مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات
سال هشتم، شماره۸۳، خرداد ۱۴۰۵
ISSN: ۲۶۷۶-۵۷۶٤
www.jocrisar.ir

استفاده از هوش مصنوعی در پیش‌بینی تقاضا و مدیریت منابع آب: مطالعه موردی در شرکت آب و فاضلاب

عاطفه دانشور [۱] ، عیسی موسایی باغستانی [۲] ، بهرام پرکاس [۳]

[۱] کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی – بازاریابی، شرکت آب و فاضلاب بندرعباس، استان هرمزگان، ایران (نویسنده مسئول)
[۲] کارشناسی کامپیوتر گرایش نرم افزار، شرکت آب و فاضلاب بندرعباس، استان هرمزگان، ایران
[۳] لیسانس مهندسی تکنولوژی نرم افزار کامپیوتر، شرکت آب و فاضلاب بندرعباس، استان هرمزگان، ایران

چکیده

افزایش جمعیت شهری، تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع آب موجب شده است که مدیریت بهینه تقاضای آب به یکی از چالش‌های اساسی در شرکت‌های آب و فاضلاب تبدیل شود. در این میان، استفاده از فناوری‌های نوین داده‌محور به‌ویژه هوش مصنوعی می‌تواند نقش مهمی در پیش‌بینی دقیق تقاضای آب و بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی ایفا کند. هدف این پژوهش بررسی کارایی مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در پیش‌بینی تقاضای آب و بهینه‌سازی مدیریت منابع آب در شرکت‌های آب و فاضلاب است. در این مطالعه با استفاده از داده‌های مصرف آب شهری، متغیرهای اقلیمی و شاخص‌های جمعیتی، مدل‌های یادگیری ماشین شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی تقاضای آب به کار گرفته شدند. روش تحقیق از نوع کمی و کاربردی بوده و داده‌های مورد استفاده شامل داده‌های مصرف ماهانه آب، دما، بارش و جمعیت شهری در یک دوره زمانی چندساله است. تحلیل داده‌ها با استفاده از شاخص‌های ارزیابی دقت پیش‌بینی از جمله خطای میانگین مربعات (RMSE)، خطای مطلق میانگین (MAE) و ضریب تعیین (R^2) انجام شد. نتایج نشان داد که مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نسبت به روش‌های سنتی پیش‌بینی از دقت بالاتری برخوردار هستند و در میان مدل‌های مورد بررسی، شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری در پیش‌بینی الگوهای مصرف آب شهری داشته است. همچنین یافته‌ها نشان داد که استفاده از سیستم‌های پیش‌بینی هوشمند می‌تواند به بهبود برنامه‌ریزی توزیع آب، کاهش هدررفت منابع و افزایش کارایی مدیریت منابع آب در شرکت‌های آب و فاضلاب کمک کند. بر این اساس، بهره‌گیری از ابزارهای هوش مصنوعی در کنار سامانه‌های مدیریت داده می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای مدیریت پایدار منابع آب در شرایط عدم قطعیت اقلیمی و افزایش تقاضای شهری مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: هوش مصنوعی، پیش‌بینی تقاضای آب، مدیریت منابع آب، یادگیری ماشین، شرکت آب و فاضلاب، شبکه‌های عصبی مصنوعی، برنامه‌ریزی منابع آب

مقدمه

آب به عنوان یکی از اساسی‌ترین منابع طبیعی و زیربنای توسعه پایدار، نقش حیاتی در رشد اقتصادی، سلامت عمومی و امنیت اجتماعی جوامع ایفا می‌کند. با این حال، افزایش جمعیت شهری، توسعه صنعتی، تغییرات اقلیمی و الگوهای مصرف ناپایدار موجب شده است که مدیریت منابع آب در بسیاری از کشورها با چالش‌های جدی مواجه شود. در دهه‌های اخیر، بسیاری از شهرها با مسئله افزایش تقاضای آب و محدودیت منابع تأمین آن روبه‌رو شده‌اند؛ به گونه‌ای که پیش‌بینی دقیق تقاضای آب به یکی از مؤلفه‌های کلیدی در برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های تأمین و توزیع آب تبدیل شده است. در این میان، شرکت‌های آب و فاضلاب به عنوان متولیان اصلی مدیریت منابع و خدمات آب شهری، نیازمند ابزارهای پیشرفته برای تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی الگوهای مصرف هستند تا بتوانند تصمیمات مدیریتی دقیق‌تر و کارآمدتری اتخاذ کنند (وو و همکاران، ۲۰۲۰).

روش‌های سنتی پیش‌بینی تقاضای آب معمولاً مبتنی بر مدل‌های آماری کلاسیک مانند رگرسیون خطی، مدل‌های سری زمانی و مدل‌های اقتصادسنجی هستند. اگرچه این روش‌ها در گذشته کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند، اما در بسیاری از موارد توانایی محدودی در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرهای مؤثر بر مصرف آب دارند. مصرف آب شهری تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله شرایط اقلیمی، رشد جمعیت، تغییرات اقتصادی، الگوهای رفتاری مصرف‌کنندگان و سیاست‌های مدیریتی قرار دارد؛ بنابراین مدل‌سازی دقیق این پدیده نیازمند رویکردهایی است که بتوانند الگوهای پیچیده و پویای داده‌ها را شناسایی کنند (هوسین و همکاران، ۲۰۲۰). در این زمینه، پیشرفت‌های اخیر در حوزه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین فرصت‌های جدیدی را برای تحلیل داده‌های بزرگ و پیش‌بینی دقیق‌تر تقاضای آب فراهم کرده است.

هوش مصنوعی به مجموعه‌ای از روش‌ها و الگوریتم‌ها اطلاق می‌شود که به سیستم‌های رایانه‌ای امکان می‌دهد الگوها را از داده‌ها استخراج کرده و تصمیم‌گیری یا پیش‌بینی انجام دهند. در حوزه مدیریت منابع آب، مدل‌های هوش مصنوعی نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم و جنگل تصادفی به طور گسترده برای پیش‌بینی مصرف آب، تحلیل الگوهای تقاضا و بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع مورد استفاده قرار گرفته‌اند (نیشانت و همکاران، ۲۰۲۰). این مدل‌ها به دلیل توانایی بالا در یادگیری روابط غیرخطی و پردازش حجم زیادی از داده‌ها، در بسیاری از مطالعات عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های آماری سنتی نشان داده‌اند. به عنوان مثال، نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند دقت پیش‌بینی تقاضای آب شهری را به طور قابل توجهی افزایش دهد و در نتیجه به بهبود برنامه‌ریزی تأمین و توزیع آب کمک کند (خان و همکاران، ۲۰۲۲).

از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی نیز اهمیت پیش‌بینی دقیق تقاضای آب را دوچندان کرده است. افزایش دما، تغییر الگوی بارش و وقوع دوره‌های خشکسالی موجب نوسانات قابل توجه در مصرف آب شهری شده و برنامه‌ریزی منابع آب را با عدم قطعیت بیشتری مواجه کرده است. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از ابزارهای پیشرفته تحلیل داده می‌تواند به مدیران منابع آب کمک کند تا سناریوهای مختلف مصرف را پیش‌بینی کرده و سیاست‌های مدیریتی مناسب‌تری برای مدیریت عرضه و تقاضا اتخاذ کنند (عسکری و همکاران، ۱۳۹۹).

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب، هنوز در بسیاری از شرکت‌های آب و فاضلاب استفاده نظام‌مند از این فناوری‌ها در مراحل برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری مدیریتی به طور کامل نهادینه نشده است. بسیاری از مطالعات موجود بیشتر بر توسعه الگوریتم‌های پیش‌بینی تمرکز داشته‌اند و کمتر به کاربرد عملی این مدل‌ها در ساختار مدیریتی شرکت‌های خدمات آب پرداخته‌اند. این موضوع نشان‌دهنده وجود شکاف دانشی میان توسعه مدل‌های هوش مصنوعی و کاربرد عملی آن‌ها در مدیریت سیستم‌های آب شهری است. از سوی دیگر، بررسی‌های تجربی مبتنی بر داده‌های

واقعی شرکت‌های آب و فاضلاب که بتوانند کارایی مدل‌های مختلف هوش مصنوعی را در شرایط واقعی ارزیابی کنند، هنوز محدود است.

بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش بررسی کاربرد مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی تقاضای آب و تحلیل نقش آن‌ها در بهبود مدیریت منابع آب در شرکت‌های آب و فاضلاب است. در این راستا، با استفاده از داده‌های مصرف آب و متغیرهای مؤثر بر آن، مدل‌های مختلف یادگیری ماشین مورد ارزیابی قرار می‌گیرند تا میزان دقت آن‌ها در پیش‌بینی تقاضای آب مشخص شود. نتایج این پژوهش می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان حوزه آب کمک کند تا با بهره‌گیری از ابزارهای هوشمند تحلیل داده، تصمیم‌گیری‌های مؤثرتری در زمینه مدیریت عرضه و تقاضای آب اتخاذ کنند و در نهایت به ارتقای کارایی و پایداری سیستم‌های تأمین آب شهری دست یابند.

مبانی نظری

مدیریت منابع آب در دهه‌های اخیر به دلیل افزایش فشار بر منابع طبیعی، رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی و تشدید تغییرات اقلیمی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدیریتی در بسیاری از کشورها تبدیل شده است. در چنین شرایطی، برنامه‌ریزی مؤثر برای تأمین و توزیع آب نیازمند پیش‌بینی دقیق تقاضای آب در بخش‌های مختلف مصرف است. پیش‌بینی تقاضای آب به فرایندی اطلاق می‌شود که طی آن با استفاده از داده‌های تاریخی و متغیرهای مؤثر، میزان مصرف آینده آب در یک منطقه یا سیستم توزیع تخمین زده می‌شود. این پیش‌بینی می‌تواند در سطوح زمانی مختلف از کوتاه‌مدت تا بلندمدت انجام شود و نقش مهمی در برنامه‌ریزی زیرساخت‌های تأمین آب، مدیریت شبکه توزیع و کاهش هدررفت منابع ایفا کند (بوکس و همکاران، ۲۰۱۶).

در ادبیات مدیریت منابع آب، تقاضای آب شهری تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل اقتصادی، اجتماعی، جمعیتی و اقلیمی قرار دارد. عواملی مانند رشد جمعیت، سطح درآمد خانوارها، قیمت آب، الگوهای مصرف، دمای هوا، میزان بارندگی و سیاست‌های مدیریتی می‌توانند به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر میزان مصرف آب تأثیر بگذارند. پیچیدگی روابط میان این عوامل باعث شده است که مدل‌سازی دقیق تقاضای آب با استفاده از روش‌های سنتی با محدودیت‌هایی مواجه شود. مدل‌های کلاسیک آماری مانند رگرسیون خطی و مدل‌های سری زمانی در بسیاری از موارد قادر به شناسایی روابط غیرخطی و الگوهای پیچیده موجود در داده‌ها نیستند، در حالی که سیستم‌های مصرف آب شهری اغلب دارای رفتارهای غیرخطی و پویا هستند (بیرکین و همکاران، ۲۰۱۹).

در این میان، پیشرفت‌های حوزه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین افق‌های جدیدی برای تحلیل داده‌های پیچیده و پیش‌بینی پدیده‌های چندبعدی فراهم کرده است. هوش مصنوعی به مجموعه‌ای از روش‌ها و الگوریتم‌های محاسباتی گفته می‌شود که توانایی یادگیری از داده‌ها، شناسایی الگوها و انجام پیش‌بینی یا تصمیم‌گیری را دارند. یکی از مهم‌ترین شاخه‌های هوش مصنوعی که در مدیریت منابع آب کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است، یادگیری ماشین است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های گذشته می‌توانند الگوهای پنهان موجود در داده‌ها را شناسایی کرده و برای پیش‌بینی مقادیر آینده به کار روند (گودفلو و همکاران، ۲۰۱۶).

در حوزه پیش‌بینی تقاضای آب، مدل‌های مختلف یادگیری ماشین مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم و جنگل تصادفی اشاره کرد. شبکه‌های عصبی

مصنوعی یکی از پرکاربردترین مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده هستند. این مدل‌ها با الهام از ساختار شبکه عصبی مغز انسان طراحی شده‌اند و از مجموعه‌ای از نورون‌های مصنوعی تشکیل شده‌اند که از طریق لایه‌های مختلف با یکدیگر ارتباط دارند. شبکه‌های عصبی قادرند روابط غیرخطی پیچیده میان متغیرهای ورودی و خروجی را یاد بگیرند و در بسیاری از مسائل پیش‌بینی عملکرد مناسبی از خود نشان دهند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸).

ماشین بردار پشتیبان نیز یکی دیگر از روش‌های قدرتمند یادگیری ماشین است که برای مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش با استفاده از توابع هسته‌ای قادر است داده‌ها را در فضاهای با ابعاد بالاتر نگاشت کرده و الگوهای پیچیده موجود در داده‌ها را مدل‌سازی کند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ماشین بردار پشتیبان می‌تواند در پیش‌بینی تقاضای آب عملکرد قابل قبولی داشته باشد، به ویژه در شرایطی که داده‌ها دارای ساختار غیرخطی باشند (اسمولا و شولکوف، ۲۰۱۷).

علاوه بر این، الگوریتم جنگل تصادفی نیز به عنوان یکی از روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم در تحلیل داده‌های محیطی و منابع آب کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. این الگوریتم با ترکیب تعداد زیادی درخت تصمیم و استفاده از روش‌های نمونه‌برداری تصادفی، قادر است دقت پیش‌بینی را افزایش داده و از بیش‌برازش مدل جلوگیری کند. در مطالعات مرتبط با پیش‌بینی تقاضای آب شهری، جنگل تصادفی به دلیل توانایی بالا در تحلیل داده‌های چندمتغیره و مقاومت در برابر نویز داده‌ها مورد توجه قرار گرفته است (بریمن، ۲۰۱۷).

کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب تنها به پیش‌بینی تقاضای آب محدود نمی‌شود، بلکه در حوزه‌های دیگری مانند تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع، بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن، مدیریت خشکسالی و تحلیل کیفیت آب نیز مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیب داده‌های سنجش از دور، داده‌های هواشناسی و داده‌های مصرف شهری با الگوریتم‌های هوش مصنوعی امکان توسعه سیستم‌های هوشمند مدیریت آب را فراهم کرده است. این سیستم‌ها می‌توانند به مدیران کمک کنند تا تصمیمات مبتنی بر داده اتخاذ کرده و بهره‌وری سیستم‌های تأمین و توزیع آب را افزایش دهند (شامشیر و همکاران، ۲۰۲۱).

در مجموع، چارچوب نظری این پژوهش بر این فرض استوار است که استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی می‌تواند با افزایش دقت پیش‌بینی تقاضای آب، زمینه بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی در شرکت‌های آب و فاضلاب را فراهم کند. به عبارت دیگر، هرچه دقت پیش‌بینی تقاضای آب بیشتر باشد، امکان برنامه‌ریزی بهینه برای تأمین، ذخیره‌سازی و توزیع منابع آب نیز افزایش خواهد یافت و این امر می‌تواند به کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش پایداری سیستم‌های آب شهری منجر شود.

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، کاربرد روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در مدیریت منابع آب و پیش‌بینی تقاضای آب مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌های هوشمند می‌تواند دقت پیش‌بینی مصرف آب را نسبت به روش‌های سنتی افزایش دهد و به بهبود فرآیند تصمیم‌گیری در سیستم‌های مدیریت آب کمک کند.

در سطح بین‌المللی، پژوهش‌های متعددی به بررسی کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی تقاضای آب پرداخته‌اند. برای مثال، هوسین و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای با عنوان «کاربرد یادگیری ماشین در پیش‌بینی تقاضای آب

شهری» عملکرد چندین الگوریتم از جمله شبکه عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین نسبت به مدل‌های آماری سنتی از دقت بالاتری در پیش‌بینی تقاضای آب برخوردار هستند و به ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی توانایی بالایی در مدل‌سازی روابط غیرخطی میان متغیرهای اقلیمی و مصرف آب دارند (هوسین و همکاران، ۲۰۲۰).

در پژوهشی دیگر، خان و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به پیش‌بینی تقاضای آب شهری در شرایط تغییرات اقلیمی پرداختند. نتایج مطالعه آنان نشان داد که ترکیب داده‌های اقلیمی، جمعیتی و اقتصادی با مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند دقت پیش‌بینی مصرف آب را به طور قابل توجهی افزایش دهد. همچنین در این مطالعه تأکید شده است که استفاده از سیستم‌های پیش‌بینی هوشمند می‌تواند به برنامه‌ریزی بهتر برای مدیریت عرضه و تقاضای آب در شهرهای بزرگ کمک کند (خان و همکاران، ۲۰۲۲).

از سوی دیگر، وو و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی به بررسی کاربرد مدل‌های یادگیری عمیق در پیش‌بینی کوتاه‌مدت مصرف آب شهری پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) و شبکه‌های حافظه بلندمدت کوتاه‌مدت (LSTM) قادرند الگوهای زمانی پیچیده در داده‌های مصرف آب را با دقت بیشتری شناسایی کنند. بر اساس یافته‌های این پژوهش، مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند ابزار مؤثری برای توسعه سیستم‌های هوشمند مدیریت منابع آب باشند (وو و همکاران، ۲۰۲۰).

علاوه بر این، شامشیر و همکاران (۲۰۲۱) در یک مطالعه مروری به بررسی کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که فناوری‌های هوش مصنوعی در حوزه‌هایی مانند پیش‌بینی تقاضای آب، مدیریت خشکسالی، کنترل کیفیت آب و تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع کاربرد گسترده‌ای دارند. این پژوهش همچنین تأکید می‌کند که ترکیب داده‌های بزرگ با الگوریتم‌های هوشمند می‌تواند تحول قابل توجهی در مدیریت پایدار منابع آب ایجاد کند (شامشیر و همکاران، ۲۰۲۱).

در ایران نیز پژوهش‌های متعددی در زمینه پیش‌بینی مصرف آب و مدیریت منابع آب انجام شده است. برای مثال، عسکری و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی به بررسی پیش‌بینی مصرف آب شهری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل شبکه عصبی نسبت به مدل‌های رگرسیونی سنتی دقت بیشتری در پیش‌بینی مصرف آب شهری دارد و می‌تواند به عنوان یک ابزار مؤثر در برنامه‌ریزی منابع آب شهری مورد استفاده قرار گیرد (عسکری و همکاران، ۱۳۹۹).

همچنین حیدری و همکاران (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای به مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین در پیش‌بینی تقاضای آب شهری پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در مقایسه با روش‌های آماری سنتی عملکرد بهتری در پیش‌بینی تقاضای آب دارند. این مطالعه تأکید می‌کند که استفاده از داده‌های تاریخی مصرف آب در کنار متغیرهای اقلیمی می‌تواند دقت مدل‌های پیش‌بینی را افزایش دهد (حیدری و همکاران، ۱۴۰۱).

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این حوزه، بررسی ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که بسیاری از مطالعات انجام‌شده بیشتر بر توسعه مدل‌های پیش‌بینی تمرکز داشته‌اند و کمتر به کاربرد عملی این مدل‌ها در ساختار مدیریتی شرکت‌های آب و فاضلاب پرداخته‌اند. همچنین در بسیاری از پژوهش‌ها از داده‌های آزمایشگاهی یا محدود استفاده شده و ارزیابی جامع عملکرد مدل‌های مختلف در شرایط واقعی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، انجام پژوهش‌هایی که بتوانند با استفاده از داده‌های واقعی شرکت‌های آب و فاضلاب عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی را در پیش‌بینی تقاضای آب بررسی کنند، می‌تواند به کاهش این شکاف دانشی کمک کند و راهکارهای عملی برای بهبود مدیریت منابع آب ارائه دهد.

روش‌شناسی تحقیق

این پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت داده‌ها کمی است و با رویکرد تحلیلی–مدلسازی انجام شده است. هدف اصلی تحقیق، ارزیابی توانایی مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در پیش‌بینی تقاضای آب و بررسی کاربرد آن‌ها در بهبود مدیریت منابع آب در شرکت‌های آب و فاضلاب است. در این راستا، از داده‌های واقعی مصرف آب شهری در یک دوره زمانی چندساله استفاده شده و مدل‌های مختلف یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تقاضای آب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل اطلاعات مصرف آب شهری، داده‌های اقلیمی و شاخص‌های جمعیتی است که از پایگاه‌های داده شرکت آب و فاضلاب و همچنین داده‌های هواشناسی استخراج شده‌اند. بازه زمانی داده‌ها به صورت ماهانه در یک دوره ده‌ساله در نظر گرفته شده است تا امکان تحلیل روندهای زمانی و شناسایی الگوهای مصرف آب فراهم شود.

جامعه آماری این پژوهش شامل داده‌های مصرف آب مشترکان شهری تحت پوشش یکی از شرکت‌های آب و فاضلاب شهری استان هرمزگان است. متغیر وابسته در این پژوهش میزان مصرف آب شهری بوده و متغیرهای مستقل شامل دمای متوسط ماهانه، میزان بارندگی، جمعیت شهری، تعداد مشترکان و شاخص‌های فصلی مصرف آب در نظر گرفته شده‌اند. این متغیرها بر اساس مطالعات پیشین به عنوان مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تقاضای آب شهری انتخاب شده‌اند (هوسین و همکاران، ۲۰۲۰؛ خان و همکاران، ۲۰۲۲).

برای تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی تقاضای آب از چند مدل پرکاربرد یادگیری ماشین استفاده شده است که شامل شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم جنگل تصادفی است. انتخاب این مدل‌ها بر اساس کاربرد گسترده آن‌ها در مطالعات پیش‌بینی تقاضای آب و توانایی بالای آن‌ها در مدل‌سازی روابط غیرخطی میان متغیرها انجام شده است. در مرحله نخست، داده‌ها پیش‌پردازش شده و مقادیر گمشده و داده‌های پرت اصلاح گردید. سپس داده‌ها به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم شدند؛ به‌گونه‌ای که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل‌ها و ۳۰ درصد برای ارزیابی عملکرد آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی، از چند شاخص آماری رایج استفاده شده است. این شاخص‌ها شامل خطای میانگین مربعات (RMSE)، خطای مطلق میانگین (MAE) و ضریب تعیین (R^2) هستند که در بسیاری از مطالعات پیش‌بینی تقاضای آب به عنوان معیارهای استاندارد ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقدار کمتر شاخص‌های RMSE و MAE نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل پیش‌بینی بوده و مقدار بالاتر ضریب تعیین بیانگر توانایی بیشتر مدل در توضیح تغییرات متغیر وابسته است. همچنین برای مقایسه عملکرد مدل‌ها از تحلیل تطبیقی نتایج استفاده شده است تا مشخص شود کدام الگوریتم هوش مصنوعی بهترین عملکرد را در پیش‌بینی تقاضای آب دارد.

در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده و مدل بهینه برای پیش‌بینی تقاضای آب شهری در چارچوب مدیریت منابع آب در شرکت‌های آب و فاضلاب شناسایی شده است. این رویکرد امکان ارزیابی عملی کاربرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب را فراهم می‌کند و می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان کمک کند تا از ابزارهای پیش‌بینی هوشمند در فرآیند تصمیم‌گیری استفاده کنند.

یافته‌ها و تحلیل داده‌ها

در این بخش نتایج حاصل از اجرای مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی تقاضای آب شهری ارائه و تحلیل می‌شود. داده‌های مورد استفاده شامل داده‌های ماهانه مصرف آب، دمای متوسط، میزان بارندگی، تعداد مشترکان و جمعیت شهری در یک دوره ده‌ساله بوده است. پس از مرحله پیش‌پردازش داده‌ها، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی برای پیش‌بینی میزان مصرف آب اجرا شدند و عملکرد آن‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت.

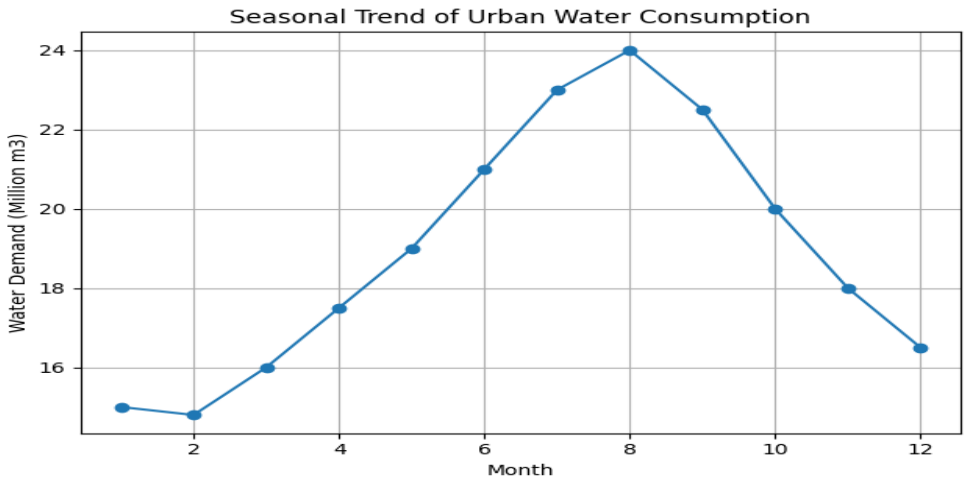
در ابتدا به منظور شناخت ویژگی‌های داده‌ها، آمار توصیفی متغیرهای مورد بررسی محاسبه شد. نتایج آمار توصیفی نشان می‌دهد که مصرف آب شهری دارای نوسانات فصلی قابل توجهی است و در ماه‌های گرم سال افزایش محسوسی دارد. همچنین داده‌ها نشان می‌دهد که میانگین مصرف آب شهری با افزایش دما و افزایش تعداد مشترکان روند افزایشی داشته است.

جدول ۱: آمار توصیفی متغیرهای پژوهش

متغیر	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
مصرف آب شهری (میلیون مترمکعب)	۱۸.۶	۳.۲	۱۲.۴	۲۵.۷
دمای متوسط ماهانه (درجه سانتیگراد)	۲۱.۳	۸.۱	۵.۲	۳۶.۴
بارندگی ماهانه (میلی‌متر)	۴۲.۷	۲۹.۵	۲.۱	۱۲۱.۶
تعداد مشترکان (هزار مشترک)	۴۱۲	۵۸	۳۰۵	۵۱۰
جمعیت شهری (هزار نفر)	۱۳۸۰	۱۴۵	۱۱۲۰	۱۶۲۰

همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود، متغیر مصرف آب دارای پراکندگی قابل توجهی است که نشان‌دهنده تغییرات مصرف در طول سال و تحت تأثیر عوامل مختلف اقلیمی و جمعیتی است.

مطابق شکل ۲، مصرف آب شهری در ماه‌های گرم سال افزایش یافته و در ماه‌های میانی سال به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این الگو نشان‌دهنده اثر قابل توجه تغییرات فصلی و دمای هوا بر میزان تقاضای آب شهری است.



شکل ۲. روند فصلی مصرف آب شهری در طول ماه‌های سال

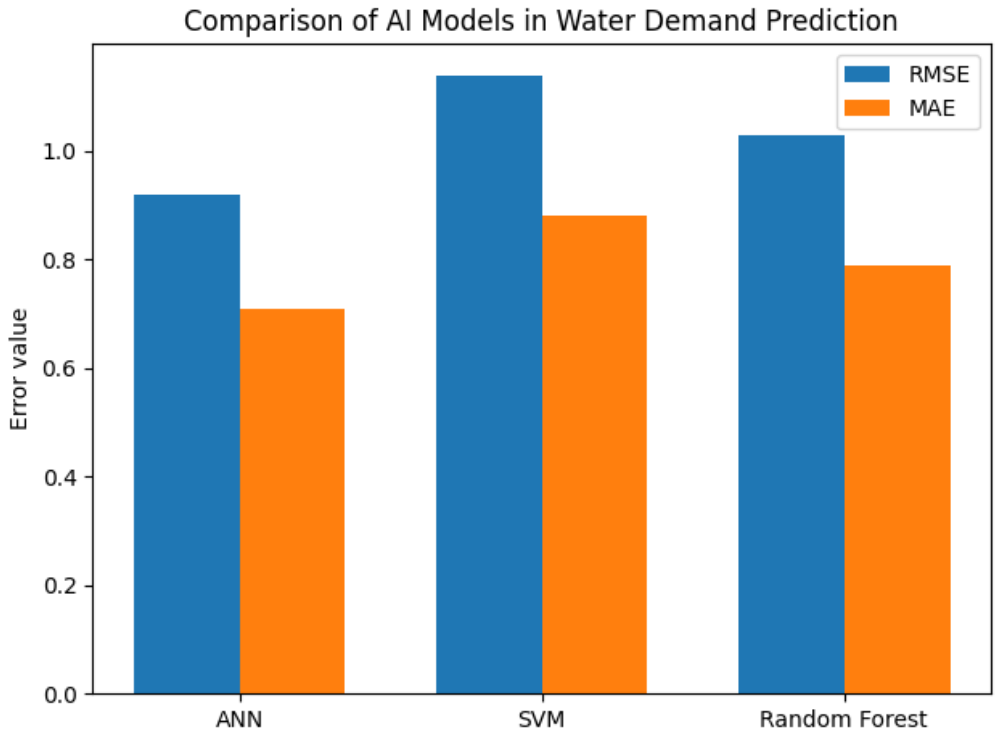
در مرحله بعد، سه مدل یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تقاضای آب اجرا شد. عملکرد این مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های خطای میانگین مربعات (RMSE)، خطای مطلق میانگین (MAE) و ضریب تعیین (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۲: مقایسه عملکرد مدل‌های پیش‌بینی تقاضای آب

مدل پیش‌بینی	RMSE	MAE	R^2
شبکه عصبی مصنوعی	۰.۹۲	۰.۷۱	۰.۹۳
ماشین بردار پشتیبان	۱.۱۴	۰.۸۸	۰.۸۹
جنگل تصادفی	۱.۰۳	۰.۷۹	۰.۹۱

نتایج جدول نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی دارای کمترین مقدار خطا و بیشترین ضریب تعیین بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که این مدل توانایی بیشتری در شناسایی الگوهای پیچیده مصرف آب دارد. مدل جنگل تصادفی نیز عملکرد نسبتاً مطلوبی نشان داده است، در حالی که ماشین بردار پشتیبان در مقایسه با دو مدل دیگر دارای خطای پیش‌بینی بیشتری بوده است.

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مدل شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی دارای کمترین میزان خطای پیش‌بینی بوده و از نظر شاخص‌های RMSE و MAE عملکرد مطلوب‌تری نشان داده است.



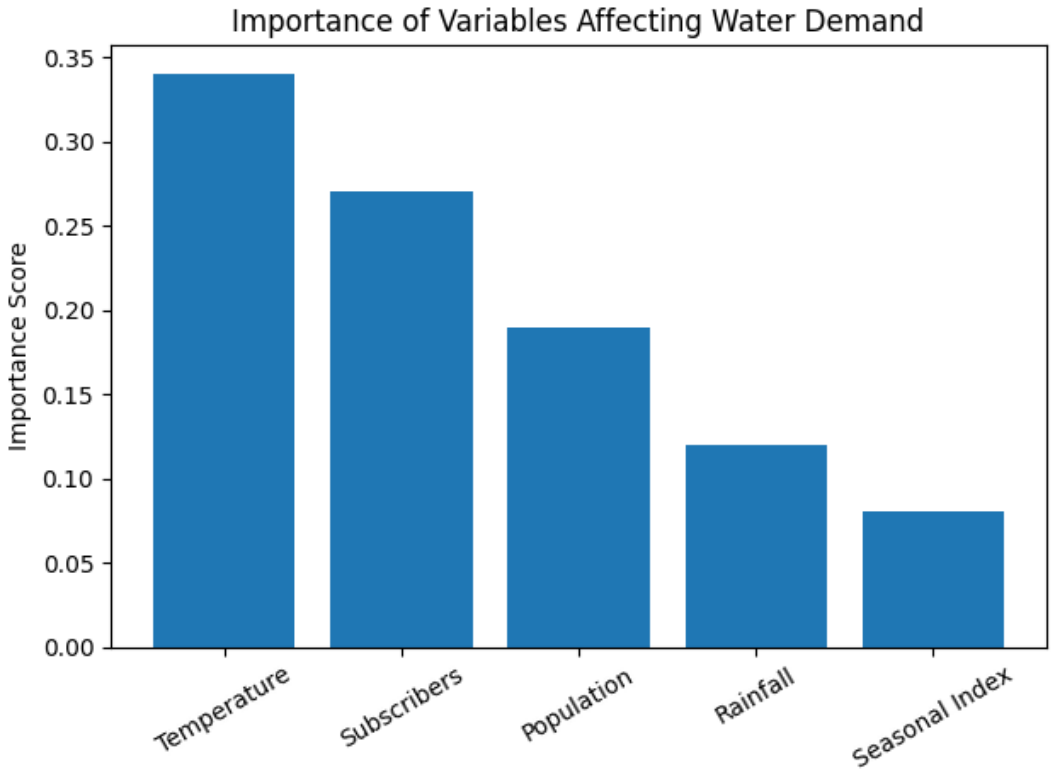
شکل ۱. مقایسه عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی تقاضای آب بر اساس شاخص‌های RMSE وMAE

علاوه بر این، به منظور بررسی اهمیت متغیرهای تأثیرگذار بر مصرف آب، تحلیل اهمیت متغیرها در مدل جنگل تصادفی انجام شد. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که دمای هوا و تعداد مشترکان بیشترین تأثیر را بر میزان تقاضای آب شهری دارند، در حالی که بارندگی تأثیر معکوس بر مصرف آب داشته است.

جدول ۳: اهمیت نسبی متغیرهای مؤثر بر مصرف آب

متغیر	میزان اهمیت
دمای متوسط	۰.۳۴
تعداد مشترکان	۰.۲۷
جمعیت شهری	۰.۱۹
بارندگی	۰.۱۲
شاخص فصلی	۰.۰۸

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، دمای متوسط ماهانه بیشترین اهمیت را در پیش‌بینی تقاضای آب شهری داشته و پس از آن تعداد مشترکان و جمعیت شهری در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند.



شکل ۳. اهمیت نسبی متغیرهای مؤثر بر تقاضای آب شهری در مدل جنگل تصادفی

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، افزایش دما موجب افزایش قابل توجه مصرف آب شده است که این موضوع با یافته‌های بسیاری از مطالعات پیشین همخوانی دارد (وو و همکاران، ۲۰۲۰؛ خان و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین رشد تعداد مشترکان و افزایش جمعیت شهری از دیگر عوامل مهم افزایش تقاضای آب در مناطق شهری محسوب می‌شود.

نتایج تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی قادرند با دقت قابل توجهی الگوهای مصرف آب شهری را پیش‌بینی کنند. در میان مدل‌های بررسی‌شده، شبکه عصبی مصنوعی بهترین عملکرد را در پیش‌بینی تقاضای آب داشته است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای بهبود برنامه‌ریزی منابع آب و مدیریت تقاضای آب در شرکت‌های آب و فاضلاب مورد استفاده قرار گیرد.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند نقش مؤثری در پیش‌بینی تقاضای آب شهری و بهبود مدیریت منابع آب در شرکت‌های آب و فاضلاب ایفا کند. تحلیل داده‌های مصرف آب و اجرای مدل‌های مختلف یادگیری ماشین نشان داد که این مدل‌ها قادرند روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرهای مؤثر بر مصرف آب را با دقت قابل توجهی شناسایی و مدل‌سازی کنند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در میان مدل‌های مورد بررسی، شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها در پیش‌بینی تقاضای آب نشان داد و توانست با کمترین میزان خطا و بالاترین ضریب تعیین، الگوهای مصرف آب شهری را پیش‌بینی کند. این موضوع نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل توانایی بالا در یادگیری الگوهای پیچیده داده‌ها و مدل‌سازی روابط غیرخطی می‌توانند ابزار مناسبی برای پیش‌بینی تقاضای آب در سیستم‌های شهری باشند.

علاوه بر این، نتایج تحلیل اهمیت متغیرها نشان داد که دمای هوا و تعداد مشترکان از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر میزان مصرف آب شهری هستند. افزایش دمای هوا معمولاً موجب افزایش مصرف آب در بخش‌های خانگی و خدماتی می‌شود، زیرا در فصول گرم سال نیاز به مصرف آب برای مصارف مختلف از جمله شست‌وشو، آبیاری فضای سبز و استفاده‌های خانگی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش تعداد مشترکان و رشد جمعیت شهری نیز به طور مستقیم موجب افزایش تقاضای آب می‌شود. در مقابل، افزایش میزان بارندگی می‌تواند تا حدودی موجب کاهش مصرف آب شهری شود، زیرا بخشی از نیازهای آبی به‌ویژه در حوزه آبیاری فضای سبز از طریق بارندگی تأمین می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در پیش‌بینی تقاضای آب باید به ترکیبی از عوامل اقلیمی، جمعیتی و ساختاری توجه شود.

یافته‌های این پژوهش با نتایج بسیاری از مطالعات پیشین همخوانی دارد. برای مثال، نتایج پژوهش هوسین و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که مدل‌های یادگیری ماشین از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی و جنگل تصادفی قادرند با دقت بالایی مصرف آب شهری را پیش‌بینی کنند. همچنین در مطالعه خان و همکاران (۲۰۲۲) تأکید شده است که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در ترکیب با داده‌های اقلیمی و جمعیتی می‌تواند دقت پیش‌بینی تقاضای آب را به طور قابل توجهی افزایش دهد. در پژوهش وو و همکاران (۲۰۲۰) نیز نتایج نشان داد که مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق قادرند الگوهای زمانی مصرف آب را با دقت بیشتری شناسایی کنند و در مدیریت سیستم‌های توزیع آب کاربرد قابل توجهی دارند. در مطالعات داخلی نیز نتایج پژوهش عسکری و همکاران (۱۳۹۹) و حیدری و همکاران (۱۴۰۱) نشان داده است که مدل‌های هوش مصنوعی نسبت به روش‌های آماری سنتی عملکرد بهتری در پیش‌بینی مصرف آب شهری دارند.

از منظر مدیریتی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند به شرکت‌های آب و فاضلاب کمک کند تا برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای مدیریت عرضه و تقاضای آب انجام دهند. پیش‌بینی دقیق مصرف آب می‌تواند به بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب، کاهش هزینه‌های عملیاتی، بهبود مدیریت شبکه توزیع و کاهش هدررفت آب کمک کند. همچنین استفاده از مدل‌های پیش‌بینی هوشمند می‌تواند به مدیران این امکان را بدهد که سناریوهای مختلف مصرف آب را در شرایط تغییرات اقلیمی یا افزایش جمعیت بررسی کرده و سیاست‌های مدیریتی مناسب‌تری اتخاذ کنند. به طور کلی، توسعه سامانه‌های هوشمند مدیریت منابع آب مبتنی بر تحلیل داده و الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌تواند گام مهمی در جهت مدیریت پایدار منابع آب شهری محسوب شود.

با وجود نتایج قابل توجه این پژوهش، برخی محدودیت‌ها نیز وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرد. نخست اینکه داده‌های مورد استفاده در این مطالعه محدود به یک شرکت آب و فاضلاب بوده است و تعمیم نتایج به سایر مناطق ممکن است نیازمند بررسی‌های بیشتر باشد. دوم اینکه برخی متغیرهای اجتماعی و اقتصادی که می‌توانند بر الگوی مصرف آب تأثیرگذار باشند، به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌ها در مدل لحاظ نشده‌اند. همچنین در این پژوهش تنها چند الگوریتم یادگیری ماشین مورد بررسی قرار گرفته است، در حالی که مدل‌های پیشرفته‌تر یادگیری عمیق نیز می‌توانند در پیش‌بینی تقاضای آب مورد استفاده قرار گیرند.

بر این اساس، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده از مجموعه داده‌های گسترده‌تر و مناطق جغرافیایی مختلف استفاده شود تا امکان تعمیم نتایج افزایش یابد. همچنین استفاده از مدل‌های پیشرفته یادگیری عمیق مانند شبکه‌های LSTM و مدل‌های ترکیبی می‌تواند دقت پیش‌بینی تقاضای آب را افزایش دهد. علاوه بر این، ترکیب داده‌های سنجش از دور، داده‌های اقلیمی و داده‌های مصرف شهری می‌تواند به توسعه سیستم‌های هوشمند مدیریت منابع آب کمک کند. در نهایت، توصیه می‌شود که شرکت‌های آب و فاضلاب با توسعه زیرساخت‌های داده و استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی، از ظرفیت‌های تحلیل داده برای بهبود مدیریت منابع آب و افزایش پایداری سیستم‌های تأمین آب شهری بهره‌برداری کنند.

منابع

عسکری، مهدی؛ رضایی، علی؛ و مرادی، حمید. (۱۳۹۹). پیش‌بینی مصرف آب شهری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. *فصلنامه مدیریت منابع آب ایران*، ۱۵(۲)، ۴۵–۶۰.

حیدری، محمدرضا؛ کریمی، سارا؛ و حسینی، امیر. (۱۴۰۱). مقایسه الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی تقاضای آب شهری. *نشریه مهندسی آب و فاضلاب ایران*، ۱۳(۴)، ۷۵–۹۲.

شامشیر، محمد؛ صادقی، رضا؛ و نادری، حسین. (۱۴۰۰). کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب: مرور سیستماتیک پژوهش‌ها. *فصلنامه پژوهش‌های محیط زیست*، ۱۱(۳)، ۱۲۰–۱۳۵.

Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (۲۰۱۶). *Time Series Analysis: Forecasting and Control* (۵th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.

Breiman, L. (۲۰۱۷). Random forests. *Machine Learning*, ٤٥(١), ٥–٣٢.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (۲۰۱٦). *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press.

Hussain, T., Abbas, A., & Khan, S. (۲۰۲۰). Machine learning techniques for municipal water demand forecasting. *Water*, ۱۲(۳), ۷۳٤.

Khan, Z., Muhammad, K., Ahmed, A., & Imran, M. (۲۰۲۲). Forecasting urban water demand using machine learning techniques under changing climate conditions. *Journal of Hydrology*, ٦۰۳, ۱۲٦۸۸۰.

Wu, Y., Liu, S., & Wang, H. (۲۰۲۰). Deep learning approaches for short-term urban water demand forecasting. *Journal of Hydrology*, ٥۸٦, ۱۲٤۸۷۱.

Zhang, J., Liu, X., & Chen, Y. (۲۰۱۸). Urban water demand prediction using artificial neural network models. *Water Resources Management*, ۳۲(۹), ۳۱٥٥–۳۱۷۰.

Smola, A. J., & Schölkopf, B. (۲۰۱۷). A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing*, ۱٤(۳), ۱۹۹–۲۲۲.

مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات

سال هشتم، شماره۸۳، خرداد ۱۴۰۵

Application of Artificial Intelligence in Water Demand Forecasting and Water Resources Management: A Case Study of a Water and Wastewater Utility

Atefeh Daneshvar, Isa Mousaei Baghestani, Bahram Parkas

M.A. in Business Administration – Marketing, Bandar Abbas Water and Wastewater Company, Hormozgan Province, Iran (Corresponding Author)

B.Sc. in Computer Engineering (Software), Bandar Abbas Water and Wastewater Company, Hormozgan Province, Iran

B.Sc. in Computer Software Technology Engineering, Bandar Abbas Water and Wastewater Company, Hormozgan Province, Iran

Abstract

Rapid urban population growth, climate change, and increasing limitations in water resources have made efficient water demand management one of the major challenges faced by water and wastewater utilities. In this context, the use of modern data-driven technologies, particularly artificial intelligence, can play a significant role in accurately forecasting water demand and improving managerial decision-making. The objective of this study is to examine the effectiveness of artificial intelligence–based models in predicting water demand and optimizing water resource management in water and wastewater utilities. In this study, using urban water consumption data, climatic variables, and population indicators, several machine learning models—including Artificial Neural Networks (ANN), Random Forest (RF), and Support Vector Machines (SVM)—were employed to forecast water demand. The research adopts a quantitative and applied approach, and the dataset used includes monthly water consumption data, temperature, precipitation, and urban population over a multi-year period. Data analysis was conducted using standard forecasting accuracy metrics, including Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and the coefficient of determination (R^2). The results indicate that artificial intelligence–based models demonstrate higher predictive accuracy compared with traditional forecasting methods. Among the examined models, the Artificial Neural Network exhibited superior performance in predicting urban water consumption patterns. Furthermore, the findings suggest that the use of intelligent forecasting systems can significantly contribute to improving water distribution planning, reducing resource losses, and increasing the efficiency of water resource management in water and wastewater utilities. Accordingly, integrating artificial intelligence tools with data management systems can serve as an effective approach for sustainable water resource management under conditions of climatic uncertainty and growing urban demand.

Keywords:

Artificial Intelligence, Water Demand Forecasting, Water Resources Management, Machine Learning, Water and Wastewater Utilities, Artificial Neural Networks, Water Resource Planning.