2024, Vol.11, No.3, Pages 131 to 142
Journal of Water and Sustainable Development

سال یازدهم، شماره ۳، ۱۴۰۳، صفحات ۱۳۱ تا ۱۴۲
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

# Application of Artificial Intelligence-Based Methods in Estimating Water Consumption Productivity (Case Study: Sari City)

**R. Fazloula[1*], Sh. Saraf[2], J. Vejahat[3], A. R. Emadi[1]**

1, 2- Associate Professor and M.Sc. Graduate in Water Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. 3- M.Sc. Graduate in Water Structures, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

*(Corresponding Author Email: r.fazloula@sanru.ac.ir)

Received: 15-05-2024 Revised: 18-08-2024
Accepted: 18-08-2024 Available Online: 19-12-2024

# کاربرد روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در برآورد بهره‌وری مصرف آب (مطالعه موردی: شهر ساری)

**رامین فضل‌اولی[۱*]، شادی صراف[۲]، جواد وجاهت[۳]، علیرضا عمادی[۱]**

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشیار و دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. ۳- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

*(رایانامه نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: r.fazloula@sanru.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹

## Abstract

Today, the optimal use of water in various sections to increase productivity and reduce losses is one of the basic assumptions in consumption management. Therefore, in the present research, the concept of productivity in different water consumption sections, including groundwater, drinking water, and special attention to chemical properties in the sewage treatment plant in Sari City has been investigated. In each section, using the appropriate algorithm, the available data has been evaluated to measure productivity. In the sewage treatment section, the analysis of effective parameters in Sari City sewage treatment was performed in two methods Artificial Neural Network and Wavelet. The output results of these models showed that due to the high value of the R2 statistic, there is an acceptable and direct relationship between the measured and estimated characteristics. In the groundwater sector, according to the results obtained, the wavelet network performed better in estimating the desired variables than the ANN method. In the water distribution network section, the results of wavelet analysis and the outputs of the WaterGems software revealed that the deterioration of the studied water distribution network plays a significant role in losses and reduced productivity, in such a way that about 47 percent of the water entering the network is out of reach and wasted in different ways.

**Keywords**: Sari, Wavelet Network, Sewage Treatment, Artificial Intelligence, ANN.

## چکیده

امروزه استفاده بهینه از آب در بخش‌های مختلف با هدف افزایش بهره‌وری و کاهش تلفات یکی از پیش‌فرض‌های اساسی در مدیریت مصرف می‌باشد. ازاینرو در پژوهش حاضر مفهوم بهره‌وری در بخش‌های مختلف مصرف آب شامل آب‌های زیرزمینی، آب شرب و توجه ویژه به خصوصیات شیمیایی در تصفیه‌خانه فاضلاب در محدوده شهر ساری بررسی شده است. در هر بخش، با استفاده از الگوریتم مناسب، داده‌های موجود به‌منظور سنجش بهره‌وری ارزیابی شده است. در بخش تصفیه فاضلاب تحلیل پارامترهای موثر در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ساری با دو روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و موجک انجام شد. نتایج خروجی این مدل‌ها نشان داد باتوجه‌به بالا بودن مقدار آماره $R^2$، رابطه قابل قبول و مستقیمی بین مشخصه‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده برقرار است. در بخش آب‌های زیرزمینی، مطابق با نتایج به‌دست آمده، شبکه موجک در برآورد متغیرهای مورد نظر نسبت به روش ANN عملکرد بهتری را نشان داد. در بخش شبکه توزیع آب نتایج تحلیل موجک و خروجی‌های نرم‌افزار WaterGems مشخص نمود که شد فرسوده بودن شبکه توزیع آب مورد مطالعه نقش بسزایی در تلفات و کاهش بهره‌وری آن دارد، به‌نحوی‌که حدود ۴۷ درصد آب ورودی به شبکه به طرق مختلف از دسترس خارج شده و تلف می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** ساری، شبکه موجک، تصفیه فاضلاب، هوش مصنوعی، ANN.



**How to cite this article:** Fazloula, R., Saraf, Sh., Vejahat, J., & Emadi, A. R. (2024). Application of Artificial Intelligence-Based Methods in Estimating Water Consumption Productivity (Case Study: Sari City). Journal of Water and Sustainable Development, 11(3), 131-142. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v11i3.2405-1331

## مقدمه

افزایش جمعیت در طی دو قرن اخیر ناشی از بهبود بسیاری از شاخص‌های زندگی شامل ارتقای بهداشت، توسعه شهرنشینی، مهاجرت، پیشرفت تکنولوژی، صنعتی‌سازی صنایع، افزایش تولید و ... بوده است. از سوی دیگر، عدم توجه به این نکته که منابع در دسترس بشر محدود می‌باشند، منجر گشته تا محدودیت‌ها و مشکلات بسیاری به وجود آید.

بهره‌وری مفهوم جدیدی نبوده و قدمت آن به پیدایش بشر بازمی‌گردد، در بیشتر کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه، محدودیت‌های متعدد به‌عنوان مانعی برای سرمایه‌گذاری‌های جدید محسوب شده بنابراین کلید واژه دستیابی به حداکثر میزان بهره‌مندی از منابع با صرف حداقل مقدار هزینه، بهره‌وری می‌باشد (محمودی و همکاران، ۱۴۰۰). اما مفهوم کاربردی آن مربوط به بعد از انقلاب صنعتی و در راستای پاسخ‌دهی به مشکلات به وجود آمده به‌صورت فراگیر و جامع در سطوح مختلف فرد، خانواده، سازمان‌ها و کشور ارائه شده است. در شاخص‌های بهره‌وری معمولا نسبت خروجی سیستم به ورودی آن سنجیده می‌شود، بنابراین وجود اطلاعات بیشتر در دقت و صحت نتایج به‌دست آمده اهمیت دارد. دستیابی به حداکثر میزان بهره‌وری هدف نهایی بهره‌مندی از هر محصولی می‌باشد (Liu و همکاران، ۲۰۱۷). در این بین منابع طبیعی به دلیل نقش بسزایی که در زندگی بشر دارند، جایگاه ویژه‌ای دارد. آب به‌عنوان یکی از عوامل اصلی توسعه پایدار و از دلایل پیشران اقتصاد مولد محسوب می‌شود. بهره‌وری یک عامل تولید مانند آب، بیانگر نسبت مشخصی نبوده به‌نحوی‌که مطابق با آن بتوان بیان داشت که چقدر ستانده به‌ازای واحد آن نهاد تولید شده است (محمودی و همکاران، ۱۴۰۰). شاخص بهره‌وری آب بیانگر استفاده موثر از آن در جهت تولید ارزش افزوده بیشتر می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، این شاخص نشان‌دهنده آن است که برای تولید هر واحد ارزش ستانده، چه مقدار آب مصرف شده است (صادقی و همکاران، ۱۴۰۱).

پژوهش حاضر به‌منظور بهره‌گیری از قابلیت‌های هوش مصنوعی به‌منظور تحلیل بهره‌مندی در حوزه صنعت آب به‌صورت مطالعه موردی می‌باشد. رویکرد اصلی حاکم در پژوهش توجه به بخش‌های مختلف مصرف آب در آب‌های زیرزمینی، آب شرب و توجه ویژه به رویکرد شیمیایی تصفیه‌خانه فاضلاب در محدوده شهر ساری می‌باشد. در این پژوهش، پس از دریافت داده‌ها از شرکت‌های آب منطقه‌ای و آب و فاضلاب استان مازندران در بازه زمانی ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۸، وضعیت بهره‌وری صنعت آب در بخش‌های آب‌های زیرزمینی، آب شرب و تصفیه‌خانه فاضلاب بررسی شد.

## مبانی و کلیات

بهره‌وری آب به طورکلی به‌صورت نسبت ستانده (محصول) به آب مصرف شده تعریف می‌شود که می‌تواند ارزش بازاری یا مقدار فیزیکی ستانده و مصرف و یا ترکیبی از این دو در این تعریف به کار رود (Legg, ۲۰۰۷). بنابراین:

بهره‌وری فیزیکی آب برابر بامقدار محصول تولید شده (kg) تقسیم بر آب مصرفی ($m^3$) وبهره‌وری اقتصادی: ارزش به ازای مقدار اخذ شده تقسیم بر ارزش به ازای آب مصرف شده (یا مقدار فیزیکی آب مصرف شده) برحسب شرایط و نوع بهره‌برداری از منابع آبی، ساختار بهره‌وری متناسب با همان حوضه تعریف شده شکل می‌گیرد. نکته قابل توجه این است که بخش‌های مختلف مصرف‌کننده شرایط متفاوتی در میزان مصرف، نوع مصرف، ثبت داده‌ها، شیوه اندازه‌گیری و ... داشته است و در نظر گرفتن تمامی موارد ذکر شده ضروری می‌باشد (Seyoum و Tanyimboh، ۲۰۱۷). عمده‌ترین مواردی که به‌منظور بررسی بهره‌وری آب مورد ارزیابی قرار می‌گیرند، شامل بخش شرب، تصفیه‌خانه فاضلاب و آب‌های زیرزمینی می‌باشند (محمودی و همکاران، ۱۴۰۰).

ارزیابی دقیق از رویکرد مد نظر در هر پژوهشی، مبتنی بر بررسی یافته‌ها در پژوهش‌های مشابه می‌باشد. به‌این‌ترتیب علاوه‌بر تسلط بر دیدگاه موجود، خلاهای بررسی نشده نیز شناسایی شده و امکان تعریف پژوهش‌های با کیفیت بهتر فراهم می‌شود.

وجاهت و صراف (۱۴۰۰) ضمن بررسی اثرات یکپارچه‌سازی هیدرولیکی و تعیین شاخص تاب‌آوری، بهره‌وری سامانه‌های شبکه توزیع آب را ارزیابی نمودند. در این پژوهش مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب از ۶ مخزن هم‌جوار با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS مدل‌سازی شد. مدل هیدرولیکی در ساعت حداکثر مصرف در حالت‌های اتصال مخازن به یکدیگر و در حالت عدم اتصال مخازن به یکدیگر اجرا و شرایط هیدرولیکی محدوده هر یک از مخازن به‌صورت نقشه فشار و در نمودارهای مربوط به آن ارائه شد. همچنین از قابلیت‌های نرم‌افزار WaterGEMS برای تعیین درصد میزان تأثیرگذاری مخازن در محدوده تحت پوشش آن‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد یکپارچه‌سازی هیدرولیکی محدوده مخازن هم‌جوار تأثیر مثبتی در بهبود تاب‌آوری و بهره‌وری شبکه توزیع دارد. همچنین به دلیل تدقیق الگوی مصرف، در حالت اتصال مخازن به یکدیگر، دقت مدل هیدرولیکی تهیه شده بیشتر می‌باشد. بررسی تأثیر به هم پیوستگی هیدرولیکی منجر به ارتقای واسنجی مدل هیدرولیکی شد. اعلمی و همکاران (۱۴۰۰) کارایی روش‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب در شهر تبریز را بررسی کردند. داده‌های ورودی شامل پارامترهای BODinf، CODinf، TSSinf و pHinf فاضلاب در ورودی تصفیه‌خانه تبریز بوده

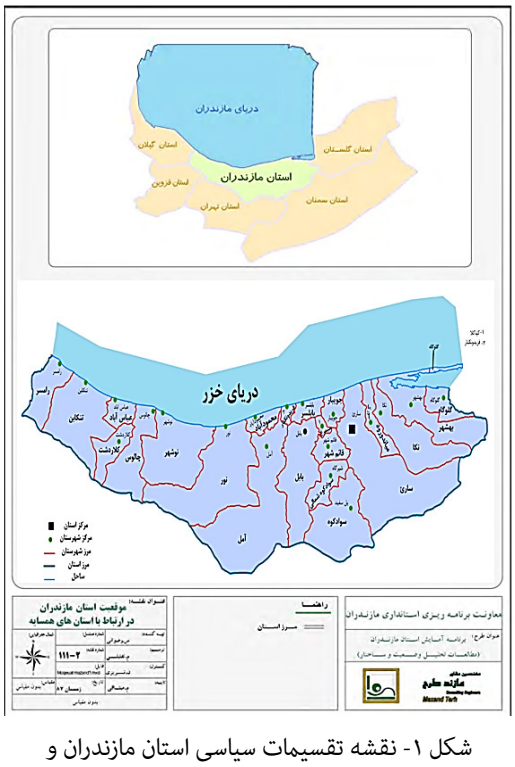
است که برای پیش‌بینی مقادیر متناظر مشخصه‌های BODeff، CODeff و TSSeff در پساب خروجی تصفیه‌خانه به کار برده شد. داده‌ها به‌صورت میانگین روزانه، هفتگی و ماهانه بررسی شدند. بر طبق نتایج، عملکرد داده‌های ماهانه در مدل‌سازی پارامترهای کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه تبریز وضعیت بهتری داشتند. امامی و چوپان (۱۳۹۹) با استفاده از روش‌های نوین هوش مصنوعی، کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت سلماس را بررسی کردند. در این پژوهش با به‌کارگیری دو مدل شبکه عصبی مصنوعی RBF و GFF، کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت سلماس پیش‌بینی و برآورد شد. جهت دستیابی به این هدف، از داده‌های کیفی آب زیرزمینی مربوط به دشت سلماس در دوره آماری ۱۰ ساله (۹۰-۱۳۸۱) استفاده شد و نتایج بر اساس استانداردهای ویلکاکس، شولر و پایپر بررسی شد. براساس نتایج، تمامی منابع آبی منطقه مورد مطالعه، به‌ترتیب برای کشاورزی، شرب و صنعت در حد مناسب، خوب و قابل قبول بوده است. (Alam و همکاران، ۲۰۲۲) آخرین یافته‌ها درخصوص کاربرد هوش مصنوعی در تصفیه آب برای بهینه‌سازی و اتوماسیون فرآیندهای جذب را بررسی نمودند. این بررسی تکنیک‌های مختلف هوش مصنوعی و کاربردهای آن در تصفیه آب را با تمرکز بر جذب آلاینده‌ها خلاصه می‌کند. مدل‌های متعدد هوش مصنوعی عملکرد جاذب‌های مختلف را برای حذف آلاینده‌های متعدد از آب با موفقیت پیش‌بینی کرده‌اند. این بررسی همچنین برخی از چالش‌ها و شکاف تحقیقاتی در مورد کاربردهای هوش مصنوعی در تصفیه آب را ارائه نموده و توصیه‌هایی برای اطمینان از کاربردهای موفق هوش مصنوعی در فناوری‌های مرتبط با آب در آینده ارائه شده است. (Taşan، ۲۰۲۳) کیفیت آب‌های زیرزمینی را با استفاده از ادغام شاخص کیفیت آب، روش‌های هوش مصنوعی و GIS در منطقه مدیترانه مرکزی در کشور ترکیه برآورد نمود. برای این منظور نمونه‌های آب زیرزمینی از ۳۷ ایستگاه نمونه‌برداری مختلف جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شد. از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) برای پیش‌بینی پارامترهای کیفیت آب آبیاری استفاده شد. نتایج نشان داد برآورد تمامی پارامترهای کیفی آب آبیاری، مدل ANN در مقایسه با مدل ANFIS عملکرد بسیار بالاتری داشته است و در نهایت نقشه‌های توزیع مکانی برای شاخص‌های کیفیت آب آبیاری اندازه‌گیری شده و خروجی مدل ANN با استفاده از روش درون‌یابی IDW تولید شد. Rizal و Hayder (۲۰۲۳) پیش‌بینی تقاضای اکسیژن بیوشیمیایی پساب در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با استفاده از یادگیری ماشین و رابط کاربر پسند را ارائه دادند. در این مطالعه، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی تقاضای اکسیژن بیوشیمیایی (BODeff) با استفاده از چندین متغیر پساب توسعه داده شد. بر اساس نتایج، مدل ANN با دستیابی به مقدار MSE و RMSE<۰/۲در حالی که R و $R^2$ نزدیک به مقدار واحد می‌باشد، از مدل SVM بهتر عمل کرده است.

## مواد و روش‌ها

### • منطقه مورد مطالعه

استان مازندران در محدوده جغرافیایی بین ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. این استان مساحتی بالغ بر ۲۳۸ هزار کیلومترمربع دارد حدود ۱/۴۶ درصد از مساحت کل کشور را شامل می‌شود. در شکل (۱) نقشه استان مازندران و موقعیت شهرستان ساری در آن مشخص شده است.

ساری از لحاظ وسعت بزرگ‌ترین شهرستان استان مازندران محسوب می‌شود. این شهرستان با استان سمنان، شهرستان‌های نکا، جویبار، قائمشهر و سوادکوه همسایه می‌باشد. شهر ساری به عنوان مرکز استان، دارای نقش سیاسی، اداری و خدماتی می‌باشد. نقش شهر ساری در طرح کالبدی گیلان و مازندران به‌عنوان عملکرد اصلی صنعتی سطح یک، خدمات کشاورزی سطح یک و تجاری منطقه‌ای و در طرح کالبدی ملی از نظر سطح‌بندی به عنوان پایتخت منطقه‌ای سطح یک معرفی شده است.




شکل ۱- نقشه تقسیمات سیاسی استان مازندران و شهرستان ساری (صادقی و همکاران، ۱۴۰۱)

**• مبانی نظری**

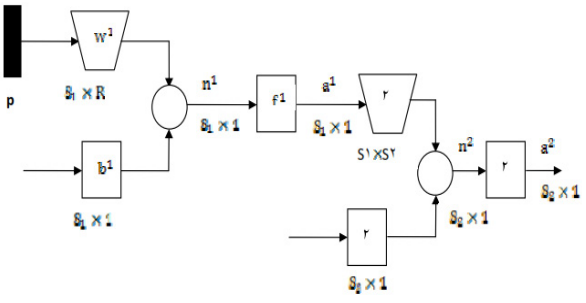
**- شبکه‌های عصبی مصنوعی**

شبکه‌های عصبی مصنوعی سیستم‌های دینامیکی هوشمند مدل آزاد مبتنی بر داده‌های تجربی هستند که نیاز به برقراری هیچ پذیره‌ای ندارند و با پردازش بر روی‌داده‌های تجربی گردآوری شده، دانش یا قانون نهفته در ارزیابی داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند.

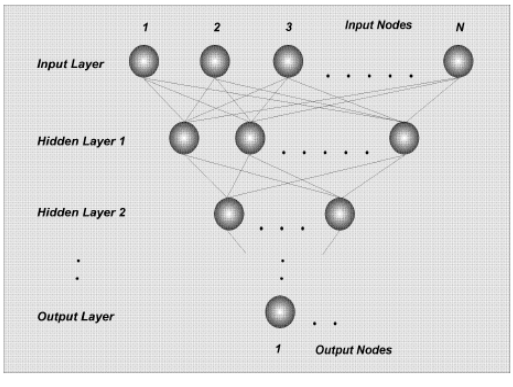
به‌منظور تحلیل میزان بهره‌وری مصرف آب در هر یک از بخش‌های مورد نظر، از قابلیت‌های الگوریتم‌های هوش مصنوعی شامل روش‌های پرسترون چند لایه و روش تئوری موجک در محیط نرم‌افزار متلب استفاده شد. علاوه‌براین، به‌منظور بررسی بیشتر به‌صورت موردی از سایر نرم‌افزارها و همچنین رویکردها در ارزیابی‌های ارائه شده بهره برده شد. ساختار عصب مصنوعی از ترکیب نرون‌ها به‌وجود آمده است. هر نرون کوچک‌ترین واحد پردازشگر اطلاعات است که اساس عملکرد شبکه‌های عصبی را تشکیل می‌دهد. شبکه‌های عصبی معمولا ساختار تک‌لایه و چندلایه دارند. در این پژوهش از ساختار چند لایه استفاده شده که مورد بررسی اجمالی قرار می‌گیرد.

یک شبکه عصبی شامل اجزای سازنده لایه‌ها و وزن‌ها می‌باشد. رفتار شبکه نیز به ارتباط بین اعضا وابسته است. در حالت کلی، در شبکه‌های عصبی سه نوع لایه نرونی وجود دارد: لایه ورودی: لایه ورودی شبکه عصبی وظیفه توزیع مقادیر داده‌های ورودی به اولین لایه مخفی را بر عهده دارند. تعداد گره‌های لایه ورودی برابر با تعداد مقادیر داده‌های ورودی به مدل می‌باشد. لایه‌های پردازش‌گر مخفی: عملکرد این لایه‌ها به وسیله ورودی‌ها و وزن ارتباط بین آن‌ها و لایه‌های پنهان تعیین می‌کنند که چه وقت یک واحد پنهان باید فعال شود. انتخاب تعداد لایه‌های مخفی و تعداد گره‌های مخفی در هر لایه مساله ناچیزی نیست. ساختار پردازش مخفی شبکه عصبی اختیاری می‌باشد، اما عوامل زیادی در انتخاب ساختار نقش دارند که شامل کمیت نمونه‌های آموزش، تعداد گره‌های ورودی و خروجی و روابط بین داده‌های ورودی و خروجی می‌باشند. لایه خروجی: لایه‌ای که خروجی آن، خروجی نهایی شبکه باشد، به لایه خروجی موسوم است. عملکرد واحد خروجی بسته به فعالیت واحد پنهان و وزن ارتباط بین واحد پنهان و خروجی می‌باشد. در شکل (۲) شمایی از شبکه موجکی که شامل یک لایه میانی می‌باشد، مشخص شده است. در شکل (۳) نیز شبکه عصبی مصنوعی و لایه‌های ورودی، میانی و خروجی نشان داده شده است.

لازم به ذکر است، شبکه‌های عصبی چند لایه نسبت به شبکه‌های عصبی تک لایه توانایی بیشتری دارند، لذا در این تحقیق ا شبکه عصبی چند لایه استفاده شد.




شکل ۲- شبکه پیش‌خور دولایه (kisi و cimen، ۲۰۱۲)




شکل ۳- طراحی توپولوژی شبکه‌های عصبی مصنوعی (kisi و cimen، ۲۰۱۲)

**- شبکه موجک**

موجک‌ها توابع خاص ریاضی با خواصی منحصربه‌فرد هستند که امکان پردازش و آنالیز داده‌ها را با گستردگی فراوان در سطوح مختلف دقت در زمان واحد فراهم می‌سازند. یک موجک، موجی است که بقا زمانی محدود و متوسط صفر دارد. موجک‌ها قابلیت جداسازی و تجزیه یک سیگنال به بسته‌های مختلف فرکانسی در بعد زمان را دارند.

موجک به‌معنی موج کوچک است و سه مشخصه تعداد نوسان محدود، بازگشت سریع به صفر در هر دو جهت مثبت و منفی در دامنه خود و میانگین صفر دارند. این سه ویژگی شرط لازم برای این است که تابعی بتواند به‌عنوان تبدیل موجک عمل کند که شرط مقبولیت نامیده شده و به‌صورت زیر بیان می‌شود (kisi و cimen، ۲۰۱۲):

$$\int \psi(t)\,dt = 0 \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، $\psi(t)$ تابع موجکی می‌باشد.

به‌منظور تحلیل و تعیین میزان بهره‌وری مصرف آب در هر یک از بخش‌های مورد نظر، از قابلیت‌های الگوریتم‌های هوش مصنوعی شامل روش‌های پرسپترون چندلایه و روش شبکه موجک در محیط نرم‌افزار متلب بهره گرفته شد. داده‌های مورد نظر از شرکت‌های آب منطقه‌ای و آب و فاضلاب استان مازندران در دوره آماری موجود (۱۳۹۸-۱۳۷۵) دریافت شده و پس از اعمال اصلاحات آماری، استفاده شد.

## نتایج و یافته‌ها

**• شبکه آبرسانی**

به‌منظور ارزیابی شرایط حاکم بر شبکه آب شرب، بخشی از خروجی تصفیه‌خانه آب شهر ساری (واقع در منطقه هولار–روستای سلیم بهرام) در نظر گرفته شده است. انتقال سالیانه ۳۳ میلیون مترمکعب (متوسط ۱ مترمکعب در ثانیه) آب از سد شهید رجایی به تصفیه‌خانه آب شهر ساری (واقع در منطقه هولار-روستای سلیم بهرام) و ساخت تصفیه‌خانه به ظرفیت مفید ۱/۵ مترمکعب در ثانیه برای تامین آب شهروندان شهر ساری تا سال افق طرح (۱۴۰۵) از اهداف این خط انتقال می‌باشد. شبکه فاضلاب شهر ساری و داده‌های مربوط به ورودی و خروجی آن به‌منظور ارزیابی تصفیه‌خانه فاضلاب بررسی شد. همچنین ارزیابی خصوصیات کمی و کیفی آب زیرزمینی نیز در محدوده دشت ساری – دشت‌ناز و با استفاده از داده‌های تحلیل شده برای این محدوده صورت گرفت.

بررسی مقادیر فشار و سرعت در نقاط مختلف شبکه باتوجه‌به موقعیت قرارگیری مخازن، ظرفیت، رقوم ارتفاعی، موقعیت شیرهای قطع و وصل، شیرهای فشاری و ... صورت گرفته و ارزیابی‌ها حاکی‌ازآن است که عامل توپوگرافی، موقعیت مناسب قرارگیری شیرهای مختلف (ازجمله شیرهای هوادهی) نقش مهمی در توزیع مناسب فشار در شبکه و همچنین یکنواختی آن خواهد داشت. به‌طورکلی همواره در یک شبکه آبرسانی به دلایل مختلف ازجمله کاربرد تاسیسات و وجود اتصالات (زانویی‌ها و ...)، پدیده ضربه قوچ اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. نکته قابل توجه این است که مقادیر تغییرات سرعت به‌گونه‌ای کنترل شود که مقدار آن به حدی بحرانی نرسیده و فشار منفی که منجر به تشکیل حباب می‌شود، رخ ندهد.بررسی گره‌های حاصل از تحلیل پارامترهای هیدرولیکی در نرم‌افزار WaterGems حاکی از آن است که گستره فشار باتوجه‌به اثرگذاری رقوم توپوگرافی و همچنین عملکرد شیرهای کنترلی شامل شیرهای فشارشکن، زون‌بندی، شیرهای هواگیری و جلوگیری از بروز خلا متغیر بوده و بیشترین فشارها در محل خروجی جریان از مخازن یا محدوده‌های با رقوم بالا رخ می‌دهد.

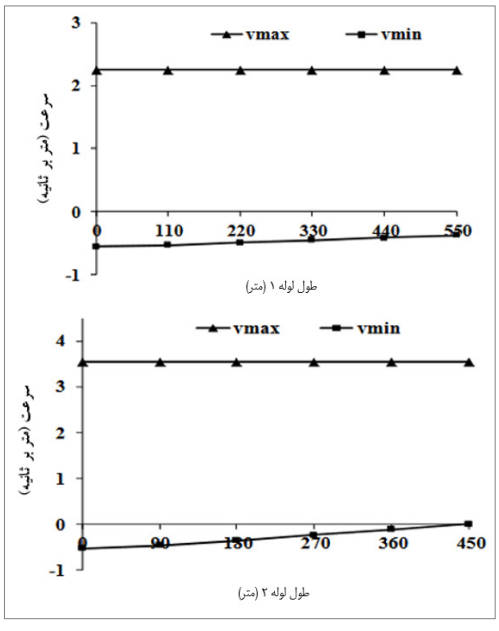
باتوجه‌به اینکه امکان تحلیل و بررسی فشار در مجاورت تمام تجهیزات و شیرآلات نصب شده خارج از هدف انجام این پژوهش است، بنابراین در این پژوهش خصوصیات عملکرد فشاری و تغییرات خصوصیات بار آبی مبتنی بر زمان که مولفه اصلی و موثر در بررسی پدیده ضربه قوچ می‌باشد ارزیابی شد. این امر با رویکرد بررسی بهره‌وری شبکه در انتقال آب صورت خواهد پذیرفت.

مدل‌سازی فرآیند ضربه قوچ با باز و بسته شدن شیرهای مورد بررسی اعمال شد. به‌این منظور در شبکه مورد مطالعه در بخشی از خط انتقال جریان آب که دارای طول مناسب جهت شکل‌گیری جریان کامل بوده و در فواصل حدودا ۵۰۰ متری شیرهای قطع و وصل بر روی آن‌ها تعبیه شده بود انتخاب و تحلیل‌ها در این ناحیه اعمال شد. به‌این‌ترتیب حداکثر فشار در محل شیر رخ داده و مقدار آن ۱۶۸ متر و حداقل فشار نیز در محل شیر رخ داده و مقدار آن تقریبا برابر با صفر می‌باشد (شکل ۵). در شکل (۴) پوش سرعت بیشینه و کمینه در طول دو لوله دارای شرایط بحرانی بر حسب تغییرات سرعت در طول لوله، شکل (۵) تغییرات فشار-زمان در محل شیر اول و شکل (۶) پوش فشار در لوله‌ها در محل شیر اول را مشخص می‌نماید.

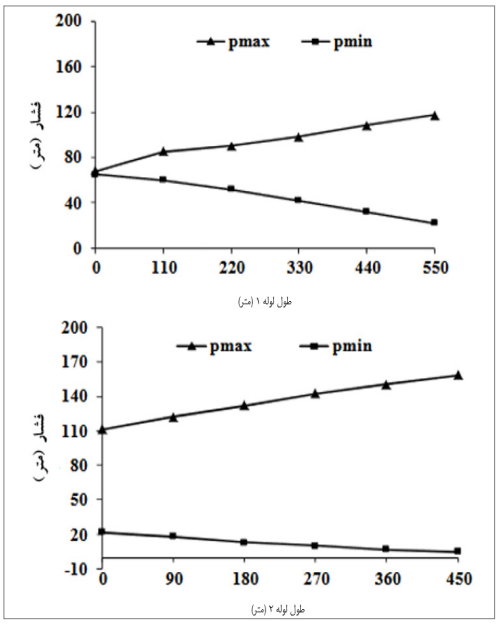
در شکل (۶)، حداکثر فشار قبل از بسته شدن کامل شیر اول رخ داده و پس از بسته شدن شیر، تغییرات فشار رفتار نوسانی داشته و دامنه آن به طور نامحسوسی با گذر زمان کاهش می‌یابد. در عمل، محل شیرها به‌طور طبیعی زمینه مساعدی برای وقوع انواع حالات رخداد ضربه قوچ می‌باشد. بررسی دوم مربوط به ارزیابی خصوصیات مشابه در محل شیر دوم با فشار ۱۶۰ متر صورت پذیرفت. نمودارهای آن‌ها حاصل از تحلیل‌ها در شکل‌های (۷ و ۸) مشخص شده است.

حداکثر مقدار فشار در شیر سوم ۱۵۲ متر بوده و ارزیابی پارامترهای مربوط به آن منجر به ایجاد نمودارهای حاصل در شکل‌های (۹ و ۱۰) شد. در شکل (۹) مشاهده می‌شودست به دلیل ایجاد تغییر سرعت ناشی از بستن شیر سوم، پدیده ضربه قوچ در محل لوله دوم به‌صورت مقطعی رخ داده و وقوع فشار منفی که مشخصه اصلی آن می‌باشد، ناشی از این امر می‌باشد. مقایسه پارامترهای مربوط در شیرهای دوم و سوم حاکی از آن است که حداکثر فشار در محل هر یک به ترتیب برابر با ۱۶۰ و ۱۵۲ متر بوده و باتوجه‌به کاهش تقریبی مقدار فشار نسبت به شیر اول، از دامنه نوسانی تغییرات نمودار فشار زمان نیز کاسته خواهد شد.

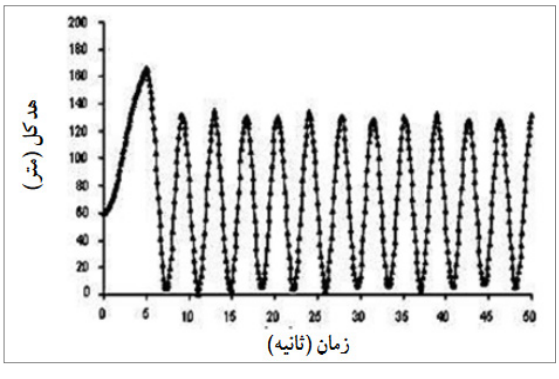
خروجی‌های حاصل از تحلیل فشار در شبکه آبرسانی شهر ساری با استفاده از نرم‌افزار WaterGems به‌عنوان ورودی‌های کد نوشته شده مورد استفاده قرار گرفت. علاوه‌بر تحلیل و ارزیابی کلی شبکه از نظر تغییرات فشار و دامنه مقادیر مشخص ، عمده تمرکز بر بررسی خصوصیت جریان در محل شیرها به دلیل محتمل‌ترین محل بروز پدیده ضربه قوچ می‌باشد. به همین منظور، مطابق با فرآیند تحلیل با استفاده از نرم‌افزار WaterGems، روند پژوهش مبتنی بر این امر در محل شیر اول که شرایط بحرانی دارد نیز تحلیل شد. نکته قابل توجه در این مورد این است که با استفاده از روش هوش مصنوعی، مقدار قطر بهینه و ضخامت مناسب لوله متناسب با خصوصیات حداقل و حداکثری فشار نیز لحاظ می‌شود تا به‌این‌ترتیب امکان اطمینان از بروز نتایج مخرب ضربه قوچ به حداقل مقدار ممکن کاهش یابد. در شکل (۱۱) نمودار پوش فشار در لوله‌ها و همچنین در شکل (۱۲) تغییرات نمودار فشار-زمان در محل شیر نمایش داده شده است.



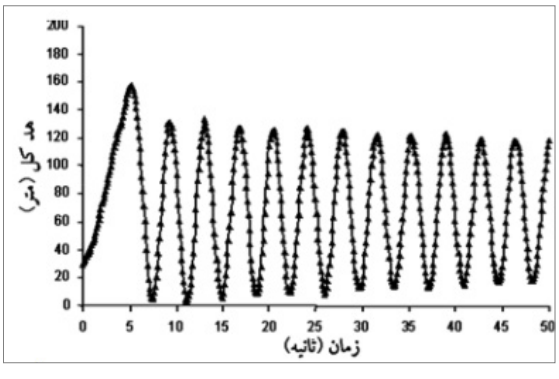

شکل ۴- نمودار پوش سرعت در لوله‌ها در محل شیر اول



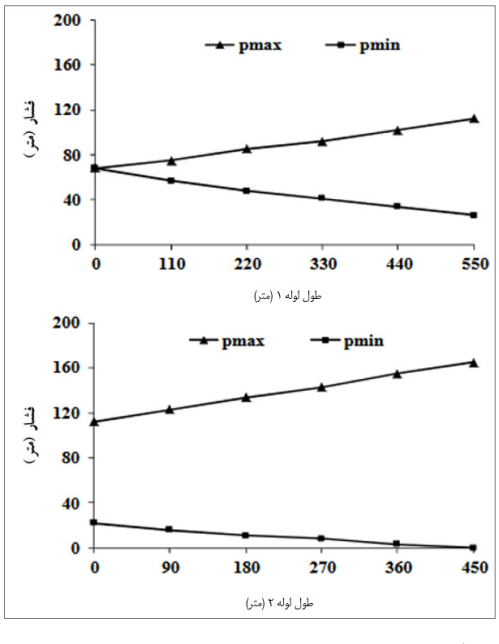

شکل ۷- نمودار پوش فشار در لوله‌ها در محل شیر دوم



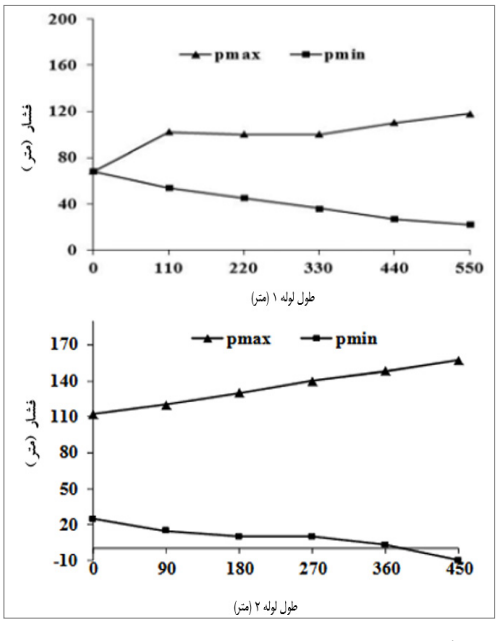

شکل ۵- نمودار تغییرات فشار-زمان در محل شیر اول



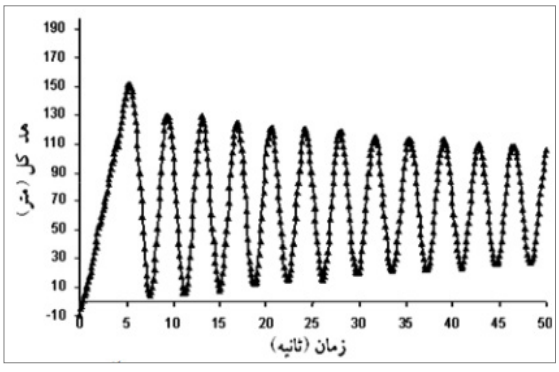

شکل ۸- نمودار تغییرات فشار-زمان در محل شیر دوم



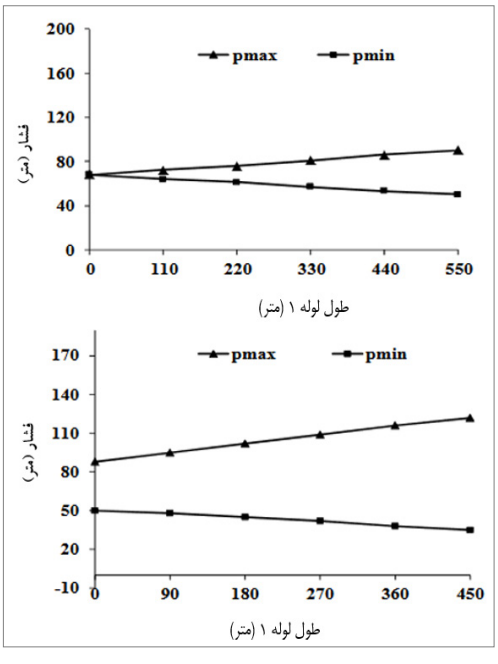

شکل ۶- نمودار پوش فشار در لوله‌ها در محل شیر اول



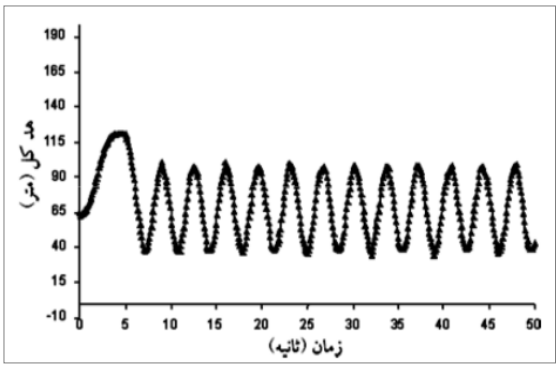

شکل ۹- نمودار پوش فشار لوله‌ها در محل شیر سوم




شکل ۱۰- نمودار تغییرات فشار-زمان در محل شیر سوم




شکل ۱۱- نمودار پوش فشار در لوله‌ها
مطابق با الگوریتم هوش مصنوعی



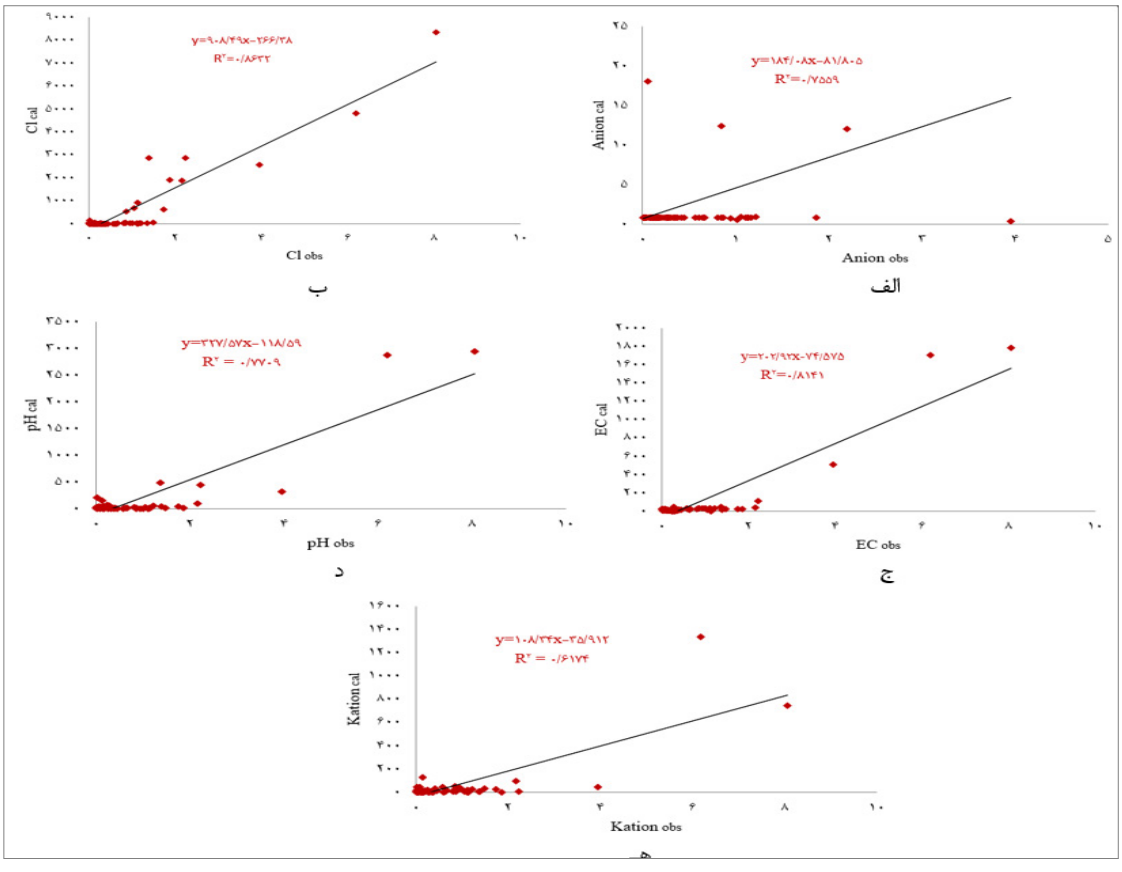

شکل ۱۲- نمودار تغییرات فشار-زمان منطبق
با نتایج الگوریتم هوش مصنوعی

**• آب‌های زیرزمینی**

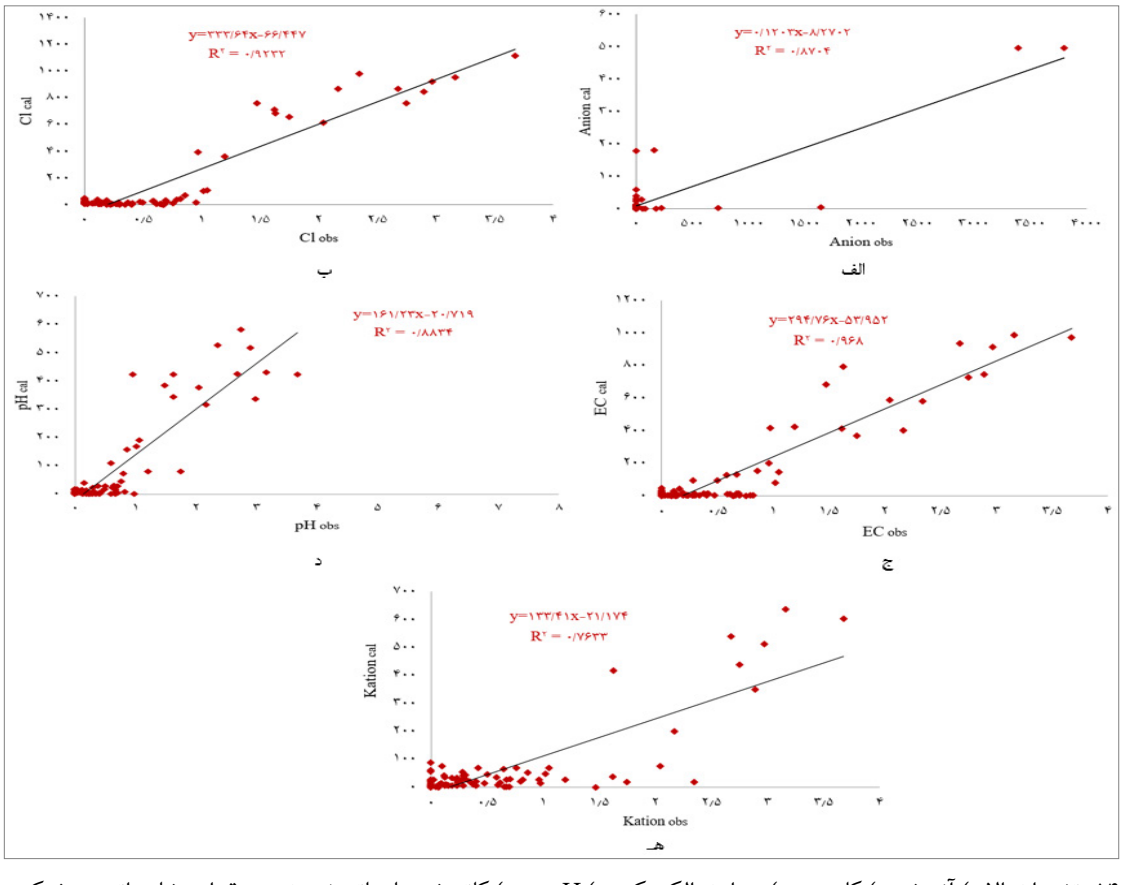
روش‌های مبتنی بر زمین آمار و شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین شرایط کیفی و تعیین میزان بهره‌وری از آبخوان نقش ارزشمندی خواهند داشت. برخی از پارامترهایی که در منطقه بر کیفیت آب آبخوان تاثیرگذار هستند در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است که در ادامه نتایج حاصل از تحلیل تعدادی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در آب‌های زیرزمینی شامل آنیون، کاتیون، کلسیم، هدایت الکتریکی و pH با استفاده از دو شبکه عصبی و موجک در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است. همچنین نتایج تحلیل آماری یافته‌ها در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است.

**• تصفیه‌خانه فاضلاب**

ازجمله پارامترهای معمولی که برای ارزیابی عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مورد توجه قرار می‌گیرد؛ میزان اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (BOD)، میزان اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، فسفر، مجموع مواد جامد معلق (TSS) و $NH_4$ پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها است. ازاین‌رو، در پژوهش حاضر باتوجه‌به موقعیت محدوده مورد مطالعه، پارامترهایی از جمله فسفر، COD، $NH_4$، $BOD_5$ و TSS که بیشترین تاثیر در عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ساری دارند، در شبکه عصبی و موجک در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) بررسی شدند. همچنین در جدول‌های (۳) و (۴) تحلیل آماری یافته‌ها ارائه شده‌است. در تحلیل‌های صورت گرفته، برحسب بهترین نتیجه به دست آمده نوع توابع تغییر داده شده است.




شکل ۱۳- تغییرات الف) آنیون، ب) کلسیم، ج) هدایت الکتریکی، د) pH و هـ) کاتیون محاسباتی نسبت به مقدار مشاهداتی در شبکه عصبی مصنوعی



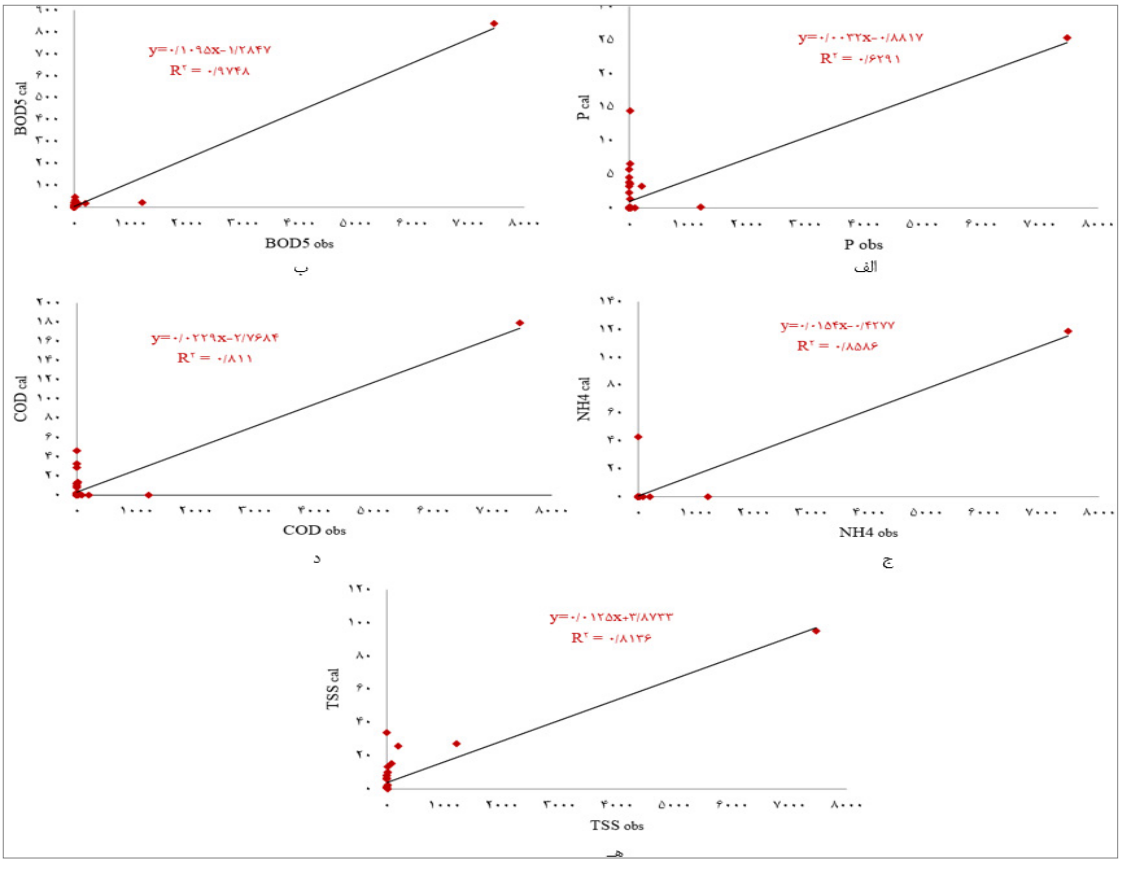

شکل ۱۴- تغییرات الف) آنیون، ب) کلسیم، ج) هدایت الکتریکی، د) pH و هـ) کاتیون محاسباتی نسبت به مقدار مشاهداتی در شبکه موجک

جدول ۱- نتایج تحلیل آماری مربوط به شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی براساس شبکه عصبی مصنوعی

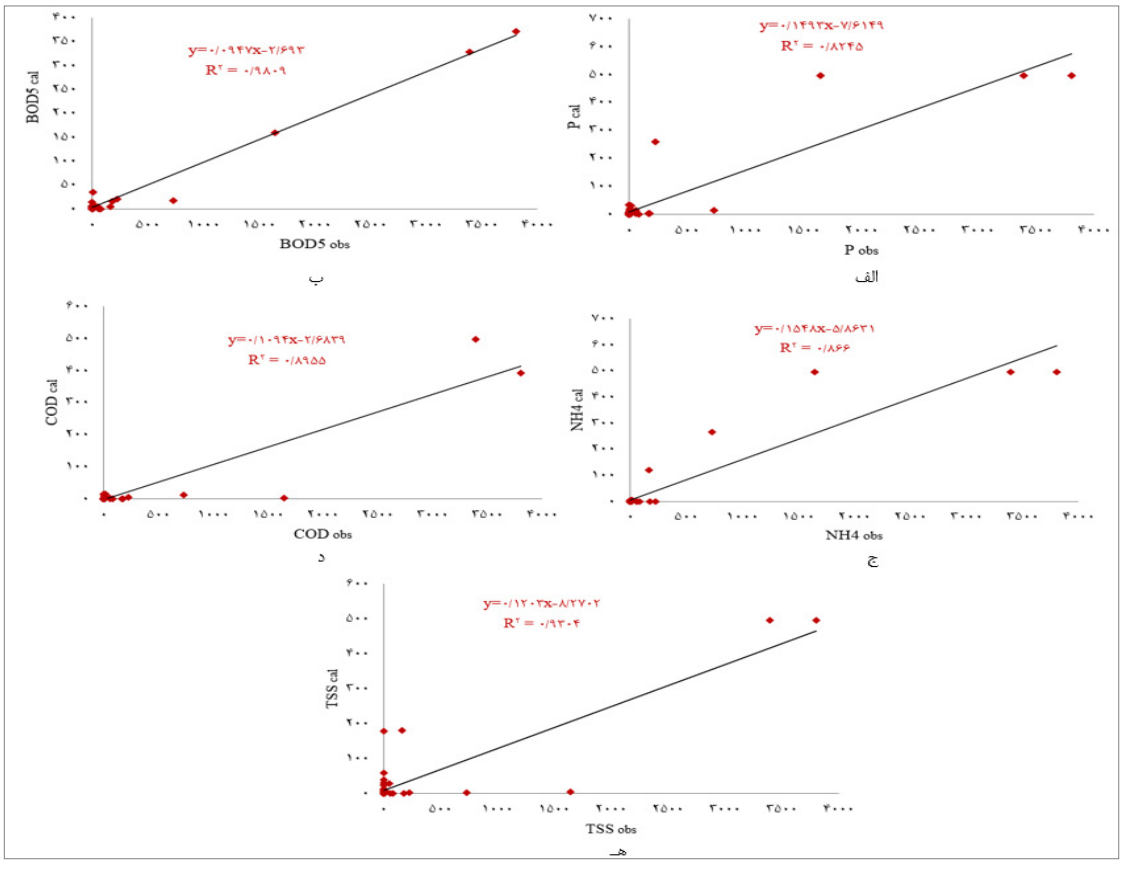
| ردیف | متغیر ورودی | نام مدل | تعداد نورون‌ها | تابع انتقالی مخفی/لایه خروجی | $R^2$ (%) | RMSE | MAE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | آنیون (mg/l) | ANN | ۱۵ | Logsig logsig | ۷۵ | ۵/۷ | ۶۲/۸ |
| ۲ | کلسیم (mg/l) | ANN | ۲۰ | Logsig logsig | ۸۶ | ۵/۶ | ۱/۹ |
| ۳ | هدایت الکتریکی (µs/cm) | ANN | ۱۶ | Logsig logsig | ۸۱ | ۱/۳ | ۳/۶ |
| ۴ | pH | ANN | ۱۸ | Tansig logsig | ۷۷ | ۴/۲ | ۱/۸ |
| ۵ | کاتیون (mg/l) | ANN | ۱۱ | Tansig logsig | ۶۱ | ۵/۳ | ۱/۴ |

جدول ۲- نتایج تحلیل آماری مربوط به شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی براساس شبکه موجک

| ردیف | متغیر ورودی | نام مدل | تعداد نورون‌ها | تابع انتقالی مخفی/لایه خروجی | $R^2$ (%) | RMSE | MAE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | آنیون (mg/l) | ANN | ۱۵ | Tansig logsig | ۸۷ | ۶/۵ | ۹۴/۸ |
| ۲ | کلسیم (mg/l) | ANN | ۲۰ | Tansig logsig | ۹۲ | ۵/۶ | ۳/۲ |
| ۳ | هدایت الکتریکی (µs/cm) | ANN | ۱۶ | Tansig logsig | ۹۶ | ۳/۹ | ۲ |
| ۴ | pH | ANN | ۱۸ | Tansig logsig | ۸۸ | ۳/۶ | ۱/۹ |
| ۵ | کاتیون (mg/l) | ANN | ۱۱ | Tansig logsig | ۷۶ | ۴/۳ | ۲/۲ |




شکل ۱۵- تغییرات الف) فسفر، ب) $BOD_5$، ج) $NH_4$، د) COD و هـ) TSS نسبت به مقدار مشاهداتی در شبکه عصبی




شکل ۱۶- تغییرات الف) فسفر، ب) $BOD_5$، ج) $NH_4$، د) COD و هـ) TSS نسبت به مقدار مشاهداتی در شبکه موجک

جدول ۳- نتایج تحلیل آماری شبیه‌سازی شرایط تصفیه‌خانه فاضلاب براساس شبکه عصبی مصنوعی

| ردیف | متغیر ورودی | نام مدل | تعداد نورون‌ها | تابع انتقالی مخفی/لایه خروجی | $R^2$ (%) | RMSE | MAE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | فسفر | ANN | ۱۵ | Tansig logsig | ۸۲ | ۳۸/۹ | ۱۰۹/۷ |
| ۲ | $BOD_5$ | ANN | ۲۰ | Tansig logsig | ۹۸ | ۱۵/۳ | ۱۲/۵ |
| ۳ | $NH_4$ | ANN | ۱۶ | Tansig logsig | ۸۶ | ۱۳ | ۱۷/۷ |
| ۴ | COD | ANN | ۱۸ | Tansig logsig | ۸۹ | ۱۵/۴ | ۱۳/۶ |
| ۵ | TSS | ANN | ۱۱ | Tansig logsig | ۹۳ | ۱۸/۲ | ۱۵/۱ |

جدول ۴- نتایج تحلیل آماری شبیه‌سازی شرایط تصفیه‌خانه فاضلاب براساس شبکه موجک

| ردیف | متغیر ورودی | نام مدل | تعداد نورون‌ها | تابع انتقالی مخفی/لایه خروجی | $R^2$ (%) | RMSE | MAE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | فسفر | ANN | ۱۵ | Logsig logsig | ۶۲ | ۲۰/۱ | ۵۲/۸ |
| ۲ | $BOD_5$ | ANN | ۲۰ | Logsig logsig | ۹۷ | ۱۲/۵ | ۱۰ |
| ۳ | $NH_4$ | ANN | ۱۶ | Logsig logsig | ۸۵ | ۹/۸ | ۱۳/۴ |
| ۴ | COD | ANN | ۱۸ | Tansig logsig | ۸۱ | ۱۴/۷ | ۱۱/۴ |
| ۵ | TSS | ANN | ۱۱ | Tansig logsig | ۸۱ | ۱۵ | ۱۳/۶ |

## جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

کاربرد هوش مصنوعی در صنعت آب به ویژه پارامترهای مورد نظر در این پژوهش که شامل شبکه توزیع آب، تصفیه فاضلاب و آب‌های زیرزمینی می‌باشد، بیش از چیزی است که اغلب افراد تصور می‌کنند. با ورود هوش مصنوعی به این صنعت نه تنها مدیریت آب تا حد زیادی بهبود پیدا می‌کند، بلکه راهکاری برای بالا بردن راندمان و بهره‌وری نیز به شمار می‌رود.

**- شبکه توزیع آب**

هدف اصلی از انجام این پژوهش ارائه و مقایسه روش‌های تحلیل حاصل از کاربرد نرم‌افزار WaterGems و نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم‌های مبتنی بر شبکه عصبی و موجک در قالب نرم‌افزار متلب بوده است. مزیت عمده کاربرد روش هوش مصنوعی این است که قطر و ضخامت بهینه در لوله‌ها اعمال شده تا پدیده ضربه قوچ رخ ندهد. علاوه‌براین، نتایج حاصل از به‌کارگیری روش شبکه عصبی مشخص نمود که دامنه نوسانات وقوع ضربه قوچ به دلیل کنترل مستمر و سریع آن باتوجه‌به بهینه شدن ابعاد فیزیکی عوامل موثر، کاهش چشمگیری می‌یابد. عمده تمرکز این بخش از پژوهش بر ارزیابی ضربه قوچ در محل وجود برخی از اتصالات که در معرض فشار جریان می‌باشد صورت گرفته، فشار زیاد ، به‌نحوی‌که در حالت بسته بودن منجر به ایجاد بار آبی زیادی شده و امکان وقوع ضربه قوچ را افزایش می‌دهند. علاوه‌براین نتایج تحلیل پارامترهای هیدرولیکی نشان داد باوجود زیاد بودن فشار در برخی مقاطع (بیش از ۱۰ بار)، به دلیل اثرگذاری رقوم ارتفاعی، تاثیر مثبت در وقوع ضربه قوچ برای شبکه چندان مشکل‌ساز نبوده و امکان کنترل آن با استفاده از تجهیزاتی مانند شیر فشارشکن، استفاده از قطر بالاتر و ... وجود خواهد داشت. به‌طورکلی، عدم توجه به مسائل عملیاتی، منجر به تاثیر قابل توجه فشار در میزان هدررفت منابع آب در شبکه‌های توزیع آب خواهد شد. در این پژوهش مشخص شد که فرسوده بودن شبکه توزیع آب مورد مطالعه نقش بسزایی در تلفات شامل آب‌دزدی، هدررفت) و کاهش بهره‌وری آن دارد، به نحوی که حدود ۴۷ درصد آب ورودی به شبکه به طرق مختلف از دسترس خارج شده و به مصرف مورد نظر نمی‌رسد.

**- آب‌های زیرزمینی**

باتوجه‌به اینکه پیش‌بینی و تعیین کیفیت آب زیرزمینی در برنامه‌ریزی و مدیریت آب‌زیرزمینی نقش بسزائی دارد، در این پژوهش سعی شد از مدل‌های شبکه عصبی با توابع مختلف برای مدل‌سازی متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی استفاده شود، در این پژوهش، شبیه‌سازی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی شامل آنیون، کلسیم، کاتیون، pH و هدایت الکتریکی با استفاده روش شبکه عصبی ANN و موجک صورت گرفت. مطابق با نتایج به‌دست آمده، شبکه موجک در برآورد متغیرهای مورد نظر نسبت به روش ANN عملکرد بهتری دارد. به‌طورکلی، مبنای روش شبکه موجک مبتنی بر تحلیل بهتر در کاربرد قواعد در ساختار شبکه‌های مشابه می‌باشند، لذا عملکرد بهتری دارند. همچنین نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد مدل‌های استفاده شده توانسته‌اند با کارایی بالایی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی را در محدوده مورد نظر تعیین نمایند.

**- خش تصفیه فاضلاب**

در خصوص پژوهش حاضر، تحلیل پارامترهای موثر در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ساری با دو روش شبکه عصبی و موجک تحلیل و ارزیابی شد. نتایج اجرای این مدل‌ها نشان داد باتوجه‌به بالا بودن مقدار آماره $R^2$، رابطه قابل قبولی بین مشخصه‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده برقرار است. عوامل کیفی برآوردی از مدل در اکثر موارد همخوانی مناسبی با مقادیر مشاهداتی داشته است. این نتایج بیان کننده برتری مدل موجک در این پژوهش می‌باشد. یکی از نکات حائز اهمیت، بالا بودن میزان فسفر در فاضلاب ورودی میباشد، زیرا به‌طورکلی در شهرهای ساحلی به دلیل شرایط خاص حاکم، میزان مصرف ماهی قابل توجه بوده و لذا ضرورت دارد تا در فرآیند تصفیه فاضلاب، حذف میزان مضر این عنصر مورد توجه قرار گیرد. اجرای هر چه بهتر مدل به تعداد مناسب مشخصه‌های ورودی نیز بستگی دارد، توجه به پارامترهای مهم در کاربرد روش‌های مورد نظر در به‌کارگیری یک شبکه عصبی با پنج مولفه ورودی TSS، COD، BOD ، فسفر و نیترات در تصفیه‌خانه فاضلاب، خروجی‌های به‌دست آمده در جداول ارائه شد. از طرفی در بیشتر نمودارهای به‌دست آمده دامنه شیب خطوط برازش یافته در شکل‌ها بین ۰/۹ تا ۱ است که بیانگر عملکرد مناسب شبکه عصبی در شبیه‌سازی است. علت عملکرد مناسب مدل را می‌توان به هوشمند بودن فرآیند تحلیل داده‌ها و اندازه‌گیری‌های مناسب و انتخاب مشخصه‌های مؤثر در فاضلاب نسبت داد. به‌طوری‌که مدل طی فرآیند آموزش با ایجاد روابطی منطقی میان نگاشت‌های ورودی و خروجی از آن برای محاسبه داده‌هایی که در امر آموزش شبکه به کار نرفته‌اند استفاده می‌کند. در نهایت شبکه هوش مصنوعی در این مطالعه توانست با آرایش ۱۰-۱۲-۱ (۱۰ ورودی، ۱۲ نورون و ۱ خروجی) هر ۳ پارامتر هدف را به طور جداگانه با موفقیت برآورد نماید. باتوجه‌به نتایج حاصل از این مطالعه از آنجا که راندمان حذف TSS در تصفیه‌خانه در حد مطلوبی است و راندمان حذف BOD و COD پساب خروجی با استاندارد دفع پساب فاصله کمی

دارد، می‌توان با اندیشیدن تدابیری مانند بهره‌برداری بهتر و راه‌اندازی هواده‌های معیوب، استاندارد دفع پساب تصفیه‌خانه را به استاندارد دفع پساب جهت آب‌های سطحی رساند و به‌این طریق انعطاف‌پذیری عملکرد تصفیه‌خانه و ایمنی کیفی تصفیه‌خانه را بالا برد. این مسئله وقتی نمود بهتری پیدا می‌کند که در نظر داشته باشیم دفع پساب جهت مصارف کشاورزی در مقاطع خاصی از سال امکان‌پذیر است. کاهش آلاینده‌های BOD ،COD ،TSS می‌تواند به واسطه دما، pH و فعالیت‌های شیمیایی و بیولوژیکی محیط باشد. مشخصه دما از طریق تأثیرگذاری بر عوامل تجزیه و مشخصه pH با نقش در میزان حلالیت ترکیبات موجود در فاضلاب سبب حذف آلاینده‌ها می‌شود. می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که سیستم مورد استفاده در این تصفیه‌خانه کارآمد بوده و پساب تولیدی از نظر پارامتر های مورد مطالعه با استانداردهای رایج در ایران مطابقت داشته و قابلیت استفاده مجدد در مصارف کشاورزی و با ارتقاء بیشتر کیفیت پساب، قابلیت تخلیه به آب‌های پذیرنده را دارد. به‌طورکلی، باتوجه‌به اینکه بخش عمده‌ای از پساب خروجی عمدتا به سمت آب‌های سطحی و دریا هدایت می‌شود، ضرورت دارد تا استانداردهای تخلیه به دریا مورد توجه قرار گیرد. ارزیابی کلی بیانگر آن است که میزان بهره‌وری سامانه تصفیه‌خانه مورد نظر حدود ۴۱ درصد می‌باشد که می‌تواند قابل قبول تلقی شود. ولی ضرورت دارد باتوجه‌به بهره‌برداری از آن طی سال‌های آتی، تاسیسات جدید جایگزین شده تا میزان بهره‌وری افزایش یابد.

## سپاسگزاری

پژوهش حاضر با حمایت مادی و معنوی حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در قالب طرح پژوهشی تحت قرارداد به شماره ۰۲-۱۴۰۱-۲۴ مورخ ۱۴۰۱/۱۲/۱۵ تهیه شده است که به‌این‌وسیله مراتب تشکر و قدردانی نویسندگان اعلام می‌شود.

## منابع

اعلمی، محمدتقی، حجابی، نسیم، نورانی، وحید، و ثاقبیان، مهدی. (۱۴۰۰). بررسی کارایی روش‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب در شهر تبریز. عمران امیرکبیر، ۵۳(۳)، ۱۰۳۳-۱۰۴۸. doi: 10.22060/ceej.2019.16757.6334

امامی، سمیه، و چوپان، یحیی. (۱۳۹۹). استفاده از روش‌های نوین هوش مصنوعی در بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی در دشت سلماس. زمین‌شناسی محیط‌زیست، ۱۴(۵۰)، ۳۹-۵۵.

صادقی، حمیدرضا، محمودی، بهروز، و پیشوائی، سامان. (۱۴۰۱). شیوه‌نامه تعیین و سنجش شاخص‌های بهره‌وری استان‌ها. انتشارات سازمان ملی بهره‌وری ایران، تهران، ایران

محمودی، بهروز، صادقی، حمیدرضا، و خاکسار، سمانه (۱۴۰۰). سیمای بهره‌وری ایران، انتشارات سازمان ملی بهره‌وری ایران. تهران، ایران.

وجاهت، جواد، صراف، شادی. (۱۴۰۰). بررسی تاثیرات یکپارچه‌سازی هیدرولیکی و تعیین شاخص تاب‌آوری و بهره‌وری سامانه‌های شبکه توزیع آب. پژوهش‌های مهندسی آب ایران، ۱(۱)، ۱۵-۲۵. doi: 10.22034/ijwer.2022.301276.1002

Alam, G., Ihsanullah, I., Naushad, M., & 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. doi: 10.1016/j.cej.2021.130011

Kisi, O., & Cimen, M. (2012). Precipitation forecasting by using wavelet-support vector machine conjunction model. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 25(4), 783-792. doi: 10.1016/j.engappai.2011.11.003

Legg, S., & Hutter, M. (2007). A collection of definitions of intelligence. Frontiers in Artificial Intelligence and applications, 157, 17.

Liu, E., Wen, D., Peng, S., Sun, H., & Yang, Y. (2017). A study of the numerical simulation of water hammer with column separation and cavity collapse in pipelines. Advances in Mechanical Engineering, 9(9), 1687814017718124. doi: 10.1177/1687814017718124

Rizal, N. N. M., & Hayder, G. (2023). Forecasting effluent biochemical oxygen demand in sewage treatment plants using machine learning and user-friendly interface. International Journal of Environmental Research, 17(1), 4. doi: 10.1007/s41742-022-00493-8

Seyoum, A. G., & Tanyimboh, T. T. (2017). Integration of hydraulic and water quality modelling in distribution networks: EPANET-PMX. Water Resources Management, 31, 4485-4503. doi: 10.1007/s11269-017-1760-0

Taşan, S. (2023). Estimation of groundwater quality using an integration of water quality index, artificial intelligence methods and GIS: Case study, Central Mediterranean Region of Turkey. Applied Water Science, 13(1), 15. doi: 10.1007/s13201-022-01810-4