‌دهد (Tavakoli, 2024).

در این راستا، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین (ML)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) و سیستم‌های فازی، برای پیش‌بینی پارامترهای کلیدی کیفیت پساب مانند BOD, COD, TSS و pH، بهینه‌سازی عملکرد واحدهای مختلف تصفیه نظیر راکتورهای بیولوژیکی و واحدهای هوادهی، و همچنین طراحی سیستم‌های کنترلی هوشمند، به‌طور گسترده‌ای مورد پژوهش قرار گرفته است (A'alami *et al.*, 2021). این الگوریتم‌ها قادرند با تحلیل داده‌های زنده و گذشته، روند عملکرد سیستم را به‌صورت مستمر اصلاح کرده و در صورت بروز اختلال، به‌سرعت واکنش مناسب را پیشنهاد دهند یا اعمال کنند (Singh *et al.*, 2023). از دیگر مزایای مهم استفاده از هوش مصنوعی، افزایش دقت و سرعت در شناسایی نشت‌ها، خرابی تجهیزات و حتی پیش‌بینی نیازهای نگهداری پیشگیرانه (Predictive Maintenance) است.

از سوی دیگر، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی خورشیدی و بادی، به‌عنوان راهکاری برای کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی، کاهش هزینه‌ها و ارتقاء پایداری زیست‌محیطی سیستم‌های تصفیه مورد توجه قرار گرفته است (Sarmadi *et al.*, 2017). در سیستم‌های پرتابل و مستقل، به‌ویژه در مناطق فاقد شبکه برق سراسری یا در شرایط بحران، استفاده از صفحات خورشیدی، توربین‌های بادی کوچک و ذخیره‌سازهای انرژی، موجب افزایش تاب‌آوری و استمرار عملکرد سامانه تصفیه می‌شود. این موضوع نه‌تنها قابلیت دسترسی به فناوری تصفیه را در مناطق محروم ارتقاء می‌دهد، بلکه در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ منابع انرژی غیرقابل تجدید نیز نقش مؤثری ایفا می‌کند.

مطالعات اخیر همچنین نشان می‌دهند که ترکیب هوش مصنوعی با سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه در طراحی سیستم‌های پرتابل تصفیه پساب، منجر به ایجاد راهکارهایی خودکار، هوشمند و تطبیق‌پذیر با شرایط محیطی می‌شود. به‌عنوان نمونه، سامانه‌هایی طراحی شده‌اند که به‌صورت دینامیک، بار مصرفی را با سطح انرژی تولیدی تنظیم می‌کنند، و در عین حال با تحلیل آنلاین کیفیت فاضلاب، زمان و شدت عملکرد هر واحد تصفیه را بهینه می‌سازند (Singh *et al.*, 2023; Ahmed, 2024). این سامانه‌ها به دلیل قابلیت تنظیم خودکار، عدم نیاز به اپراتور دائمی، و پایداری عملکرد، به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای اضطراری، نظامی، کمپ‌های موقت و جوامع فاقد زیرساخت‌های پیشرفته تبدیل شده‌اند.



همافزایی فناورانه: نقش مکمل هوش مصنوعی و انرژی‌های تجدیدپذیر در تحول سیستم‌های تصفیه پساب یکی از رویکردهای نوین و مؤثر در طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های تصفیه پساب، به‌ویژه نمونه‌های پرتابل، همافزایی میان هوش مصنوعی و منابع انرژی تجدیدپذیر است. در این چارچوب، هوش مصنوعی نه تنها به بهینه‌سازی فرآیندهای فنی تصفیه کمک می‌کند، بلکه نقش کلیدی در مدیریت مصرف انرژی، افزایش بازده بهره‌برداری و کاهش اثرات محیطی ایفا می‌نماید. به‌عنوان نمونه، الگوریتم‌های هوشمند می‌توانند با پیش‌بینی بار آلودگی ورودی و سطح تقاضای انرژی، زمان‌بندی بهینه‌ای برای فعال‌سازی تجهیزات مانند پمپ‌ها، راکتورها یا سیستم‌های هوادهی ارائه دهند؛ به‌گونه‌ای که مصرف انرژی الکتریکی دقیقاً با بازده لحظه‌ای سیستم تطابق یابد (Tavakoli, 2024; Alam *et al.*, 2021). در سیستم‌هایی که با انرژی خورشیدی یا بادی کار می‌کنند، نوسانات در دسترسی به منابع انرژی یک چالش مهم است. در این شرایط، هوش مصنوعی می‌تواند به عنوان مغز متفکر سیستم عمل کرده و با تحلیل الگوهای تغییرات محیطی (نظیر تابش خورشید، سرعت باد، یا دمای محیط)، الگوریتم‌های کنترلی تطبیقی‌پذیر را پیاده‌سازی کند. این الگوریتم‌ها ظرفیت شارژ باتری، ذخیره‌سازی آب تصفیه‌شده، زمان‌بندی فرآیندها و حتی توزیع بار مصرف انرژی را به صورت لحظه‌ای تنظیم می‌کنند (Fadaei Tehrani and Heidari, 2024; Ali *et al.*, 2013). این رویکرد به‌ویژه در مناطق دورافتاده، اردوگاه‌های بحران، مناطق جنگ‌زده یا سکونت‌گاه‌های موقت، که پایداری عملکرد سیستم بسیار حیاتی است، کاربردی و اثربخش تلقی می‌شود (Mortazavi and Rahman, 2014). از سوی دیگر، هوش مصنوعی می‌تواند در طراحی اولیه سیستم نیز نقش ایفا کند؛ به‌طور مثال، با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف عملکرد سیستم در شرایط اقلیمی و بار آلودگی متفاوت، می‌توان به طراحی‌های بهینه‌تری از لحاظ اندازه، ظرفیت، و ترکیب تجهیزات دست یافت، همین موجب کاهش هزینه‌های اولیه، افزایش قابلیت اطمینان، و کاهش نیاز به اپراتور انسانی می‌شود (Mobini Lotfabad and Khodabakhshi, 2022).

در نهایت، ادغام ساختاریافته‌ی این دو فناوری (AI) و انرژی‌های تجدیدپذیر امکان توسعه نسل جدیدی از سیستم‌های تصفیه را فراهم می‌سازد که ویژگی‌هایی مانند هوشمندی، انعطاف‌پذیری، پایداری و خودکفایی را به‌صورت توأمان دارا هستند. این سامانه‌ها نه تنها در رفع چالش‌های فعلی در حوزه تصفیه پساب مفید هستند، بلکه با رویکرد آینده‌نگر، مسیر تحقق اهداف توسعه پایدار (SDGs) را نیز هموار می‌سازند (Chaharkam *et al.*, 2024; Siyahi *et al.*, 2021).

### ۵. استانداردهای محیط زیست در تصفیه پساب‌های صنعتی

رعایت استانداردهای محیط زیست در تصفیه پساب‌های صنعتی اهمیت بالایی دارد. سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران، به همراه سازمان‌های بین‌المللی نظیر سازمان بهداشت جهانی (WHO) و آژانس حفاظت محیط‌زیست (EPA)، استانداردهایی برای پارامترهای پساب نظیر BOD، COD، TSS، فلزات سنگین و pH تدوین کرده‌اند که رعایت آن‌ها برای جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست ضروری است (Baharvand *et al.*, 2019).

### چالش‌ها و خلاءهای استفاده از هوش مصنوعی در تصفیه پساب پرتابل:

استفاده از هوش مصنوعی (AI) در فرآیندهای تصفیه پساب با وجود پتانسیل‌های زیادی که دارد، همچنان با چالش‌های زیادی روبرو است که مانع از بهره‌برداری کامل از این فناوری می‌شود. این چالش‌ها علاوه بر مسائل فنی، شامل محدودیت‌های داده، مشکلات اجرایی و موانع فرهنگی در پذیرش این فناوری هستند. در ادامه، مهم‌ترین چالش‌ها و خلاءهای موجود در استفاده از هوش مصنوعی در این زمینه آورده شده است:

۱. کمبود داده‌های دقیق و بلادرنگ یکی از بزرگ‌ترین موانع در استفاده از هوش مصنوعی در فرآیندهای تصفیه پساب، کمبود داده‌های معتبر و بلادرنگ است. هوش مصنوعی نیاز به داده‌های زیادی برای آموزش و پیش‌بینی دارد. در بسیاری از موارد، این داده‌ها در دسترس نیستند یا کیفیت کافی برای آموزش مدل‌ها را ندارند. علاوه بر این، بسیاری از داده‌ها ممکن است به‌صورت غیرساختاریافته یا نادرست باشند که این خود باعث کاهش دقت مدل‌های هوش مصنوعی می‌شود. برای حل این مشکل، نیاز به توسعه سیستم‌های جمع‌آوری داده پیشرفته‌تر و استانداردسازی داده‌ها برای ایجاد یک پایگاه داده مناسب وجود دارد.



۲. پیچیدگی فرآیندهای تصفیه پساب فرآیندهای تصفیه پساب شامل چندین مرحله پیچیده و متغیر است که به طور مداوم در حال تغییر هستند. عواملی مانند دما، pH، غلظت مواد آلاینده و شرایط محیطی بر عملکرد سیستم تأثیر می گذارند. این پیچیدگی ها باعث می شود که مدل های هوش مصنوعی نتوانند به طور مؤثر همه این متغیرها را پیش بینی و مدیریت کنند. مدل های موجود در حال حاضر معمولاً قادر به تجزیه و تحلیل داده ها در مقیاس های بزرگ و پیچیده نیستند و ممکن است در شبیه سازی دقیق فرآیندهای تصفیه ناکام بمانند.

۳. مقیاس پذیری محدود مدل های AI بسیاری از مدل های هوش مصنوعی که در مقیاس های کوچک تر و محیط های آزمایشگاهی به خوبی کار می کنند، در مقیاس های بزرگ تر و سیستم های صنعتی به مشکل می خورند. این مشکل مقیاس پذیری مدل های AI است که باعث می شود نتایج مدل های آزمایشگاهی در محیط های صنعتی به طور دقیق و مؤثر قابل اجرا نباشد. علاوه بر این، این مدل ها ممکن است نیاز به داده های زیادی در مقیاس بزرگ داشته باشند که فراهم کردن آن ها برای فرآیندهای صنعتی پرهزینه و زمان بر است.

۴. نیاز به آموزش مستمر و به روزرسانی مدل ها سیستم های هوش مصنوعی به طور مداوم نیاز به آموزش و به روزرسانی دارند تا با تغییرات شرایط و فرآیندهای تصفیه سازگار شوند. فرآیندهای تصفیه پساب تحت تأثیر عواملی چون تغییرات دما، کیفیت آب، و نوسانات بار آلودگی قرار دارند. این تغییرات باید در مدل ها منعطف و پیوسته به روز شوند تا دقت پیش بینی ها حفظ شود. این امر به ویژه در مقیاس صنعتی چالش برانگیز است، زیرا هزینه ها و منابع زیادی برای آموزش مجدد مدل ها نیاز دارد.

۵. عدم وجود استانداردهای جهانی و چارچوب های قانونی برای استفاده از AI در حال حاضر، استفاده از هوش مصنوعی در فرآیندهای تصفیه پساب فاقد استانداردهای جهانی و چارچوب های قانونی مشخص است. این مشکل باعث می شود که شرکت ها و سازمان ها در هنگام پیاده سازی این فناوری با مشکلات قانونی و اجرایی روبرو شوند. عدم وجود دستورالعمل های مشترک و استاندارد برای استفاده از هوش مصنوعی در فرآیندهای تصفیه پساب می تواند مانعی بزرگ برای پذیرش آن در صنعت باشد. نیاز به تدوین استانداردهای بین المللی برای استفاده صحیح و ایمن از این فناوری در صنعت تصفیه پساب احساس می شود.

۶. عدم پذیرش فناوری های مبتنی بر AI توسط صنعتگران یکی از چالش های عمده در پیاده سازی هوش مصنوعی، عدم پذیرش این فناوری ها توسط صنعتگران است. بسیاری از شرکت ها و سازمان ها نسبت به استفاده از سیستم های مبتنی بر هوش مصنوعی بدبین هستند و به دلیل عدم آگاهی کافی یا نگرانی از نتایج منفی احتمالی، از پذیرش این فناوری ها خودداری می کنند. همچنین، نگرانی هایی از جمله امنیت داده ها، مشکلات فنی و هزینه های بالای پیاده سازی باعث کاهش تمایل به استفاده از هوش مصنوعی در فرآیندهای تصفیه می شود. ۷. محدودیت در توانایی تجزیه و تحلیل داده های غیرساختاریافته داده های تصفیه پساب معمولاً تنها محدود به داده های عددی و ساختاریافته نیستند. بسیاری از داده ها ممکن است شامل داده های تصویری، صوتی یا داده های سنسوری باشند که برای تجزیه و تحلیل با استفاده از مدل های معمولی هوش مصنوعی مشکل آفرین است. الگوریتم هایی که قادر به پردازش و تجزیه و تحلیل داده های غیرساختاریافته باشند، هنوز به طور کامل توسعه نیافته اند و این مشکل همچنان به عنوان یکی از موانع مهم استفاده از هوش مصنوعی در تصفیه پساب باقی مانده است.

۸. هزینه های بالا برای پیاده سازی فناوری های AI پیاده سازی هوش مصنوعی در فرآیندهای تصفیه پساب نیازمند هزینه های قابل توجه است. این هزینه ها شامل خرید تجهیزات و سخت افزارهای پیشرفته، آموزش نیروی انسانی متخصص، و نگهداری و به روزرسانی مدل ها می شود. علاوه بر این، برای تحلیل و پردازش داده های بزرگ به منابع محاسباتی قدرتمند نیاز است که این امر هزینه ها را افزایش می دهد. برای بسیاری از سازمان ها، این هزینه ها به ویژه در شرایط اقتصادی کنونی یک مانع بزرگ برای پذیرش این فناوری به حساب می آید.

۹. کمبود نیروی انسانی متخصص در AI و تصفیه پساب یکی از چالش های اساسی در استفاده از هوش مصنوعی در تصفیه پساب، کمبود نیروی انسانی متخصص است. پیاده سازی این فناوری به دانش ترکیبی از حوزه های هوش مصنوعی و مهندسی تصفیه پساب نیاز دارد. متخصصانی که بتوانند به طور مؤثر از هوش مصنوعی در فرآیندهای تصفیه استفاده کنند، تعداد کمی هستند و این کمبود نیروی انسانی متخصص می تواند باعث تأخیر در پیشرفت و پذیرش هوش مصنوعی در این حوزه شود.





۱۰. مشکلات مربوط به تفسیر نتایج مدل‌های AI بسیاری از مدل‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه مدل‌های پیچیده مانند شبکه‌های عصبی عمیق، به‌عنوان «جعبه سیاه» شناخته می‌شوند که نتایج آن‌ها به‌سختی قابل تفسیر هستند. در فرآیندهای تصفیه پساب که نیاز به تصمیم‌گیری‌های سریع و درست در شرایط بحرانی دارند، عدم شفافیت در عملکرد مدل‌های AI می‌تواند باعث ایجاد مشکلات جدی شود. نیاز به توسعه مدل‌هایی که نتایج آن‌ها قابل تفسیر و شفاف باشد، به‌ویژه برای تصمیم‌گیرندگان انسانی، به شدت احساس می‌شود.

۱۱. آینده نامشخص مدل‌های AI در تصفیه پساب با وجود پیشرفت‌های اخیر، آینده استفاده از هوش مصنوعی در فرآیندهای تصفیه پساب همچنان نامشخص است. اگرچه این فناوری‌ها توانایی بالقوه زیادی دارند، اما هنوز تحقیقات زیادی برای بهبود دقت، مقیاس‌پذیری و کارایی این مدل‌ها لازم است. در حال حاضر، هیچ‌یک از مدل‌های موجود به‌طور کامل قادر به حل چالش‌های پیچیده فرآیندهای تصفیه پساب در مقیاس‌های صنعتی نیستند و بنابراین، برای پیاده‌سازی موفقیت‌آمیز هوش مصنوعی در این زمینه، نیاز به تحقیقات و پیشرفت‌های بیشتر وجود دارد.

### آینده پژوهی کاربرد هوش مصنوعی در تصفیه پساب صنعتی

با توجه به پتانسیل‌های گسترده هوش مصنوعی (AI) در بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه پساب، چشم‌انداز استفاده از این فناوری در آینده می‌تواند بسیار امیدوارکننده باشد. این بخش به برخی از مهم‌ترین مسیرهای تحقیقاتی و پیشنهادهایی برای بهبود و توسعه کاربردهای AI در صنعت تصفیه پساب می‌پردازد.

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

یکی از مهم‌ترین جهت‌گیری‌های آینده برای استفاده از هوش مصنوعی در تصفیه پساب، توسعه و بهبود مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق است. این مدل‌ها قادرند تا از داده‌های پیچیده و متغیرهای زیاد در فرآیندهای تصفیه، الگوهای دقیق و قابل اعتماد استخراج کنند. در آینده، نیاز به مدل‌های خودآموز و الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته است که قادر باشند به‌طور مستمر شرایط و پارامترهای تصفیه را در زمان واقعی پیش‌بینی کنند. این مدل‌ها باید قادر به پیش‌بینی دقیق تغییرات کیفیت پساب در اثر متغیرهای مختلف مانند دما، pH، و غلظت آلاینده‌ها باشند و از آن‌ها برای بهینه‌سازی فرآیندها در زمان واقعی استفاده شود.

### ۲. یکپارچه‌سازی فناوری‌های نوین با هوش مصنوعی

برای بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه پساب، می‌توان از یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی با فناوری‌های نوین استفاده کرد. به‌عنوان مثال، ترکیب AI با حسگرهای پیشرفته و سیستم‌های IoT می‌تواند باعث جمع‌آوری داده‌های دقیق‌تر و بلادرنگ شود. این فناوری‌ها می‌توانند داده‌ها را از مراحل مختلف فرآیند تصفیه جمع‌آوری کرده و به‌صورت خودکار به مدل‌های هوش مصنوعی ارسال کنند تا تصمیم‌گیری‌ها سریع‌تر و مؤثرتر صورت گیرد. به این ترتیب، فرآیندهای تصفیه می‌توانند به‌طور خودکار و بهینه تنظیم شوند، که منجر به کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی می‌شود.

### ۳. تحقیقات در زمینه داده‌های غیرساختاریافته در فرآیند تصفیه پساب

داده‌های غیرساختاریافته، مانند تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های صوتی و ویدیویی از حسگرها، نقش مهمی در بهبود فرآیندهای تصفیه دارند. با پیشرفت در مدل‌های پردازش داده‌های غیرساختاریافته، به‌ویژه در حوزه بینایی کامپیوتری و تشخیص الگوها، می‌توان فرآیندهای تصفیه پساب را با دقت بالاتری کنترل کرد. به عنوان مثال، مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند برای تجزیه و تحلیل تصاویر دریافتی از سیستم‌های تصفیه استفاده شده و نشانه‌های فساد یا خرابی تجهیزات را شناسایی کنند.

### ۴. پشتیبانی از تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی به کمک هوش مصنوعی

در آینده، مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند به‌طور خاص برای حمایت از تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی طراحی شوند. این مدل‌ها قادر خواهند بود تا با استفاده از داده‌های تاریخی و بلادرنگ، پیش‌بینی‌هایی در خصوص بروز مشکلات احتمالی مانند نشت مواد آلاینده یا وقوع حوادث زیست‌محیطی در سیستم‌های تصفیه ارائه دهند. با این پیش‌بینی‌ها، می‌توان اقداماتی پیشگیرانه برای کاهش تأثیرات این بحران‌ها اتخاذ کرد. به‌علاوه، در شرایط بحرانی، سیستم‌های هوش مصنوعی می‌توانند به‌طور خودکار تنظیمات فرآیند را تغییر دهند تا بحران را به حداقل برسانند.



### ۵. تحقیق در زمینه سیستم‌های توضیح‌پذیر (AI (XAI

از آنجایی که مدل‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه مدل‌های پیچیده مانند شبکه‌های عصبی عمیق، معمولاً به‌عنوان «جعبه سیاه» شناخته می‌شوند، در آینده لازم است که سیستم‌های توضیح‌پذیر هوش مصنوعی (XAI) توسعه یابند. این سیستم‌ها می‌توانند تصمیمات مدل‌های هوش مصنوعی را قابل‌فهم و شفاف سازند، به‌ویژه در فرآیندهای حساس مانند تصفیه پساب که نیاز به تصمیم‌گیری‌های صحیح و مبتنی بر داده‌های شفاف دارد. این ویژگی‌ها می‌تواند اعتماد به سیستم‌های هوش مصنوعی را در صنعت تصفیه افزایش دهد.

### ۶. توسعه سیستم‌های خودکار برای مدیریت منابع انرژی

در فرآیندهای تصفیه پساب، مصرف انرژی یکی از هزینه‌های اصلی است. استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند به مدیریت بهینه منابع انرژی کمک کند. به‌ویژه در فرآیندهایی که انرژی زیادی برای تصفیه آب مورد نیاز است، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی انرژی می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی کمک کند. این سیستم‌ها می‌توانند با تجزیه و تحلیل داده‌ها، مصرف انرژی را در زمان‌های مختلف روز پیش‌بینی کرده و بر اساس آن عملیات تصفیه را بهینه کنند.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری، هدف اصلی بررسی و تحلیل کاربردهای هوش مصنوعی (AI) در بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه پساب بود. استفاده از هوش مصنوعی در این زمینه، به‌ویژه با توجه به پیشرفت‌های اخیر در مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، امکان بهبود قابل توجهی در فرآیندهای تصفیه پساب فراهم می‌آورد. AI می‌تواند با پردازش و تحلیل داده‌های پیچیده و حجیم، به شناسایی الگوها، پیش‌بینی نتایج و تنظیم خودکار فرآیندها کمک کند. این موضوع باعث افزایش دقت و کارایی در تصفیه پساب، کاهش مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها خواهد شد.

پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های فراوان در استفاده از هوش مصنوعی برای مدیریت و بهینه‌سازی سیستم‌های تصفیه پساب، هنوز چالش‌هایی در زمینه جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌های دقیق و کافی، پیچیدگی مدل‌های الگوریتمی، نیاز به پردازش قدرتمند، و کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی این فناوری‌ها وجود دارد. در این راستا، شکاف‌های تحقیقاتی مهمی شناسایی شده‌اند که بر رفع محدودیت‌های داده‌ها، بهبود دقت مدل‌ها و همچنین ارتقاء تعاملات انسان و هوش مصنوعی تمرکز دارند.

یکی از چالش‌های مهم در این زمینه، نبود داده‌های کافی و متنوع است که مانع از عملکرد بهینه الگوریتم‌ها و مدل‌ها می‌شود. در واقع، بیشتر سیستم‌های تصفیه پساب به داده‌های بسیار دقیق و به‌روز نیاز دارند تا بتوانند به‌طور خودکار به شناسایی و پیش‌بینی مشکلات و تغییرات موجود در فرآیندها بپردازند. از سوی دیگر، پیچیدگی مدل‌های هوش مصنوعی و نیاز به پردازش‌های پرهزینه برای تجزیه و تحلیل داده‌های پیچیده، از دیگر چالش‌ها به شمار می‌روند.

پژوهش‌های آینده باید به‌طور ویژه بر روی بهبود دسترس‌پذیری و کیفیت داده‌ها تمرکز داشته باشند. همچنین، توسعه مدل‌های هیبریدی که از ترکیب الگوریتم‌های مختلف هوش مصنوعی استفاده می‌کنند، می‌تواند به بهبود عملکرد سیستم‌ها و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند. در این راستا، استفاده از (IoT اینترنت اشیا) و ترکیب آن با هوش مصنوعی می‌تواند فرصت‌های جدیدی برای جمع‌آوری داده‌های دقیق و آنی ایجاد کرده و به بهبود فرآیندهای تصفیه پساب کمک کند.

در بحث آینده‌پژوهی، می‌توان گفت که توسعه سیستم‌های تصفیه هوشمند و سیستم‌های خودکار که به‌طور مداوم عملکرد خود را بهینه‌سازی کنند، از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌ویژه در سیستم‌های تصفیه پساب صنعتی و مقیاس‌های بزرگ، هوش مصنوعی می‌تواند نقش بسزایی در بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌ها ایفا کند. با این حال، نیاز به تحقیقات بیشتر در زمینه‌های مختلف مانند توسعه مدل‌های توضیح‌پذیر (XAI) و بهبود هماهنگی انسان و ماشین همچنان احساس می‌شود.

در نهایت، یکپارچه‌سازی فناوری‌های نوین همچون بازیابی منابع از پساب‌های تصفیه‌شده و استفاده از سیستم‌های بازیابی انرژی می‌تواند به بهبود عملکرد و پایداری این سیستم‌ها کمک کند. همچنین، با توجه به اهمیت روزافزون تغییرات اقلیمی و مشکلات ناشی از کمبود منابع آبی در بسیاری از مناطق جهان، استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در تصفیه پساب می‌تواند در آینده به‌عنوان یک راهکار حیاتی برای



مدیریت منابع آبی و حفاظت از محیط زیست مطرح شود. آینده استفاده از هوش مصنوعی در تصفیه پساب نویدبخش پیشرفت های بزرگ و تحولی اساسی در این صنعت است. با توجه به نیاز به تحقیقات و توسعه مداوم در این زمینه، می توان امیدوار بود که در آینده نزدیک، سیستم های تصفیه پساب مبتنی بر هوش مصنوعی به طور گسترده تری در صنایع مختلف و برای کاربردهای مختلف محیطی و بهداشتی به کار گرفته شوند. این امر می تواند منجر به کاهش آلودگی، صرفه جویی در منابع آبی و بهبود کیفیت زندگی انسان ها شود.

### منابع

- Ahmed, M.F., 2024.** Advancements in Electrodialysis for Sustainable Water Desalination and Resource Recovery Within Near-Zero Liquid Discharge Systems: New Mexico State University.
- Alam, G., Ihsanullah, I., Naushad, M. and Sillanpää, M., 2022.** Applications of artificial intelligence in water treatment for optimization and automation of adsorption processes: Recent advances and prospects. *Chemical Engineering Journal*, 427:130011.
- Ali, J.H., Kavous, D.I., Hamidreza, G., Zohreh, K. and Ahmad, N.P., 2013.** Investigating the efficiency of the Fenton process in the treatment of detergent industry wastewater (in farsi).
- Alprol, A.E. and Khairy, H.M., 2025.** Machine-Learning Application for Water Pollution Control and Water Treatment. *Modelling and Advanced Earth Observation Technologies for Coastal Zone Management: Springer*, p. 261-84.
- Alprol, A.E., Mansour, A.T., Ibrahim, M.E.E.D. and Ashour, M., 2024.** Artificial intelligence technologies revolutionizing wastewater treatment: Current trends and future prospective. *Water*, 16(2):314.
- A'alami, M.T., Hijabi, N, Noorani, V. and Saghibian, S.M., 2021.** Investigating the effectiveness of artificial intelligence methods in predicting wastewater treatment plant performance (Case study: Tabriz wastewater treatment plant). *Amirkabir Civil Engineering Journal*, (in farsi) 53(3):1033-48.
- Aksenenko, E., 2001.** Surfactants: chemistry, interfacial properties, applications. *Studies in Interface Science*, 13:619.
- Bunce, J.T., Ndam, E., Ofiteru, I.D., Moore, A. and Graham, D.W., 2018.** A review of phosphorus removal technologies and their applicability to small-scale domestic wastewater treatment systems. *Frontiers in Environmental Science*, 6:8.
- Baharvand, S. and Mansouri Daneshvar, M.R., 2019.** Impact assessment of treating wastewater on the physiochemical variables of environment: a case of Kermanshah wastewater treatment plant in Iran. *Environmental Systems Research*, 8:1-11.
- Behera, S.K., Karthika, S., Mahanty, B., Meher, S.K., Zafar, M. and Baskaran, D., 2024.** Application of artificial intelligence tools in wastewater and waste gas treatment systems: Recent advances and prospects. *Journal of Environmental Management*, 370:122386.
- Chaharkam, M., Tahmasebpour, M. and Sari Yilmaz, M., 2024.** Investigating the performance of activated carbon adsorbent modified with iron oxide nanoparticles in removing crystal violet from water. *Color science and technology*, (in farsi); 17(4):303-24.
- Fadaei Tehrani, M.R. and Heidari Savadjani, M., 2024.** Review, evaluate and score new wastewater treatment methods and select the best method. 14th International Conference on Sustainable Development and Urban Development, (in farsi).
- Galdeano, M.C., Wilhelm, A.E., Goulart, I.B., Tonon, R.V., Freitas-Silva, O. and Germani, R. 2018.** Effect of water temperature and pH on the concentration and time of ozone saturation. *Brazilian Journal of Food Technology*, 21:e2017156.



- Giagnorio, M., Amelio, A., Grüttner, H. and Tiraferri, A., 2017.** Environmental impacts of detergents and benefits of their recovery in the laundering industry. *Journal of Cleaner Production*, 154:593-601.
- Ghosh, S., Ray, A. and Pramanik, N., 2020.** Self-assembly of surfactants: An overview on general aspects of amphiphiles. *Biophysical Chemistry*, 265:106429.
- Ibrahim, I.A., Sabah, S., Abbas, R., Hossain, M. and Fahed, H., 2021.** A novel sizing method of a standalone photovoltaic system for powering a mobile network base station using a multi-objective wind driven optimization algorithm. *Energy Conversion and Management*, 238:114179.
- Ivanković, T. and Hrenović, J., 2010.** Surfactants in the environment. *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 61(1):95-109.
- Iran, F., Farzadkia, M. and Jafarzadeh, N., 2010.** Investigating the effect of organic matter loading on the performance of Abadan industrial wastewater treatment plant, (in farsi).
- Imai, A., Fukushima, T., Matsushige, K., Kim, Y.H. and Choi, K., 2002.** Characterization of dissolved organic matter in effluents from wastewater treatment plants. *Water research*, 36(۸):۵۹۰-۵۹۴.
- Jin, P., Jin, X., Wang, X.C. and Shi, X., 2013.** An analysis of the chemical safety of secondary effluent for reuse purposes and the requirement for advanced treatment. *Chemosphere*, 91(4):558-62.
- Kermani, M., 2018.** Investigating the efficiency of the photochemical oxidation process based on hydrogen peroxide. *North Khorasan Journal of Medical Sciences*, (in farsi).
- Krystynik, P., Masin, P., Krusinova, Z. and Kluson, P., 2019.** Application of electrocoagulation for removal of toxic metals from industrial effluents. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16:4167-72.
- Lin, H. and Zhang, M., 2023.** Advanced membrane technologies for wastewater treatment and recycling. *MDPI*, p. 558.
- Mao, Z., Li, X., Zhang, X., Li, D., Lu, J. and Li, J., 2024.** Optimization of effluent quality and energy consumption of aeration process in wastewater treatment plants using artificial intelligence. *Journal of Water Process Engineering*, 63:105384.
- Mobini Lotfabad, M. and Khodabakhshi, A., 2022.** Water Reclamation and Reuse: with the Emphasis on the 7th Development Plan (Planning to Access Other Waters and Recycling Industrial Water and Effluent). *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*, 21(9):997-1004.
- Merdy, P., Delpy, F., Baratto, G., Plessis, E. and Lucas, Y., 2024.** Wastewater treatment plant efficiency and contaminant levels in a Mediterranean coastal area: a comprehensive inventory and assessment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, pp.1-14.
- Mortazavi, S. and Rahmani, A., 2014.** The role of industries in the water crisis. *The Second National Conference on Environmental Science and Management*.
- Núñez, S., Zuluaga-Hernández, E.A., Teran, N., Puella, J., Ramírez, L. and Bossa, L., 2022.** Design and implementation of a treatment plant for the disposal of wastewater from portable toilets. *Revista Ing-Nova*, 1(2):195-204.
- Pignatello, J.J., Oliveros, E. and MacKay, A., 2006.** Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. *Critical reviews in environmental science and technology*, 36(1):1-84.





**Sarkar, B., Islam, A. and Das, B.C., 2021.** Role of declining discharge and water pollution on habitat suitability of fish community in the Mathabhanga-Churni River, India. *Journal of Cleaner Production*, 326:129426.

**Smith, V.H. and Schindler, D.W., 2009.** Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution*, 24(4):201-7.

**Siyahi, H, Rafiei, S.F. and Abdollahy, H., 2021.** Iron oxide-based magnetic nanocomposites and their application in the adsorption process for water purification. *Green Chemistry and Sustainable Technologies*, (in farsi);3(2):1-42.

**Singh, N.K., Yadav, M., Singh, V., Padhiyar, H., Kumar, V. and Bhatia, S.K., 2023.** Artificial intelligence and machine learning-based monitoring and design of biological wastewater treatment systems. *Bioresource technology*, 369:128486.

**Sarmadi, M., Mortezaeifar, S., Kermani, M. and Gholami, M., 2017.** Performance Evaluation of Semnan Industry Park's Advanced Wastewater Treatment Plant system (MBR) in Industrial Effluent recovery. *Iran Occupational Health Journal*, 14(1):165-75.

**Tavakoli, S., 2024.** Exploring the use of artificial intelligence in the wastewater treatment process as a new challenge. *The First International Conference on New Approaches in Engineering and Basic Sciences*, (in farsi).

**Takdastan, A., Hosseinipناه, E., Kordani, M. and Janadleh, H., 2015.** Environmental impacts of detergent and surfactant industry wastewater and appropriate solutions to reduce their pollution. *International Conference on Environmental Science, Engineering and Technology*(in farsi).

**Tayyibi, S.G.S., 2017.** The impact of polluted water on the spread of diseases in the Nasrid era (from the perspective of foreign tourists). *Journal of Medical History – Scientific*, (2017)(in farsi).

**Villarin, M.C. and Merel, S., 2020.** Paradigm shifts and current challenges in wastewater management. *Journal of hazardous materials*, 390:122139.