مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات
سال هشتم، شماره ۸۱، فروردین ۱۴۰۵
ISSN: ۲۶۷۶-۵۷۶٤
www.jocrisar.ir

مروری نظام‌مند بر نقش هوش مصنوعی در مدیریت هوشمند تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب

عاطفه دانشور [۱] ، مرضیه جهانگیری [۲] ، لیدا رای زن [۳] ، اقدس آقاپور [۴]

[۱] کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی – بازاریابی، شرکت آب و فاضلاب بندرعباس، استان هرمزگان، ایران (نویسنده مسئول)
[۲] کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی - داخلی، شرکت آب و فاضلاب بندرعباس، استان هرمزگان، ایران
[۳] کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست - آب و فاضلاب، شرکت آب و فاضلاب بندرعباس، استان هرمزگان، ایران
[۴] کارشناسی اجرایی عمران، شرکت آب و فاضلاب بندرعباس، استان هرمزگان، ایران

چکیده

رشد سریع فناوری‌های هوش مصنوعی در دهه اخیر، زمینه‌ساز تحول بنیادین در مدیریت سامانه‌های پیچیده زیرساختی، از جمله تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب شده است. تصفیه‌خانه‌ها به‌عنوان سیستم‌هایی چندمتغیره، غیرخطی و پویا، همواره با چالش‌هایی نظیر نوسانات کیفیت ورودی، مصرف بالای انرژی، هزینه‌های بهره‌برداری، و الزامات سخت‌گیرانه زیست‌محیطی مواجه بوده‌اند. در این میان، بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نظیر یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم‌های فازی و الگوریتم‌های تکاملی، به‌عنوان ابزاری کارآمد برای بهبود پایش، پیش‌بینی، کنترل و تصمیم‌گیری هوشمند مطرح شده است. هدف این مقاله، ارائه یک مرور نظام‌مند از مطالعات انجام‌شده در زمینه نقش هوش مصنوعی در مدیریت هوشمند تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب است. در این مرور، پژوهش‌های منتشرشده در پایگاه‌های علمی معتبر بین‌المللی و منابع علمی فارسی، بدون انجام پژوهش تجربی جدید، مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته‌اند. رویکرد مرور بر شناسایی حوزه‌های کاربردی اصلی هوش مصنوعی در تصفیه‌خانه‌ها، بررسی چارچوب‌های نظری و روش‌شناختی مطالعات پیشین، و تحلیل نقاط قوت، محدودیت‌ها و روندهای نوظهور تمرکز دارد. یافته‌های کلی مرور نشان می‌دهد که هوش مصنوعی نقش مؤثری در بهبود دقت پیش‌بینی کیفیت پساب، کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی، و ارتقای تصمیم‌گیری مدیریتی ایفا کرده است. با این حال، چالش‌هایی نظیر کیفیت داده‌ها، تعمیم‌پذیری مدل‌ها، نبود استانداردهای یکپارچه، و فاصله میان پژوهش‌های دانشگاهی و کاربرد صنعتی همچنان پابرجاست. در نهایت، این مقاله با شناسایی خلأهای پژوهشی موجود، مسیرهای آینده تحقیق و توسعه در زمینه مدیریت هوشمند تصفیه‌خانه‌ها مبتنی بر هوش مصنوعی را پیشنهاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: هوش مصنوعی؛ مدیریت هوشمند؛ تصفیه‌خانه آب و فاضلاب؛ یادگیری ماشین؛ بهینه‌سازی فرآیند؛ پایش و کنترل هوشمند

مقدمه

افزایش سریع جمعیت شهری، رشد فعالیت‌های صنعتی و تشدید فشار بر منابع آب شیرین در دهه‌های اخیر، مدیریت بهینه سیستم‌های تأمین و تصفیه آب را به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیرساختی و زیست‌محیطی جهان تبدیل کرده است. تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب به‌عنوان بخش کلیدی در چرخه مدیریت منابع آب، نقش حیاتی در حفظ سلامت عمومی، حفاظت از محیط‌زیست و تضمین پایداری منابع آبی ایفا می‌کنند. با این حال، بهره‌برداری مؤثر از این تأسیسات به دلیل ماهیت پیچیده فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در آن‌ها همواره با دشواری‌های قابل توجهی همراه بوده است. فرآیندهای تصفیه فاضلاب معمولاً غیرخطی، پویا و وابسته به عوامل متعدد محیطی و عملیاتی هستند و تغییرات ناگهانی در کیفیت و کمیت جریان ورودی می‌تواند عملکرد کل سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل، مدیریت کارآمد تصفیه‌خانه‌ها نیازمند روش‌های پیشرفته پایش، پیش‌بینی و کنترل است که بتوانند این پیچیدگی‌ها را در نظر بگیرند (وو و همکاران، ۲۰۲۰).

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه فناوری اطلاعات و علوم داده، به‌ویژه در زمینه هوش مصنوعی، فرصت‌های جدیدی را برای بهبود مدیریت سیستم‌های زیربنایی فراهم کرده است. هوش مصنوعی به مجموعه‌ای از روش‌ها و الگوریتم‌ها اطلاق می‌شود که به سیستم‌های رایانه‌ای امکان می‌دهد الگوهای پیچیده را از داده‌ها استخراج کرده و تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه انجام دهند. در حوزه مدیریت منابع آب، این فناوری‌ها به‌طور گسترده برای تحلیل داده‌های محیطی، پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب، بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند روابط غیرخطی پیچیده میان متغیرهای فرآیندی را با دقت بالایی مدل‌سازی کنند و در نتیجه عملکرد سیستم‌های تصفیه را بهبود بخشند (هان و همکاران، ۲۰۲۱؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

از جمله مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب می‌توان به پیش‌بینی کیفیت پساب، مدل‌سازی فرآیندهای بیولوژیکی، کنترل هوشمند هوادهی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و تشخیص خطا در تجهیزات اشاره کرد. برای مثال، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی پارامترهایی مانند تقاضای بیوشیمیایی اکسیژن (BOD)، تقاضای شیمیایی اکسیژن (COD) و نیتروژن کل می‌تواند به اپراتورهای تصفیه‌خانه کمک کند تا قبل از وقوع نوسانات شدید، اقدامات اصلاحی مناسب را اتخاذ کنند (سولگی و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر این، الگوریتم‌های تکاملی و روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی برای کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای هوادهی که یکی از پرهزینه‌ترین بخش‌های تصفیه فاضلاب محسوب می‌شود، به کار گرفته شده‌اند (وو و همکاران، ۲۰۲۰). در سال‌های اخیر نیز ترکیب هوش مصنوعی با فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا و سیستم‌های پایش آنلاین، زمینه شکل‌گیری مفهوم «تصفیه‌خانه‌های هوشمند» را فراهم کرده است؛ تصفیه‌خانه‌هایی که قادرند با استفاده از داده‌های لحظه‌ای، فرآیندهای عملیاتی خود را به‌صورت خودکار تنظیم و بهینه‌سازی کنند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲).

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این حوزه، بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پژوهش‌های انجام‌شده اغلب پراکنده بوده و هر یک بر جنبه خاصی از کاربردهای هوش مصنوعی در تصفیه‌خانه‌ها تمرکز داشته‌اند. برخی مطالعات بر توسعه مدل‌های پیش‌بینی کیفیت پساب تمرکز کرده‌اند، در حالی که گروهی دیگر به بهینه‌سازی مصرف انرژی یا کنترل فرآیندهای بیولوژیکی پرداخته‌اند. این پراکندگی موجب شده است که تصویر جامع و یکپارچه‌ای از وضعیت دانش موجود در زمینه نقش هوش مصنوعی در مدیریت هوشمند تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب کمتر ارائه شود. از سوی دیگر، تفاوت در روش‌های مورد

استفاده، نوع داده‌ها، مقیاس مطالعات و شرایط عملیاتی تصفیه‌خانه‌ها، مقایسه مستقیم نتایج پژوهش‌ها را دشوار کرده است. در نتیجه، نیاز به انجام یک مرور نظام‌مند که بتواند مطالعات موجود را به‌طور ساختاریافته گردآوری، تحلیل و مقایسه کند، بیش از پیش احساس می‌شود.

مرور نظام‌مند به‌عنوان یکی از روش‌های معتبر در پژوهش‌های علمی، با هدف جمع‌آوری، ارزیابی و تحلیل نظام‌مند مطالعات پیشین انجام می‌شود و تلاش می‌کند تصویری جامع از وضعیت دانش در یک حوزه خاص ارائه دهد. این نوع مرور با استفاده از معیارهای مشخص برای جستجو، انتخاب و ارزیابی منابع، از سوگیری‌های احتمالی در انتخاب مطالعات جلوگیری کرده و امکان شناسایی روندهای پژوهشی، شکاف‌های دانشی و مسیرهای آینده تحقیق را فراهم می‌کند (کیچنهام و چارترز، ۲۰۰۷). در حوزه مدیریت منابع آب نیز در سال‌های اخیر استفاده از مرورهای نظام‌مند برای بررسی کاربرد فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی، داده‌های کلان و سیستم‌های هوشمند افزایش یافته است (بیبائودو و همکاران، ۲۰۱۹).

با توجه به اهمیت روزافزون به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند در مدیریت زیرساخت‌های آبی و نقش کلیدی تصفیه‌خانه‌ها در حفاظت از محیط‌زیست و سلامت عمومی، بررسی جامع مطالعات مرتبط با کاربرد هوش مصنوعی در این حوزه ضروری به نظر می‌رسد. هدف اصلی این مقاله ارائه یک مرور نظام‌مند از پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت هوشمند تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب است. این مقاله تلاش می‌کند ضمن شناسایی مهم‌ترین رویکردهای نظری و تجربی مورد استفاده در مطالعات پیشین، حوزه‌های اصلی کاربرد هوش مصنوعی در تصفیه‌خانه‌ها، مزایا و محدودیت‌های روش‌های مختلف و چالش‌های پیش روی پیاده‌سازی این فناوری‌ها در مقیاس عملیاتی را مورد بررسی قرار دهد. همچنین با تحلیل انتقادی یافته‌های پژوهش‌های موجود، خلأهای دانشی و نیازهای پژوهشی آینده در این حوزه شناسایی و پیشنهادهایی برای توسعه تحقیقات آتی ارائه خواهد شد.

ادبیات و پیشینه موضوع

پژوهش‌های مرتبط با کاربرد هوش مصنوعی در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب را می‌توان در چارچوب تحول تدریجی رویکردهای مدیریتی از سیستم‌های سنتی مبتنی بر تجربه اپراتور به سمت سیستم‌های داده‌محور و هوشمند تحلیل کرد. در دهه‌های گذشته، مدل‌های ریاضی کلاسیک و معادلات سینتیکی ابزار اصلی تحلیل و کنترل فرآیندهای تصفیه بودند، اما پیچیدگی و غیرخطی بودن این فرآیندها، به‌ویژه در مقیاس واقعی، محدودیت‌های جدی برای این رویکردها ایجاد می‌کرد. با گسترش ظرفیت ذخیره‌سازی داده‌ها و افزایش قدرت محاسباتی، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی به‌تدریج به‌عنوان جایگزین یا مکمل مدل‌های سنتی مطرح شدند (گراسمن و همکاران، ۲۰۱۴).

مطالعات اولیه در این حوزه عمدتاً بر استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی رفتار سیستم‌های تصفیه فاضلاب متمرکز بودند. این مطالعات نشان دادند که شبکه‌های عصبی قادرند روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرهای ورودی نظیر دبی، بار آلودگی و دما و خروجی‌هایی مانند BOD و COD را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کنند (فرناندز و همکاران، ۲۰۱۸). در ادامه، با توسعه الگوریتم‌های یادگیری ماشین، پژوهشگران به استفاده از روش‌هایی نظیر ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و الگوریتم‌های تقویتی برای بهبود دقت پیش‌بینی و کنترل فرآیندها روی آوردند (لیو و همکاران، ۲۰۲۰).

در کنار مدل‌های پیش‌بینی، بخش قابل توجهی از ادبیات به کاربرد هوش مصنوعی در کنترل و بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه اختصاص دارد. کنترل هوشمند هوادهی در فرآیند لجن فعال یکی از مهم‌ترین حوزه‌های مورد مطالعه است، زیرا مصرف انرژی

در این بخش سهم عمده‌ای از هزینه‌های بهره‌برداری تصفیه‌خانه را شامل می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از کنترل‌کننده‌های مبتنی بر منطق فازی و یادگیری تقویتی می‌تواند ضمن حفظ کیفیت پساب، مصرف انرژی را به‌طور معناداری کاهش دهد (یانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ وو و همکاران، ۲۰۲۰). این مطالعات، هوش مصنوعی را نه‌تنها به‌عنوان ابزار پیش‌بینی، بلکه به‌عنوان یک عنصر فعال در تصمیم‌گیری عملیاتی معرفی کرده‌اند.

در سال‌های اخیر، مفهوم تصفیه‌خانه هوشمند با ادغام هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و سیستم‌های پایش آنلاین شکل گرفته است. در این رویکرد، داده‌های بلادرنگ جمع‌آوری‌شده از حسگرها به مدل‌های هوشمند منتقل شده و خروجی آن‌ها به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم در کنترل فرآیندها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات جدید نشان می‌دهند که این یکپارچگی می‌تواند قابلیت انطباق تصفیه‌خانه‌ها با شرایط متغیر ورودی را افزایش داده و تاب‌آوری سیستم را در برابر شوک‌های ناگهانی بهبود بخشد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۳).

در ادبیات فارسی نیز، هرچند حجم مطالعات نسبت به منابع بین‌المللی محدودتر است، اما روند رو به رشدی در استفاده از روش‌های هوش مصنوعی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی عملکرد تصفیه‌خانه‌ها مشاهده می‌شود. برخی پژوهش‌ها با تمرکز بر شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی، کارایی این روش‌ها را در پیش‌بینی پارامترهای کیفی فاضلاب شهری در شرایط اقلیمی ایران بررسی کرده‌اند (سولگی و همکاران، ۱۳۹۶؛ رضایی و همکاران، ۱۴۰۰). این مطالعات ضمن تأیید توانمندی روش‌های هوش مصنوعی، به چالش‌هایی مانند محدودیت داده‌های باکیفیت و نبود زیرساخت پایش پیوسته اشاره کرده‌اند.

به‌طور کلی، مرور ادبیات نشان می‌دهد که مطالعات پیشین را می‌توان در چند محور اصلی دسته‌بندی کرد: مدل‌سازی و پیش‌بینی کیفیت پساب، کنترل و بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی، کاهش مصرف انرژی، و توسعه سیستم‌های تصمیم‌یار هوشمند. جدول‌های زیر، نمایی مقایسه‌ای از این دسته‌بندی و ویژگی‌های کلیدی مطالعات منتخب را ارائه می‌دهند.

جدول ۱. دسته‌بندی رویکردهای اصلی کاربرد هوش مصنوعی در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب

حوزه کاربرد	هدف اصلی	روش‌های متداول هوش مصنوعی	نمونه مراجع
پیش‌بینی کیفیت پساب	برآورد پارامترهای BOD، COD، TN و TSS	شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان	فرناندز و همکاران (۲۰۱۸)، لیو و همکاران (۲۰۲۰)
کنترل فرآیند	تنظیم خودکار متغیرهای عملیاتی	منطق فازی، یادگیری تقویتی	یانگ و همکاران (۲۰۱۹)
بهینه‌سازی انرژی	کاهش مصرف انرژی و هزینه بهره‌برداری	الگوریتم‌های ژنتیک، یادگیری ماشین	وو و همکاران (۲۰۲۰)
سیستم‌های تصمیم‌یار	پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی	مدل‌های ترکیبی AI–IoT	وانگ و همکاران (۲۰۲۲)

جدول ۲. مقایسه مطالعات منتخب در ادبیات پیشین

نویسندگان	سال	نوع تصفیه‌خانه	روش هوش مصنوعی	یافته کلیدی
فرناندز و همکاران	۲۰۱۸	فاضلاب شهری	شبکه عصبی مصنوعی	دقت بالای پیش‌بینی COD
یانگ و همکاران	۲۰۱۹	لجن فعال	منطق فازی	کاهش مصرف انرژی هوادهی
وو و همکاران	۲۰۲۰	فاضلاب صنعتی	الگوریتم ژنتیک	بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری
وانگ و همکاران	۲۰۲۲	تصفیه‌خانه هوشمند	IoTوAI	افزایش تاب‌آوری سیستم

روش مرور نظام‌مند

در این مطالعه با هدف اطمینان از جامعیت و قابلیت بازتولید، رویکرد مرور نظام‌مند با الهام از راهنمای کیچنهام و چارترز ۲۰۰۷مورد استفاده قرار گرفت. انتخاب منابع بر اساس فرایند شفاف جستجوی منظم در پایگاه‌های علمی Scopus، Web of Science، IEEE Xplore، ScienceDirect، SID و IranDoc و با بهره‌گیری از کلیدواژه‌ها و عبارات استاندارد صورت پذیرفت.

پژوهش حاضر شامل پنج مرحله اساسی بود: تدوین سؤال‌های مرور، تدوین استراتژی جستجو، تعیین معیارهای ورود و خروج، فرآیند غربال‌گری دو مرحله‌ای (ابتدا عناوین و چکیده‌ها و سپس متن کامل)، و استخراج و تحلیل داده‌ها. جستجوی منابع محدود به آثار منتشره در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ میلادی (۱۳۸۹ تا ۱۴۰۳ شمسی) و به زبان‌های فارسی و انگلیسی شد تا آخرین دستاوردهای علمی و تجربیات بومی نیز لحاظ گردند (بیبائودو و همکاران، ۲۰۱۹؛ رضایی و همکاران، ۱۴۰۰).

تحلیل نهایی مبتنی بر رویکرد کیفی صورت گرفت و داده‌های کلیدی هر مطالعه بر اساس چارچوب پیشنهادی PRISMA گردآوری و مقایسه شدند. معیارهای ورود شامل مطالعات مروری، تجربی یا موردی با محور هوش مصنوعی و مدیریت تصفیه‌خانه‌های آب/فاضلاب و اطلاعات کافی برای تحلیل روش‌شناختی و نتایج بودند. معیارهای خروج شامل مطالعات فاقد ارتباط مستقیم با هوش مصنوعی یا بدون دسترسی به متن کامل یا فاقد داده‌های کافی برای مقایسه بودند (رضایی و همکاران، ۱۴۰۰).

فرآیند کامل در جدول زیر ارائه شده است:

جدول ۳. فرآیند مرور نظام‌مند منابع پژوهشی

مرحله	شرح فعالیت	جزئیات
تدوین سؤال	تعریف سؤال پژوهش	نقش و کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت هوشمند تصفیه‌خانه آب و فاضلاب
استراتژی جستجو	پایگاه‌ها و کلیدواژه‌ها	Scopus, WoS, IEEE, ScienceDirect, SID, IranDoc: “Artificial Intelligence”, “AI”, “Machine learning”, “Wastewater Treatment”, “Water Treatment Plant”, “Smart Management”, «هوش مصنوعی»، «تصفیه‌خانه»، «یادگیری ماشین» و...
معیارهای ورود	شمول مطالعات	محور هوش مصنوعی، پژوهش‌های مروری/تجربی/موردی، زبان فارسی و انگلیسی، بازه زمانی ۲۰۱۰–۲۰۲۴، دسترسی به داده‌ها و نتایج

معیارهای خروج	حذف مطالعات	مقاله نظری محض بدون کاربرد هوش مصنوعی، عدم دسترسی به متن کامل، منابع بدون داده کافی، یا محوریت فناوری غیرمرتبط با آب و فاضلاب
غربال‌گری	انتخاب چند مرحله‌ای	۱. حذف مطالعات تکراری ۲. مرور عناوین و چکیده ۳. بررسی متن کامل ۴. توافق دو پژوهشگر بر سر ورود مطالعات نهایی
استخراج داده	داده‌های گردآوری‌شده	مشخصات مقاله، سال، کشور، نوع تصفیه‌خانه، الگوریتم‌های هوش مصنوعی، اهداف کاربردی، شاخص‌های نتیجه/کارایی، محدودیت‌ها/چالش‌ها
تحلیل	روش تحلیل	تحلیل توصیفی کیفی (و در برخی موارد مرور کمی گزارش شده در مطالعات مروری)

با این روش، از میان حدود ۱۸۰ مقاله اولیه، پس از غربال‌گری نهایی، ۳۵ مطالعه شامل ۲۲ منبع انگلیسی و ۱۳ منبع فارسی وارد بخش تحلیل و بررسی شدند.

یافته‌های پژوهش

تحلیل نظام‌مند مطالعات منتخب نشان می‌دهد که کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب عمدتاً در چند حوزه اصلی متمرکز بوده است: مدل‌سازی و پیش‌بینی کیفیت پساب، کنترل هوشمند فرآیندها، بهینه‌سازی مصرف انرژی و توسعه سیستم‌های تصمیم‌یار و مدیریت هوشمند. بررسی مطالعات نشان می‌دهد که رویکردهای مبتنی بر داده در بسیاری از موارد توانسته‌اند محدودیت‌های مدل‌های ریاضی کلاسیک را کاهش دهند و دقت پیش‌بینی و کارایی مدیریتی سیستم‌ها را افزایش دهند (لیو و همکاران، ۲۰۲۰؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۲).

به طور کلی، مطالعات نشان می‌دهند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق قادرند الگوهای پیچیده میان متغیرهای عملیاتی تصفیه‌خانه‌ها را استخراج کنند و در نتیجه امکان پیش‌بینی و کنترل دقیق‌تر فرآیندها را فراهم سازند. در عین حال، تفاوت در نوع داده‌ها، شرایط عملیاتی تصفیه‌خانه‌ها و مقیاس مطالعات باعث شده است که میزان موفقیت این مدل‌ها در محیط‌های مختلف متفاوت باشد (ژو و همکاران، ۲۰۲۳).

در ادامه مهم‌ترین یافته‌های مرور در چند محور اصلی ارائه می‌شود.

۱. کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی کیفیت پساب

یکی از گسترده‌ترین حوزه‌های کاربرد هوش مصنوعی در تصفیه‌خانه‌ها، پیش‌بینی پارامترهای کیفی فاضلاب و پساب است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که مدل‌های یادگیری ماشین قادرند پارامترهایی مانند BOD، COD، TSS و نیتروژن کل را با دقت بالا پیش‌بینی کنند. شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل توانایی در مدل‌سازی روابط غیرخطی، بیشترین کاربرد را در این حوزه داشته‌اند (فرناندز و همکاران، ۲۰۱۸).

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های پیشرفته‌تری مانند جنگل تصادفی، گرادیان بوستینگ و شبکه‌های عصبی عمیق نیز در پیش‌بینی کیفیت پساب مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در بسیاری از مطالعات عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های سنتی نشان داده‌اند (لیو و همکاران، ۲۰۲۰).

جدول ۴. مطالعات منتخب در زمینه پیش‌بینی کیفیت پساب

نویسندگان	سال	الگوریتم مورد استفاده	پارامتر پیش‌بینی	نتیجه اصلی
فرناندز و همکاران	۲۰۱۸	شبکه عصبی مصنوعی	BOD و COD	دقت پیش‌بینی بالا در شرایط متغیر
لیو و همکاران	۲۰۲۰	جنگل تصادفی	نیتروژن کل	بهبود عملکرد نسبت به مدل‌های رگرسیونی
ژو و همکاران	۲۰۲۳	یادگیری عمیق	پارامترهای چندگانه کیفیت آب	افزایش دقت مدل در داده‌های بزرگ

۲. کنترل هوشمند فرآیندهای تصفیه

کنترل فرآیند یکی از مهم‌ترین چالش‌های بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌ها است، زیرا تغییرات ناگهانی در کیفیت فاضلاب ورودی می‌تواند باعث کاهش کارایی فرآیندهای بیولوژیکی شود. در این زمینه، روش‌های مبتنی بر منطق فازی، شبکه‌های عصبی و یادگیری تقویتی برای تنظیم خودکار پارامترهایی مانند نرخ هوادهی، زمان ماند هیدرولیکی و دوز مواد شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (یانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از کنترل‌کننده‌های هوشمند می‌تواند پایداری عملکرد تصفیه‌خانه را افزایش داده و از نوسانات شدید در کیفیت پساب جلوگیری کند.

جدول ۵. کاربرد روش‌های هوش مصنوعی در کنترل فرآیند

نویسندگان	سال	روش هوش مصنوعی	فرآیند مورد کنترل	نتیجه
یانگ و همکاران	۲۰۱۹	منطق فازی	هوادهی در فرآیند لجن فعال	بهبود پایداری فرآیند
گارسیا و همکاران	۲۰۲۱	شبکه عصبی	تنظیم بار آلی	کاهش نوسانات کیفیت پساب
وانگ و همکاران	۲۰۲۲	یادگیری تقویتی	کنترل دینامیکی سیستم	افزایش کارایی عملیاتی

۳. بهینه‌سازی مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌ها

مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یکی از مهم‌ترین هزینه‌های بهره‌برداری محسوب می‌شود و بخش عمده آن به فرآیند هوادهی اختصاص دارد. به همین دلیل، بسیاری از مطالعات به استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی پرداخته‌اند.

الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات در ترکیب با مدل‌های یادگیری ماشین برای یافتن بهترین شرایط عملیاتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که این رویکردها می‌توانند مصرف انرژی را تا ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش دهند بدون آنکه کیفیت پساب کاهش یابد (وو و همکاران، ۲۰۲۰).

جدول ۶. مطالعات مرتبط با بهینه‌سازی انرژی

نویسندگان	سال	الگوریتم	حوزه کاربرد	نتیجه
وو و همکاران	۲۰۲۰	الگوریتم ژنتیک	بهینه‌سازی هوادهی	کاهش مصرف انرژی
ژانگ و همکاران	۲۰۲۱	ازدحام ذرات	بهینه‌سازی فرآیند	کاهش هزینه بهره‌برداری
وانگ و همکاران	۲۰۲۲	مدل ترکیبی یادگیری ماشین	مدیریت انرژی	افزایش کارایی سیستم

۴. سیستم‌های تصمیم‌یار و مدیریت هوشمند

در سال‌های اخیر، توسعه سیستم‌های تصمیم‌یار مبتنی بر هوش مصنوعی به یکی از روندهای مهم در مدیریت تصفیه‌خانه‌ها تبدیل شده است. این سیستم‌ها با ترکیب داده‌های حاصل از حسگرها، مدل‌های پیش‌بینی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، می‌توانند پیشنهادهای مدیریتی برای اپراتورها ارائه دهند.

ادغام هوش مصنوعی با فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا (IoT) و کلان‌داده‌ها موجب شده است که تصفیه‌خانه‌ها به سمت سامانه‌های خودتنظیم و هوشمند حرکت کنند. در چنین سامانه‌هایی، داده‌های عملیاتی به‌صورت پیوسته تحلیل شده و تصمیم‌های کنترلی به‌صورت خودکار اتخاذ می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۳).

جدول ۷. کاربرد هوش مصنوعی در سیستم‌های مدیریت هوشمند

نویسندگان	سال	فناوری‌های ترکیبی	کاربرد مدیریتی	نتیجه
وانگ و همکاران	۲۰۲۲	اینترنت اشیاء + هوش مصنوعی	پایش بلادرنگ	افزایش قابلیت کنترل
ژو و همکاران	۲۰۲۳	کلان‌داده + یادگیری ماشین	تحلیل داده‌های عملیاتی	بهبود تصمیم‌گیری
لیو و همکاران	۲۰۲۰	یادگیری ماشین	سیستم تصمیم‌یار	افزایش کارایی مدیریت

بحث و نتیجه‌گیری

مرور نظام‌مند مطالعات نشان می‌دهد که هوش مصنوعی طی دهه گذشته به یکی از ابزارهای مهم در مدیریت و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب تبدیل شده است. پیچیدگی فرآیندهای تصفیه، وجود روابط غیرخطی میان متغیرهای عملیاتی و تغییرات مداوم در کیفیت فاضلاب ورودی باعث شده است که روش‌های سنتی مدل‌سازی و کنترل در بسیاری از موارد با محدودیت‌هایی مواجه شوند. در چنین شرایطی، روش‌های مبتنی بر داده و الگوریتم‌های هوش مصنوعی توانسته‌اند با استخراج الگوهای پنهان از داده‌های عملیاتی، امکان پیش‌بینی، کنترل و بهینه‌سازی دقیق‌تر فرآیندها را فراهم کنند.

نتایج این مرور نشان می‌دهد که یکی از مهم‌ترین حوزه‌های کاربرد هوش مصنوعی در تصفیه‌خانه‌ها، پیش‌بینی کیفیت پساب است. بسیاری از مطالعات گزارش کرده‌اند که مدل‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و مدل‌های یادگیری عمیق، قادرند پارامترهای کلیدی کیفیت آب مانند BOD، COD، TSS و نیتروژن کل را با دقت بالاتری نسبت به مدل‌های رگرسیونی سنتی پیش‌بینی کنند. این قابلیت می‌تواند به مدیران و اپراتورهای تصفیه‌خانه کمک کند تا پیش از وقوع اختلال در فرآیند، اقدامات اصلاحی لازم را انجام دهند.

حوزه مهم دیگر، کنترل هوشمند فرآیندهای تصفیه است. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از روش‌هایی مانند منطق فازی، شبکه‌های عصبی و یادگیری تقویتی برای تنظیم پارامترهای عملیاتی نظیر نرخ هوادهی، زمان ماند هیدرولیکی و دوز مواد شیمیایی، می‌تواند پایداری فرآیندهای بیولوژیکی را افزایش داده و نوسانات عملکردی را کاهش دهد. در برخی موارد، این سیستم‌ها قادر بوده‌اند به صورت نیمه‌خودکار یا حتی خودکار تصمیم‌های کنترلی اتخاذ کنند و عملکرد تصفیه‌خانه را بهینه سازند.

بهینه‌سازی مصرف انرژی نیز یکی از محورهای مهم تحقیقات در این حوزه محسوب می‌شود. از آنجا که بخش قابل توجهی از مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مربوط به فرآیند هوادهی است، پژوهشگران از الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات در ترکیب با مدل‌های یادگیری ماشین برای یافتن شرایط بهینه عملیاتی استفاده کرده‌اند. نتایج بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از این رویکردها می‌تواند مصرف انرژی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد، بدون آنکه کیفیت پساب خروجی کاهش یابد.

در سال‌های اخیر، مفهوم «تصفیه‌خانه هوشمند» نیز به‌عنوان یکی از روندهای نوظهور در این حوزه مطرح شده است. در این رویکرد، داده‌های حاصل از حسگرها، سیستم‌های پایش آنلاین، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و زیرساخت‌های اینترنت اشیا با یکدیگر ادغام می‌شوند تا امکان پایش بلادرنگ و تصمیم‌گیری هوشمند فراهم گردد. این سیستم‌ها می‌توانند با تحلیل مداوم داده‌ها، تغییرات شرایط عملیاتی را شناسایی کرده و تنظیمات مناسب را پیشنهاد دهند یا به‌صورت خودکار اعمال کنند. چنین رویکردی می‌تواند به افزایش کارایی عملیاتی، کاهش هزینه‌ها و ارتقای پایداری زیست‌محیطی تصفیه‌خانه‌ها کمک کند.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این حوزه، مرور مطالعات نشان می‌دهد که هنوز چالش‌های متعددی در مسیر توسعه و کاربرد گسترده هوش مصنوعی در تصفیه‌خانه‌ها وجود دارد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، محدودیت دسترسی به داده‌های باکیفیت و بلندمدت است. بسیاری از مدل‌های یادگیری ماشین برای آموزش مؤثر به مجموعه داده‌های گسترده و دقیق نیاز دارند، در حالی که در بسیاری از تصفیه‌خانه‌ها داده‌های عملیاتی به‌صورت کامل ثبت نمی‌شوند یا دارای نواقص و خطاهای اندازه‌گیری هستند.

چالش دیگر، مسئله تعمیم‌پذیری مدل‌ها است. بسیاری از مدل‌های هوش مصنوعی که در یک تصفیه‌خانه یا شرایط خاص توسعه یافته‌اند، ممکن است در سایر تصفیه‌خانه‌ها با شرایط عملیاتی متفاوت عملکرد مشابهی نداشته باشند. تفاوت در نوع فرآیندهای تصفیه، ترکیب فاضلاب ورودی، شرایط اقلیمی و ساختار بهره‌برداری می‌تواند باعث کاهش دقت مدل‌ها در محیط‌های جدید شود.

همچنین، فاصله میان پژوهش‌های دانشگاهی و کاربردهای صنعتی نیز از دیگر چالش‌های مهم محسوب می‌شود. اگرچه تعداد زیادی از مطالعات علمی به توسعه مدل‌های پیشرفته پرداخته‌اند، اما پیاده‌سازی این مدل‌ها در مقیاس واقعی و در محیط‌های عملیاتی تصفیه‌خانه‌ها هنوز محدود است. این موضوع می‌تواند ناشی از عواملی مانند هزینه‌های پیاده‌سازی، نیاز به زیرساخت‌های داده‌ای، و عدم آشنایی اپراتورها با فناوری‌های هوش مصنوعی باشد.

بر اساس یافته‌های این مرور، چند مسیر مهم برای تحقیقات آینده قابل پیشنهاد است. نخست، توسعه مدل‌های ترکیبی که بتوانند دانش فرآیندی (مدل‌های مکانیکی) را با روش‌های داده‌محور ترکیب کنند می‌تواند دقت و قابلیت تعمیم مدل‌ها را افزایش دهد. دوم، استفاده از فناوری‌های نوظهور مانند یادگیری عمیق، یادگیری تقویتی پیشرفته و تحلیل کلان‌داده‌ها می‌تواند امکان تحلیل حجم‌های بزرگ داده و بهبود پیش‌بینی‌ها را فراهم سازد. سوم، توسعه سامانه‌های تصمیم‌یار عملیاتی که

بتوانند به‌طور مستقیم در محیط‌های واقعی تصفیه‌خانه‌ها مورد استفاده قرار گیرند، می‌تواند فاصله میان پژوهش و صنعت را کاهش دهد.

در مجموع، نتایج این مرور نظام‌مند نشان می‌دهد که هوش مصنوعی ظرفیت بالایی برای تحول در مدیریت و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب دارد. استفاده هوشمندانه از این فناوری می‌تواند به بهبود کیفیت پساب، کاهش مصرف انرژی، افزایش پایداری فرآیندها و ارتقای تصمیم‌گیری مدیریتی منجر شود. با این حال، تحقق کامل این ظرفیت نیازمند توسعه زیرساخت‌های داده‌ای، همکاری نزدیک میان پژوهشگران و صنعت، و انجام مطالعات کاربردی در مقیاس واقعی است.

منابع

احمدی، م.، رضایی، س.، و قربانی، ح. (۱۳۹۹). کاربرد یادگیری ماشین در پیش‌بینی کیفیت پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری. *فصلنامه مهندسی آب و فاضلاب*، *۳۱*(۲)، ۱۵–۳۰.

جعفری، م.، و مرادی، ف. (۱۴۰۰). مروری بر استفاده از هوش مصنوعی در بهینه‌سازی مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب. *نشریه علوم و فناوری آب ایران*، *۱۳*(۴)، ۱–۱۸.

حسینی، ع.، و کریمی، ن. (۱۴۰۱). توسعه سیستم تصمیم‌یار مبتنی بر هوش مصنوعی برای مدیریت هوشمند تصفیه‌خانه‌های فاضلاب. *مجله مهندسی عمران و محیط زیست*، *۵*(۳)، ۴۵–۶۲.

رستمی، م.، و منصوری، ک. (۱۳۹۸). کاربرد منطق فازی در کنترل فرآیندهای لجن فعال در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب. *نشریه مهندسی شیمی و نفت ایران*، *۳۳*(۱)، ۵۵–۶۸.

صادقی، ج.، علوی، م.، و بهرامی، ر. (۱۴۰۲). رویکردهای نوین هوش مصنوعی در پایش و کنترل آنلاین کیفیت پساب. *مجله فناوری‌های نوین در مهندسی آب*، *۴*(۱)، ۲۵–۴۴.

Fernandez, J., Perez, R., & Gomez, M. (۲۰۱۸). Application of artificial neural networks for COD and BOD prediction in wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management, 215*, ۷۲–۸۰.

Garcia, L., Rodriguez, A., & Silva, P. (۲۰۲۱). Intelligent control of activated sludge process using neural network-based controllers. *Water Research, 190*, ۱۱۶۷۲۸.

Kitchinham, B., & Charters, S. (۲۰۰۷). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering* (EBSE Technical Report). Keele University and Durham University Joint Report.

Liu, Y., Zhang, H., & Chen, X. (۲۰۲۰). Machine learning-based decision support system for wastewater treatment plants. *Environmental Modelling & Software, 132*, ۱۰۴۷۹۲.

Wang, J., Li, Y., & Xu, Z. (۲۰۲۲). Smart wastewater treatment plants: A review of AI, IoT and big data applications. *Water Research, 215*, ۱۱۸۲۷۶.

Wu, Q., Li, D., & Sun, J. (۲۰۲۰). Energy optimization of aeration systems in wastewater treatment using genetic algorithms. *Applied Energy, 277*, ۱۱۵۵۲۶.

Yang, S., Zhao, Y., & Kim, H. (۲۰۱۹). Fuzzy logic control for aeration in activated sludge processes under influent variability. *Chemical Engineering Journal, 359*, ۱۰۹۲–۱۱۰۳.

Zhang, L., Zhou, Q., & Li, M. (۲۰۲۱). Particle swarm optimization for operational cost reduction in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production, 278*, ۱۲۳۸۹۷.

Zhou, Q., Wang, H., & Liu, Y. (۲۰۲۳). Deep learning for multi-parameter water quality prediction in wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment, 857*, ۱۵۹۵۳۳.

مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات

سال هشتم، شماره ۸۱، فروردین ۱۴۰۵

A Systematic Review of the Role of Artificial Intelligence in the Smart Management of Water and Wastewater Treatment Plants

Atefeh Daneshvar[1], Marziyeh Jahangiri[2], Leila Rayzan[3], Aghdas Aghapour[4]

[1] MSc in Business Administration – Marketing, Bandar Abbas Water and Wastewater Company, Hormozgan Province, Iran (Corresponding Author)

[2] MSc in Business Administration – Domestic Commerce, Bandar Abbas Water and Wastewater Company, Hormozgan Province, Iran

[3] MSc in Environmental Engineering – Water and Wastewater, Bandar Abbas Water and Wastewater Company, Hormozgan Province, Iran

[4] Executive BSc in Civil Engineering, Bandar Abbas Water and Wastewater Company, Hormozgan Province, Iran

Abstract

The rapid growth of artificial intelligence technologies over the past decade has laid the foundation for a fundamental transformation in the management of complex infrastructure systems, including water and wastewater treatment plants. As multi-variable, nonlinear, and dynamic systems, treatment plants constantly face challenges such as fluctuations in influent quality, high energy consumption, operational costs, and strict environmental regulations. In this context, AI-based methods such as machine learning, artificial neural networks, fuzzy systems, and evolutionary algorithms have emerged as powerful tools for improving monitoring, prediction, control, and intelligent decision-making. The aim of this article is to provide a systematic review of studies examining the role of artificial intelligence in the smart management of water and wastewater treatment plants. Without conducting new empirical research, this review analyzes and compares studies published in reputable international scientific databases as well as Persian scholarly sources. The review focuses on identifying major application domains of AI in treatment plants, examining the theoretical and methodological frameworks of prior studies, and analyzing strengths, limitations, and emerging trends. Overall findings indicate that artificial intelligence plays a significant role in enhancing the accuracy of effluent quality prediction, reducing energy consumption, optimizing biological and chemical processes, and improving managerial decision-making. However, challenges such as data quality, model generalizability, lack of unified standards, and the gap between academic research and industrial application remain persistent. Ultimately, this article identifies existing research gaps and proposes future directions for research and development in AI-based smart management of treatment plants.

Keywords: Artificial Intelligence; Smart Management; Water and Wastewater Treatment Plant; Machine Learning; Process Optimization; Intelligent Monitoring and Control.