

پیش‌بینی آب مصرفی روزانه شهری و بهینه‌سازی ساعات کارکرد پمپ‌های ایستگاه پمپاژ، مطالعه موردی: نجف‌آباد

سید پدram جزائری فارسانی*، حمیدرضا صفوی، محمدرضا ناظمی زاده، محمدصالح ابراهیمی، علیرضا رحمت پناه

دانشجوی دکتری عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه اصفهان

Pedram.jazayeri@yahoo.com

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مدیر دفتر سیستم‌های کنترل و انرژی آب - شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان

کارشناس تله متری - شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان

رئیس گروه طراحی و نوسازی ساختمان و ابنیه - شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

چکیده:

در سال‌های اخیر مهندسين و بهره‌برداران علاقه بیشتری به استفاده از روش‌های هوشمندسازی و بهینه‌سازی شبکه‌ها در برابر سایر روش‌های پرهزینه و زمان‌بر از جمله بازسازی و نوسازی شبکه، مدیریت دارایی و تجهیز شبکه به المان‌های جدید نشان داده‌اند. در پژوهش حاضر، ابتدا بر اساس روش‌های میانگین متحرک و رگرسیون خطی، برخی روش‌های شبکه عصبی مصنوعی از جمله شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، شبکه عصبی تابع پایه شعاعی، میزان آب مصرفی در شبکه توزیع آب شهری بر اساس چهار دسته ویژگی ورودی‌های مدل از جمله شماره روز در سال، شماره روز در هفته، تداوم تعطیلی و میزان دمای هوای بیشینه روزانه پیش‌بینی می‌شود. سپس بر اساس مقدار پیش‌بینی شده، الگوی مصرف ساعتی و تراز آب موجود در مخزن پایین‌دست

ایستگاه پمپاژ، برنامه بهینه زمان بندی برای ساعات روشن شدن پمپ‌های دور ثابت ایستگاه پمپاژ تعیین می‌شود تا هزینه برق مصرفی ایستگاه پمپاژ بر اساس تعرفه‌های مختلف برق، کاهش یابد. برای بررسی روش مذکور از شبکه آب شهری نجف‌آباد استفاده شده است که هزینه برق مصرفی ایستگاه پمپاژ آن با توجه به انتخاب مقادارهای مختلف برای پارامتر تناوب تغییر حالات پمپ‌ها، از ۱/۲٪ تا ۱۳/۳٪ نسبت به حالت بهره‌برداری سنتی کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، شبکه عصبی تابع پایه شعاعی، بهینه‌سازی خطی عدد صحیح مختلط، شبکه آب، ایستگاه پمپاژ

پذیرفته شده / ویرایش نشده

Daily Urban Water Consumption Prediction and Optimization of Pumping Station Operation Hours: A Case Study of Najaf Abad

Jazayeri, Pedram*, Safavi, Hamidreza, Nazemizadeh, Mohamadrez, Ebrahimi,
Mohamad Saleh, Rahmatpanah, Alireza

Civil and transportation faculty, Isfahan University, Isfahan, Iran

pedram.jazayeri@yahoo.com

Dept. of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

Water and Wastewater Company of Isfahan Province

Water and Wastewater Company of Isfahan Province

Water and Wastewater of Isfahan Province

Received: 13/08/2023

Revised: 13/01/2024

Accepted: 15/01/2024

Abstract:

In recent years, engineers and operators have shown a greater interest in employing optimization method and making networks smart over other costlier and time-consuming approaches such as network rehabilitation, asset management, and network equipment upgrading. In the present study, the daily water consumption in the urban water distribution network is predicted based on four input features: day of the year, day of the week, continuity of holidays, and maximum daily air temperature, using moving average methods, linear regression, some artificial intelligence methods including multilayer perceptron neural network, and radial basis function neural network. Subsequently, based on the predicted values, the optimal scheduling of pump station activation hours is determined considering the hourly consumption pattern and the water levels in the upstream and downstream reservoirs of the pumping station. This scheduling aims to reduce the electricity cost of the pumping station with the fixed speed pumps based on different electricity tariffs. The method has been applied to the Najaf Abad urban water network, resulting in a reduction of 1.2% to 13.3% in the electricity cost of the pumping station compared to the traditional operational mode due to the different time interval parameter values for pumping.

Keywords:

Multi-Layer Perceptron, Radial Basis Function, Mixed Integer Linear Programming, Water Network, Pump Station

۱-مقدمه:

امروزه در روش سنتی بهره‌برداری ایستگاه پمپاژ شبکه‌های توزیع آب شهری، عملیات پمپاژ معمولاً در هنگام پر شدن مخزن بالادست و خالی شدن مخزن پایین‌دست آغاز می‌شود که این امر ممکن است منجر به مصرف بیشتر برق در ساعات پرباری شده و بار زیادی را به شبکه برق اعمال کند. با بهینه‌سازی و هوشمندسازی ایستگاه‌های پمپاژ، نیاز به دخالت انسانی و همچنین مصرف برق کاهش می‌یابد. لذا نیاز است تا با به‌کارگیری روش‌های کم‌هزینه و زودبازده در جهت بهبود وضعیت بهره‌برداری شبکه‌های توزیع آب شهری گام برداشته و در نهایت شاخص‌های رشد و توسعه کشور در بخش شریان‌های حیاتی (از جمله شبکه‌های آب و فاضلاب) بهبود یابد.

پژوهش حاضر در دو بخش اصلی تعریف و تقسیم شده که در بخش اول (بخش هوش مصنوعی و پیش‌بینی)، با توجه به سری‌های زمانی (Time Series) مربوط به آب مصرفی روزانه در روزهای گذشته و با اعمال سایر ورودی‌های مدل‌های هوش مصنوعی، میزان آب مصرفی روزانه در روزهای آینده برای شبکه مورد مطالعه پیش‌بینی می‌شود. در این بخش از روش‌های مختلف مانند میانگین متحرک (MA^۱)، شبکه عصبی MLP^۲، شبکه عصبی RBF^۳، شبکه عصبی SVR^۴ و میانگین کلیه روش‌ها برای پیش‌بینی مقدار آب مصرفی روزانه استفاده شده است. سپس در بخش دوم (بخش بهینه‌سازی) و بر اساس میزان آب روزانه پیش‌بینی شده

، تراز آب در مخزن پایین دست ایستگاه پمپاژ و ساعات پرباری، میان‌باری و کم‌باری مصرف برق، تعداد پمپ‌های بهینه (متغیر تصمیم مسأله) که باید در هریک از تناوب‌های زمانی (۱، ۲، ۳، ۴، ۶ و ۸ ساعته) روشن شوند، تعیین شده تا در نهایت میزان برق مصرفی ایستگاه پمپاژ کاهش یابد. شایان ذکر است از زبان برنامه‌نویسی پایتون (Python) برای کدنویسی هر دو بخش اصلی طرح حاضر، به دلیل سرعت بالای اجرا و همچنین دارا بودن ماژول‌های مختلف برای روش‌های هوش مصنوعی و بهینه‌سازی استفاده شده است.

در ادامه به بررسی برخی از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در حوزه بهینه‌سازی، روش‌های هوش مصنوعی، پیش‌بینی و بهره‌برداری ایستگاه‌های پمپاژ پرداخته می‌شود.

در یک پژوهش، راه حلی برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت مصرف آب از رویکرد هوش مصنوعی به عنوان جایگزینی برای رویکردهای مبتنی بر رگرسیون سنتی پیشنهاد شد. نتایج نشان داد اگرچه الگوی ARIMA^۵ پیش‌بینی مناسبی ارائه می‌دهد اما به خوبی الگوی شبکه عصبی به کار رفته در این مطالعه نیست (Topali et al., 2006). طی تحقیقی به مقایسه بین مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه (MLP) و رگرسیون به منظور پیش‌بینی پیک مصرف آب شهری پرداخته شد. در پژوهش مذکور، داده‌های شش ساله پیک مصرف آب شهر نیکوزیا (Nicosia) در قبرس مورد مطالعه قرار گرفته و بیست مدل رگرسیونی چندگانه و بیست مدل شبکه عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل شبکه مصنوعی آموزش دیده با استفاده از الگوریتم لونبرگ-مارکوات عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها برای پیش‌بینی دارد (Adamowski and Karapataki, 2010). در پژوهش دیگری، به بررسی ثابت یا متغیر بودن نحوه تزریق کلر و وضعیت دور پمپ‌ها به منظور بهینه‌سازی کیفیت آب در شبکه‌های توزیع آب پرداخته شده و برای بهینه‌سازی از الگوریتم جامعه مورچگان (ACO)^۶ استفاده شد. همچنین به منظور تحلیل هیدرولیکی و کیفی از تحلیل‌های مبتنی بر تقاضا (DDSM)^۷ و مبتنی بر فشار (HDSM)^۸ استفاده نمودند و مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن بود که در تحلیل HDSM، استفاده از پمپ‌های دور متغیر علاوه بر کاهش انرژی مصرفی در شبکه، منجر به کاهش هزینه‌های کلرزی نیز می‌شود (بابایی و همکاران، ۱۳۹۶).

کریمی و همکاران (۱۳۹۶) به بهینه‌سازی (حداقل‌سازی) هزینه انرژی مصرفی در ایستگاه‌های پمپاژ شبکه‌های توزیع آب پرداختند. بدین منظور از دو الگوریتم ژنتیک ساده (SGA)^۹ و الگوریتم ژنتیک با آشفتگی سریع (FMGA)^{۱۰} استفاده شده که بر روی یک شبکه توزیع با ۵ پمپ موازی صورت گرفت. قیود مسأله شامل حداقل و حداکثر مقدار برای سرعت لوله‌ها و فشارهای گرهی و تعداد تغییر حالات اقتصادی پمپ‌ها برای خاموش و روشن شدن بود. مقایسه نتایج نشان داد نتایج حاصل از الگوریتم‌ها SGA و FMGA نسبت به حالت عادی بهره‌برداری پمپاژ، میزان انرژی مصرفی را به ترتیب ۱۵٪ و ۱۰٪ کاهش داد. محققان دیگری به بررسی پارامترهای مهم در شکست لوله‌ها از جمله جنس، سن، طول، قطر لوله‌ها و فشار هیدرولیکی شبکه پرداختند.

برای تحلیل این متغیرها از ۴ مدل رگرسیونی شامل مدل‌های رگرسیونی خطی، نمایی، پواسون و لجستیک استفاده شد تا معادله مورد نیاز برای تخمین شکستگی لوله‌ها در آینده تعیین گردد. مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن بود که بهترین روش پیش‌بینی، رگرسیون لجستیک بوده که با دقت قابل‌قبولی حوادث آینده را پیش‌بینی می‌کند (مطیعی و قاسم‌نژاد، ۱۳۹۶).

در مطالعه دیگری، امکان احیای انرژی در ۸ شبکه توزیع آب روستایی در کشور ایرلند بررسی شد. در روش پیشنهادی دو سناریو بررسی شد که در سناریوی اول، کاهش فشار از طریق تعویض $PRVs^{11}$ (که در حال سرویس‌دهی بوده) با $PATs^{12}$ انجام شد و در سناریوی دوم، بر اساس ترازهای ارتفاعی و دبی، مکان‌های جدید برای قرار دادن $PATs$ در مناطق دارای فشار اضافی پیشنهاد شد. نتایج نشان‌دهنده آن بود که انرژی برقایی تولید شده می‌تواند انرژی الکتریکی مورد نیاز شبکه را در سناریوی اول و دوم به ترتیب ۲۱٪ و ۲۳٪ کاهش دهد (Fernández García et al., 2019). هجگاتو و همکاران (Hajgato et al., 2020) از روش یادگیری تقویتی عمیق (DRL^{13}) به عنوان کنترل‌گرهای پمپ در دو شبکه آب استفاده نمودند. هدف این تحقیق آن بود که تعیین سرعت مناسب پمپ با استفاده از روش مذکور، محدودیت کنترل لحظه‌ای پمپ‌ها در شبکه را از بین برده شود که در نهایت موفق بودند.

محققان دیگری به تعیین نواحی مجزا در شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از ترکیب تئوری گراف و روش هوش مصنوعی MLP پرداخته تا بدین ترتیب بتوان بدون نیاز به دبی‌سنج، محل نشت را یافت و سرعت یافتن محدوده نشت افزایش یافت. همچنین در این روش نیازی نیست تعداد گره‌های نشت از قبل عملیات نشت‌یابی مشخص باشد. در نهایت این روش، ناحیه نشت را به درستی پیش‌بینی نموده و حداکثر خطای تعیین مقدار نشت ۶/۵٪ بود (شکفته و همکاران، ۱۳۹۹). پاندی و همکاران (Pandey et al., 2021) از دو روش ترکیبی جدید برای پیش‌بینی تقاضای آبی ماهانه و ساعتی استفاده نمودند. روش اول ترکیبی از تجزیه حالت تجربی مجموعه ($EEMD^{14}$) و پیش‌بینی توالی الگوی تفاوت ($DPSF^{15}$) بوده و روش دوم ترکیبی از $EEMD$ ، $DPSF$ و میانگین متحرک یکپارچه شده اتورگرسیونی (ARIMA) بود. عملکرد روش‌ها با استفاده از خطاهای MAE^{16} ، $RMSE^{17}$ و $MAPE^{18}$ بررسی شده و نتایج حاصل از دو روش ترکیبی با نتایج حاصل از روش‌های ARIMA، $DPSF$ و مدل‌های هوش مصنوعی مقایسه شد. روش ترکیبی اول در مقایسه با سایر روش‌ها از لحاظ پایداری و پیچیدگی‌های محاسباتی و حافظه بهتر بود. همچنین، در روش ترکیبی اول نسبت به روش ترکیبی دوم نتایج بهتری حاصل شد در حالی که روش دوم، زمان محاسباتی کمتری دارد. دینی و همکاران (۱۴۰۰)، به تنظیم بهینه تعداد و سرعت پمپ‌های موجود در شبکه توزیع آب پرداخته تا در نهایت کارایی هیدرولیکی شبکه بهینه شود. بدین منظور ۴ سناریو بر روی شبکه آب مورد مطالعه بررسی شد که این سناریوها شامل وضعیت موجود شبکه با پمپ‌های سرعت ثابت، تنظیم بهینه سرعت برای پمپ‌های دور متغیر، تعیین تعداد بهینه پمپ‌های با سرعت ثابت و تنظیم بهینه همزمان تعداد و سرعت برای پمپ‌های دور متغیر بود. مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن بود که

بیشترین مقدار برای شاخص قابلیت اطمینان (افزایش تا ۶۶/۲٪) و کمترین میزان نشت (کاهش تا ۲۳/۵۳٪) در سناریوهای دوم و چهارم رخ می‌دهد. همچنین سناریو چهارم نسبت به دوم، دارای کاهش ۱۳/۶٪ در تعداد پمپ‌های روشن است که منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود.

نصراللهی و همکاران (۱۴۰۰) به بهینه‌سازی همزمان فشار و انرژی در شبکه توزیع آب بهارستان، اصفهان پرداختند. کاهش فشار منجر به کاهش هدررفت شبکه توزیع شده ولی می‌تواند باعث افزایش استفاده از سیستم‌های تقویت فشار آب خانگی شده که در نهایت میزان انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. نتایج نشان‌دهنده آن بود که فشار بهینه ۴۸ متر ستون آب بوده در حالی که اگر فشار ۴۱ متر ستون آب شود هزینه‌های فشار و انرژی با هم برابر می‌شود. آلهارشا و همکاران (Alharsha et al., 2022) به بررسی متوسط مصرف سرانه آب در شهر سیرت (Sirte) در لیبی پرداخته که این مقدار برابر با ۲۲۵ لیتر بر روز برای هر نفر بود. این مقدار با افزایش سایز خانواده‌ها، کاهش یافته ولی درآمد خانواده تأثیری در متوسط مصرف سرانه آب نداشت. همچنین الگوی مصرف ساعتی در این شهر با الگوی شهرهای کشورهای توسعه‌یافته متفاوت بوده و دارای چند قله (پیک مصرف) بود. در این تحقیق، برای پیش‌بینی آب مصرفی روزانه آتی، از سه مدل آماری بر مبنای روش رگرسیون چندمتغیره استفاده شد. مقایسه مدل‌ها نشان داد که مدل‌هایی که بر مبنای پارامترهای جمعیت‌شناسی (Demographic) بوده نتایج قابل‌قبولی ارائه می‌دهند در حالی که اضافه نمودن متغیرهای بیشتری مثل متغیرهای مربوط به خانواده‌ها، لزوماً دقت پیش‌بینی را افزایش نمی‌دهد.

بسنت و همکاران (Banset et al., 2023) با در نظر گرفتن شرایط واقعی تر برای نشت در چهار شبکه آب، پیچیدگی‌های مربوط به هریک از حالات را بررسی کردند. آن‌ها از برخی روش‌های یادگیری ماشین (Machine Learning) از جمله روش MLP و روش CNN^{۱۹} استفاده نموده و فشار و دبی به عنوان ورودی‌های این روش‌ها اعمال شدند. بررسی نتایج برای تعیین نقاط نشت با استفاده از شرایط پیچیده‌تر و نزدیک به هیدرولیک حاکم بر آن نشان‌دهنده آن بود که استفاده از روش‌های مذکور دقت خوبی در تعیین نشت دارند. رپ و همکاران (Rapp et al., 2023) به بررسی استفاده از روش‌های هوش مصنوعی در میان ۴۹ شرکت توزیع آب در کشور آمریکا پرداخته و دریافته‌اند که از بین تمام آن‌ها، تنها ۲۴ شرکت از روش‌های هوش مصنوعی برای مدیریت و بهره‌برداری شبکه‌های آب استفاده نموده و بقیه شرکت‌ها قصد داشته تا در چشم‌انداز ۵ ساله از این روش‌ها استفاده نمایند. این روش‌ها به منظور مدیریت کیفی شبکه، شناسایی نشت و هوشمندسازی شبکه‌ها مورد استفاده قرار گرفته بود.

نوآوری تحقیق حاضر در آن است که توامان و به صورت یکجا از روش‌های هوش مصنوعی و بهینه‌سازی استفاده شده تا میزان برق مصرفی عملیات پمپاژ کاهش یابد. به دلیل پیاده‌سازی و اجرای روش مذکور بر روی شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد و سپس بررسی نتایج و با توجه به محدودیت‌های اقتصادی منطقه برای تأمین پمپ‌های دور متغیر، لذا بهینه‌سازی بر روی پمپ‌های دور ثابت موجود انجام گردید که در نهایت نیز منجر به کاهش میزان برق مصرفی شد. از دیگر نوآوری‌های پروژه حاضر

می‌توان به این مورد اشاره کرد که در ورودی‌های مدل‌های هوش مصنوعی علاوه بر دسته ویژگی دمای حداکثر روزانه، ۳ دسته ویژگی دیگر از جمله روز در سال، روز در هفته و تداوم تعطیلی برای روزها در نظر گرفته شده که پیش‌بینی با تعداد دسته ورودی بیشتری (۴ دسته ورودی) صورت گرفته و در نهایت به پیش‌بینی دقیق‌تری منجر شود. همچنین، بهره‌بردار شبکه این امکان را دارد که به منظور بهینه‌سازی عملیات پمپاژ در طی ۲۴ ساعات شبانه‌روز، بر اساس انتخاب مقدار دلخواه برای پارامتر تناوب تغییر حالات پمپ‌ها (مثلاً ۱، ۲، ۳، ۴، ۶ و ۸ ساعته) تعیین کند تعداد پمپ‌های بهینه که مدل بهینه‌ساز باید پیشنهاد دهد با چه تناوبی انجام شود (به بیان دیگر چند ساعت یکبار بر اساس بهینه‌سازی خاموش و روشن شوند). شایان ذکر است که هرچند انتخاب پارامتر تناوب تغییر حالات پمپ‌ها روی میزان برق مصرفی پمپاژ اثر می‌گذارد ولی در نهایت همه جواب‌ها به صورت بهینه ارائه می‌شوند.

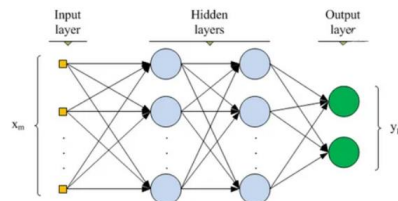
همچنین پس از آنکه میزان آب مصرفی روزانه آبی برای کل شبکه آب مورد مطالعه پیش‌بینی شد، برنامه کدنویسی شده به بهره‌بردار این امکان را می‌دهد که مقدار پیش‌بینی شده‌ای که قرار است در بخش بهینه‌سازی از آن استفاده شود را از بین مقادیر موجود انتخاب نماید. همچنین بر اساس میزان خطا و دقت روش پیش‌بینی، به بهره‌بردار پیشنهاد می‌دهد که کدامیک از مقادیر پیش‌بینی شده مناسب‌تر بوده ولی انتخاب مقدار نهایی از میان مقادیر موجود بر اساس صلاح‌دید بهره‌بردار صورت می‌گیرد.

به علاوه، برنامه کدنویسی شده به نحوی انجام شده است که قابلیت اجرا و پیاده‌سازی بر روی هر ایستگاه پمپاژی (با پمپ‌های تیپ) که قرار است آب را بین دو مخزن انتقال دهد، دارد. از دیگر مزایای طرح پیشنهادی آن است که برای پیاده‌سازی آن نیاز به سخت‌افزار یا پیاده‌سازی المان هیدرولیکی یا مکانیکی خاصی در شبکه نبوده و با استفاده از سامانه تله‌متری (Telemetry) موجود در شرکت‌های آب و فاضلاب، قابلیت اجرا وجود داشته و به طور کلی، برنامه تعمیم‌پذیری خوبی برای سایر شبکه‌ها دارد. همچنین، در هر ساعت از شبانه‌روز و بر اساس مقادیر آب مصرفی ساعتی و تراز آب در مخزن در لحظه شروع، برنامه قادر است برنامه بهینه زمان‌بندی پمپاژ را ارائه دهد. همچنین با اتمام هر روز و با توجه به آب پمپاژ شده، میزان مصرف مشترکین نیز در پایگاه داده ثبت شده که در نتیجه بر تعداد داده‌های ورودی برای مدل‌های هوش مصنوعی به منظور پیش‌بینی افزوده شده و در نهایت دقت مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی افزایش می‌یابد.

۲- مواد و روش‌ها:

همانگونه که ذکر گردید در سال‌های اخیر از روش‌های هوشمندسازی و بهینه‌سازی بیش از پیش در شبکه‌های توزیع آب شهری استفاده شده است. در این بخش، ابتدا به معرفی روش‌های شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده در این تحقیق شامل MLP، RBF و SVR و روش میانگین متحرک پرداخته شده و سپس مدل بهینه‌سازی مورد استفاده شرح داده می‌شود.

در مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، ساختار مغز انسان و ارتباط بین سلول‌های عصبی آن به صورت ریاضی مدل‌سازی شده که این مدل با الهام گرفتن از پدیده یادگیری مغز، آموزش دیده و وزن‌های موجود در مدل ریاضی شبکه عصبی مصنوعی تنظیم می‌شوند. در شکل ۱، یک نمونه ساده از ساختار شبکه عصبی مصنوعی با لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی نمایش داده شده است.

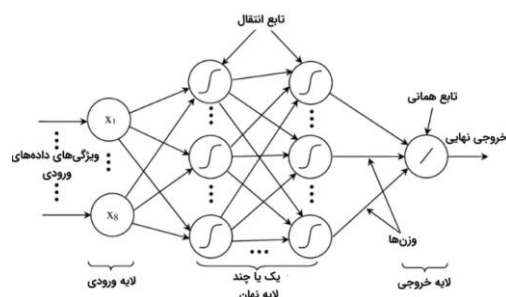


شکل ۱- یک نمونه ساده از ساختار شبکه عصبی مصنوعی

۲-۱- روش MLP:

یکی از ابتدایی‌ترین مدل‌های عصبی موجود، مدل پرسپترون چند لایه است که در این روش هر یک از سلول‌های عصبی مغز انسان (نورون) پس از دریافت ورودی (از یک سلول عصبی یا غیرعصبی دیگر)، پردازشی روی آن انجام داده و نتیجه را به یک سلول دیگر (عصبی یا غیرعصبی) انتقال می‌دهند. در شکل ۲ یک شبکه عصبی پرسپترون چندلایه ارائه شده است.

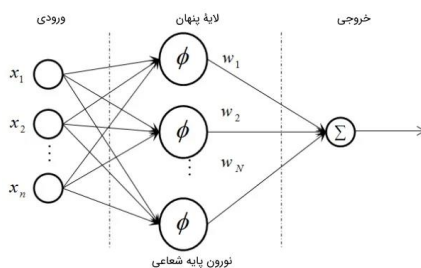
در تمامی الگوریتم‌های یادگیری نظارت‌شده (Supervised Learning Algorithms) از جمله روش MLP، خروجی واقعی داده آموزشی از پیش مشخص شده است. به این خروجی‌ها، خروجی مورد انتظار نیز گفته می‌شود. از خروجی‌های مورد انتظار برای سنجش عملکرد سیستم شبکه عصبی استفاده می‌شود. بر اساس اختلاف مقادیر خروجی مورد انتظار و خروجی پیش‌بینی شده، مقدار خطا شبکه عصبی پرسپترون چند لایه محاسبه می‌شود. از مقدار زیان محاسبه‌شده، برای الگوریتم پس انتشار خطا در شبکه پرسپترون و به‌روزرسانی وزن‌ها استفاده می‌شود (Gardner and Dorling, 1998).



شکل ۲- شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

۲-۲- روش RBF:

نوع دیگری از شبکه‌های عصبی وجود دارند که در آن‌ها، واحدهای پردازنده از نظر پردازشی بر موقعیت خاصی متمرکز بوده که این تمرکز از طریق توابع شعاعی مدل‌سازی می‌شود. از نظر ساختار کلی، شبکه‌های عصبی RBF تفاوت چندانی با شبکه‌های MLP نداشته و صرفاً نوع پردازشی که نورون‌ها روی ورودی‌هایشان انجام می‌دهند، متفاوت است. با این حال، شبکه‌های RBF غالباً دارای فرایند یادگیری و آماده‌سازی سریع‌تری هستند. در واقع، به دلیل تمرکز نورون‌ها بر محدوده عملکردی خاص، کار تنظیم آن‌ها راحت‌تر خواهد بود (Buhmann, 2000). در شکل ۳، مثالی از یک شبکه عصبی RBF ارائه شده است.

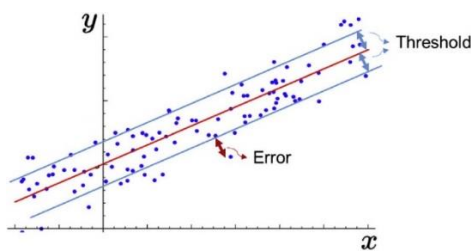


شکل ۳- یک مثال برای شبکه از RBF

در شکل ۳، مقادیر x ورودی‌های مدل بوده که بر اساس تابع شعاعی ϕ پردازش بر روی ورودی‌ها صورت گرفته و با تنظیم وزن‌ها (w) ، در نهایت بهترین خروجی (مقدار پیش‌بینی شده) حاصل می‌شود.

۲-۳- رگرسیون غیرخطی با استفاده از SVR:

دسته‌ای از مدل‌های رگرسیون به نام رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) وجود دارد که در آن می‌توان مدل‌های خطی و غیرخطی را ایجاد و پارامترهای آن را محاسبه کرد. این کار توسط به کارگیری یک تابع هسته‌ای غیرخطی (مشابه کرنل در شبکه‌های RBF) حاصل می‌شود و محاسبه پارامترهای این تابع به این شکل است که خطا کمینه شده به طوری که فاصله بین صفحاتی که عمل جداسازی بین دسته‌ها را ایجاد می‌کنند، بیشینه شود (Smola and Schölkopf, 2004). در شکل ۴ نمونه‌ای از شبکه‌های SVR ارائه شده است. همچنین از روش رگرسیون خطی ساده (برازش درجه اول) نیز برای پیش‌بینی استفاده شده است.



شکل ۴- نمونه‌ای از مدل رگرسیون بردار پشتیبان

۲-۴- میانگین متحرک (MA):

در علم آمار، میانگین متحرک به محاسباتی گفته شده که برای تجزیه و تحلیل نقاط داده به وسیله میانگین گیری زیرمجموعه های مختلفی از کل مجموعه داده انجام می شود. به بیان دیگر مقدار میانگین برای تعدادی از اعداد است به نحوی که با گذر زمان، بازه انتخابی برای محاسبه مقدار میانگین تغییر می یابد (Hansun, 2013). در پژوهش حاضر، از میانگین متحرک ساده با دوره تناوب ۳ و ۷ استفاده شده است.

حال که مقدار مصرف آب روزانه آتی برای روز موردنظر پیش بینی شد، نیاز است تا این مقدار در بخش بهینه سازی استفاده شود. بدین منظور در ادامه، مدل بهینه مورد استفاده برای بهینه سازی عملیات پمپاژ شرح داده می شود.

۲-۵- بهینه سازی با استفاده از بهینه سازی خطی عدد صحیح مختلط (MILP):

در بخش بهینه سازی سعی بر آن است که مدل بهینه ساز با توجه به ساعتی که قرار است بهینه سازی از آن ساعت به بعد انجام شود (می تواند بهینه سازی لزوماً در ابتدای روز و در ساعت ۰۰:۰۰ صورت نگیرد)، حتی الامکان از روشن شدن همه یا تعداد بیشتری از پمپها در ساعات پرباری مصرف برق اجتناب شده و در ساعات میان باری و کم باری روشن شوند تا میزان برق مصرفی نهایی کاهش یافته و بالطبع هزینه های آن نیز کاهش یابد. در این طرح، برنامه بهینه زمان بندی پمپاژ در هر ساعات از شبانه روز و با هر میزان آب موجود در مخازن صورت گرفته و جواب بهینه توسط مدل بهینه سازی تعیین می شود. در پروژه حاضر، به دلیل آنکه امکان اجرا و استفاده از پمپهای دور متغیر به دلیل محدودیت مالی نبود، برنامه بهینه زمان بندی ایستگاه پمپاژ برای پمپهای با دور ثابت در حال بهره برداری ارائه شد.

شایان ذکر است دلیل استفاده از روش بهینه سازی MILP برای بخش دوم پروژه آن است که با توجه به آنکه متغیر تصمیم مسأله تعداد پمپهایی است که باید در هریک از تناوبهای زمانی مورد نظر (۱، ۲، ۳، ۴، ۶ و ۸ ساعته) روشن شده، از نوع متغیر گسسته (عدد صحیح) بوده و همچنین سایر پارامترهای مدل از جمله تراز لحظه ای آب در مخازن، از نوع متغیر پیوسته می باشند لذا، چون مدل مورد نظر ترکیبی از انواع متغیرهای گسسته و پیوسته بوده از برنامه ریزی عدد صحیح مختلط MILP برای بهینه سازی استفاده شده است. همچنین برای بخش بهینه سازی در روش پیشنهادی، تابع هدف مدل بر اساس دو نیمه سال شمسی کدنویسی شده که دلیل آن تفاوت تعرفه های برق مصرفی برای ساعات پرباری، میان باری و کم باری است. تابع هدف مدل بهینه سازی، از نوع حداقل سازی بوده و کاهش هزینه های برق مصرفی مدنظر است. در ادامه، ضرایب آب مصرفی ساعتی در شبانه روز برای شبکه موردنظر در جدول ۱ ارائه شده و سپس مدل ریاضی بهینه سازی مورد استفاده برای نیمه اول سال شمسی تشریح می گردد.

جدول ۱- ضرایب آب مصرفی ساعتی در شبانه روز

ساعت	۰-۱	۱-۲	۲-۳	۳-۴	۴-۵	۵-۶	۶-۷	۷-۸
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

۰/۷۹	۰/۵۹	۰/۴۴	۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۴۵	۰/۶۳	۰/۸۸	ضریب مصرف
۱۵-۱۶	۱۴-۱۵	۱۳-۱۴	۱۲-۱۳	۱۱-۱۲	۱۰-۱۱	۹-۱۰	۸-۹	ساعت
۱/۳	۱/۳	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳	۱/۲۵	۱/۱۳	۰/۹۸	ضریب مصرف
۲۳-۲۴	۲۲-۲۳	۲۱-۲۲	۲۰-۲۱	۱۹-۲۰	۱۸-۱۹	۱۷-۱۸	۱۶-۱۷	ساعت
۰/۹۹	۱/۰۷	۱/۱۵	۱/۲۲	۱/۲۸	۱/۳	۱/۳	۱/۳	ضریب مصرف

در ادامه، مدل بهینه‌سازی پیشنهادی به صورت روابط (۱) تا (۴) ارائه شده که در این مدل، رابطه (۱) تابع هدف مسأله و روابط (۲)، (۳) و (۴) سه قید مدل می‌باشند.

$O.F. = \text{Min} \left\{ \left[\left(1 * \sum_{t=0}^7 NP_t \right) + \left(2 * \sum_{t=8}^{19} NP_t \right) + \left(4 * \sum_{t=20}^{23} NP_t \right) \right] * PP * ET \right\}$	(۱)
$Min_l \leq DRL_t \leq Max_l, \quad \forall t \in \{0, 1, 2, \dots, 23\}$	(۲)
$RW_t \geq \left(\sum_{t=0}^{23} \frac{1}{C_t} \right) * C_t * PDW, \quad \forall t \in \{0, 1, 2, \dots, 23\}$	(۳)
$DRL_t * AD = (DRL_{t-1} * AD) + (NP_t * PD) - RW_t, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, 24\}$	(۴)

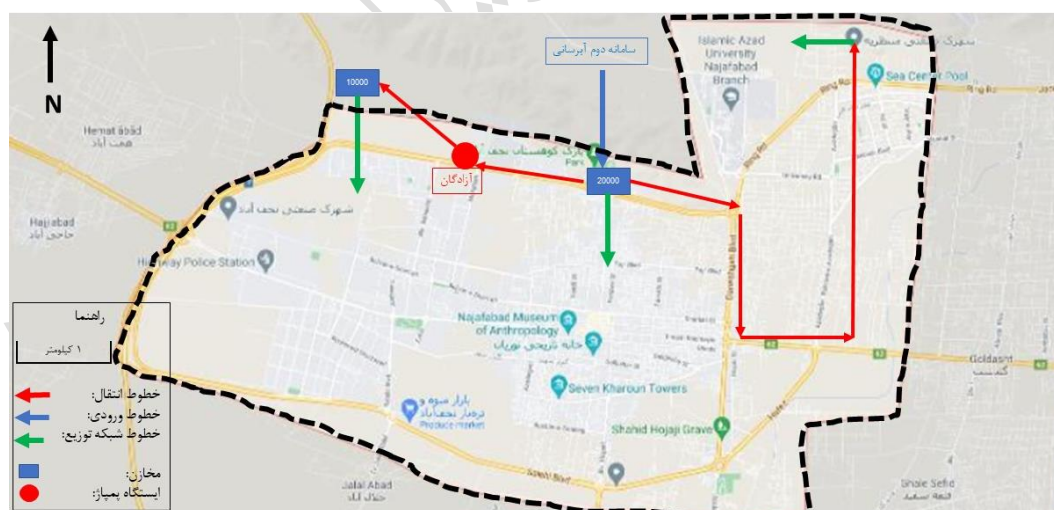
در مدل ریاضی فوق، متغیرهای ET ، PP ، NP_t به ترتیب تعداد پمپ‌های روشن از ساعت t تا ساعت $t+1$ ، توان پمپ (بر حسب کیلووات) و تعرفه پایه برق مصرفی برای ساعات کم‌باری، برابر با ۱۵۶ ریال به ازای هر کیلووات ساعت برق مصرفی می‌باشد. مطابق با ضرایب موجود در تابع هدف، واضح است که ساعات کم‌باری از ساعت ۰۰:۰۰ تا ۰۷:۵۹ بوده، ساعات میان‌باری از ساعت ۰۸:۰۰ تا ۱۹:۵۹ و تعرفه آن برابر با ۳۱۲ ریال بوده و ساعات پرباری از ساعت ۲۰:۰۰ تا ۲۳:۵۹ بوده که تعرفه برق مصرفی آن نیز ۶۲۴ ریال می‌باشد. سه دسته قیود کلی برای مدل تعریف شده است که دسته قید اول مربوط به تراز آب در مخزن پایین‌دست پمپاژ، دسته قید دوم مربوط به تأمین کامل نیاز آبی مشتری مشترکین و دسته قید سوم مربوط به رابطه پیوستگی برای مخزن پایین‌دست ایستگاه پمپاژ می‌باشد. متغیرهای Max_l و Min_l به ترتیب حداقل و حداکثر تراز مجاز برای مخزن پایین‌دست بوده که در اینجا به ترتیب برابر با ۱ متر و ۴/۵ متر منظور شده است. همچنین DRL_t تراز آب موجود در مخزن پایین‌دست در شروع ساعت t می‌باشد. متغیرهای RW_t ، C_t و PDW به ترتیب میزان آب اختصاص یافته به مشترکین از ساعت t تا ساعت $t+1$ ، ضرایب آب مصرف ساعتی از ساعت t تا ساعت $t+1$ (بر اساس جدول ۱) و میزان آب موردنیاز پیش‌بینی شده برای روز مذکور (مترمکعب) می‌باشد. همچنین متغیرهای AD و PD به ترتیب مساحت مخزن پایین‌دست (متر مربع) و دبی آب پمپاژ شده بر اساس تعداد پمپ‌های روشن (مترمکعب بر ساعت) می‌باشند.

شایان ذکر است مدل ریاضی فوق، به دلیل معادلات و نامعادلات خطی، از نوع بهینه‌سازی خطی است. همچنین این مدل برای کلیه ۲۴ ساعت شبانه‌روز ارائه شده حال آنکه بهینه‌سازی مدل مذکور و سپس شروع عملیات پمپاژ بر اساس برنامه بهینه پیشنهاد شده، می‌تواند در هریک از ساعت شبانه‌روز اتفاق بیفتد.

۳- مطالعه موردی:

در اینجا برای بررسی نتایج مدل‌های هوش مصنوعی (بخش پیش‌بینی) و مدل بهینه‌سازی، از شبکه آب شهر نجف‌آباد استفاده شده است که این شهر در ۲۵ کیلومتری غرب شهر اصفهان واقع شده است. جمعیت کنونی این شهر حدود ۳۰۰،۰۰۰ نفر بوده که میزان مصرف آب روزانه کل شبکه به طور متوسط برابر با ۴۵،۰۰۰ مترمکعب می‌باشد. در شکل ۵ محدوده مرزی شهر نجف‌آباد به همراه جانمایی مخازن و ایستگاه پمپاژ آن ارائه شده است.

در شکل ۵، محدوده شبکه آب شهری نجف‌آباد با خطوط خطچین مشکی‌رنگ تعیین شده است. این شبکه دارای ۲ مخزن به نام‌های مخازن ۲۰،۰۰۰ مترمکعبی پارک کوهستان و ۱۰،۰۰۰ متر مکعبی پادگان بوده که آب تحویلی به شبکه، توسط سامانه دوم آبرسانی استان به منطقه نجف‌آباد رسیده و در مخزن کوهستان دخیره می‌شود. بخشی از آب مخزن کوهستان به بخش شرقی، شمال شرقی و جنوب شرقی شبکه انتقال یافته و بخش دیگری از آب این مخزن، توسط ایستگاه پمپاژ آزادگان به مخزن ۱۰،۰۰۰ پادگان پمپاژ می‌شود. این ایستگاه پمپاژ دارای ۳ پمپ موازی هم‌تیپ بوده که توان اسمی هریک از پمپ‌ها ۲۰۰ کیلووات می‌باشد.

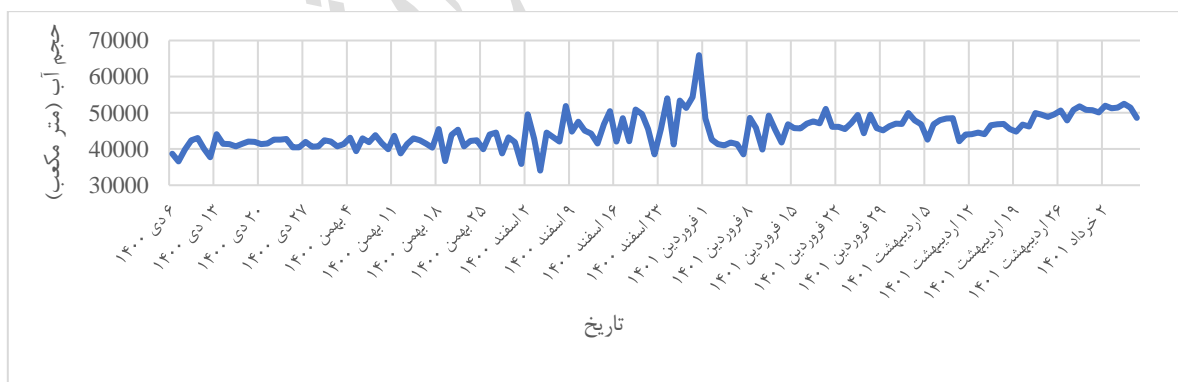


شکل ۵- محدوده مرزی شبکه آب نجف‌آباد و جانمایی المان‌های شبکه

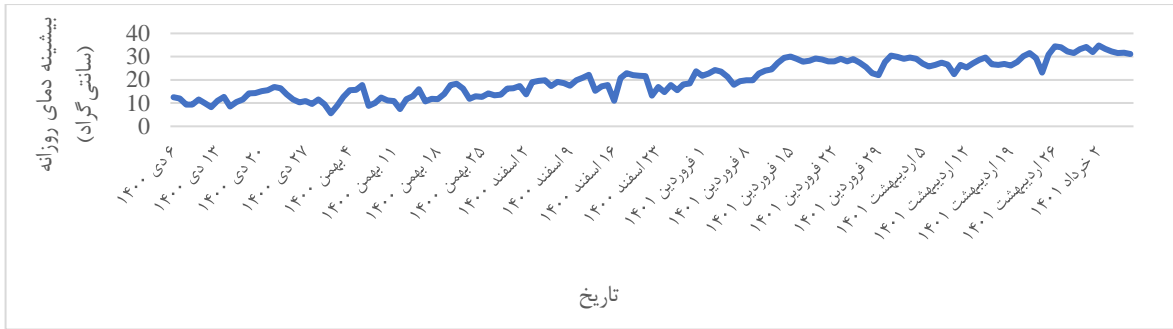
۴- نتایج و بحث:

در اینجا، برای آموزش مدل‌های هوش مصنوعی استفاده شده، ۱۵۲ نمونه ورودی موجود بوده که هر نمونه ورودی دارای ۴ دسته ویژگی شامل روز در سال، روز در هفته، تداوم تعطیلی برای روز و حداکثر دمای روزانه می‌باشد که در نهایت مدل هوش مصنوعی موردنظر باید بر اساس این ۴ دسته ویژگی، میزان آب مصرفی روزانه در روزهای بازه ۱۴۰۰/۱۰/۶ تا ۱۴۰۱/۳/۷ را آموزش ببیند (یادگیری نظارت‌شده). ویژگی اول برای نمونه‌ها، روز در سال بوده و بدان معنی است که هرروز در بازه زمانی فوق‌الذکر، مربوط به کدامیک از ۳۶۵ (یا ۳۶۶) روز سال بوده تا بدین وسیله تقویم شمسی در میزان مصرف روزانه آب دخیل شود. ویژگی دوم، روز در هفته بوده که برای روزهای شنبه تا جمعه و در بازه فوق، عدد ۰ تا ۶ در نظر گرفته می‌شود. ویژگی سوم، تداوم تعطیلی برای روز در بازه مذکور است به طور مثال مقدار این ویژگی برای هر دو روزی که پشت سرهم تعطیل باشند برابر با عدد ۲ در نظر گرفته می‌شود. ویژگی چهارم، دمای هوای بیشینه روزانه بوده که ارتباط مستقیمی با میزان مصرف آب دارد. به طور خلاصه، مدل بر اساس ۱۵۲ ورودی که هر یک ۴ ویژگی دارند آموزش دیده و میزان آب مصرفی روزانه را برای روزهای آتی پیش‌بینی می‌کند. از دیگر مزایای روش پیشنهادی آن است که با گذر زمان و اضافه شدن داده‌های تله‌متری، بر تعداد نمونه‌های موجود (۱۵۲) عدد اضافه شده و در نتیجه دقت روش‌های پیش‌بینی به مرور زمان افزایش می‌یابد.

مقادیر آب مصرفی روزانه برای بازه زمانی مذکور در شکل ۶ ارائه شده که میزان متوسط مصرف روزانه در این بازه، حدود ۴۴،۹۰۰ مترمکعب می‌باشد. لازم به ذکر است متناسب با افزایش دمای بیشینه روزانه (ارائه شده در شکل ۷) میزان آب مصرفی روزانه نیز افزایش می‌یابد. این در حالی است که در تاریخ ۱۴۰۰/۱۲/۲۹ به دلیل نزدیکی به تعطیلات نوروز، میزان مصرف از روند عادی خارج شده و بیشترین میزان مصرف مربوط به این روز بوده است.



شکل ۶- مصرف روزانه آب دوره‌های گذشته (متر مکعب) در شهر نجف‌آباد



شکل ۷- مقادیر دمای بیشینه روزانه برای بازه موردنظر در شهر نجفآباد (بر حسب سانتی‌گراد)

برای استفاده از روش‌های هوش مصنوعی مذکور، نیاز است تا پارامترهای مربوط به هریک از روش‌ها تحلیل حساسیت شوند. پس از تحلیل حساسیت در نهایت برای مسأله موجود، از شبکه MLP با ۲ لایه و در لایه اول ۱۰۰ نورون و در لایه دوم ۵۰ نورون انتخاب شده و از تابع فعال‌سازی ReLU استفاده شده است. به علاوه، در کلیه روش‌های MLP، RBF و SVR از ۷۰٪ داده‌ها به عنوان داده‌های آموزشی و ۳۰٪ باقیمانده به عنوان داده اعتبارسنجی و تست استفاده شده است. در روش SVR که به عنوان روش رگرسیون غیرخطی برای پیش‌بینی استفاده شده است از تابع چندجمله‌ای درجه سه به عنوان تابع کرنل استفاده شده است. در جدول ۲ نتایج مقادیر پارامترهای آماری از جمله MSE و RMSE برای هریک از این ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای آماری MSE و RMSE برای روش‌های MLP، RBF و SVR

نام روش پیش‌بینی	Test RMSE (m ³)	Train RMSE (m ³)	Test MSE (m ⁶)	Train MSE (m ⁶)
MLP	۴،۳۱۴	۲،۷۸۴	۱۸،۶۱۶،۶۴۶	۷،۷۵۵،۵۳۳
RBF	۳،۷۷۴	۲،۹۹۴	۱۴،۲۴۵،۷۵۱	۸،۹۶۶،۰۰۴
SVR	۳،۷۲۹	۳،۶۱۰	۱۳،۹۰۶،۷۷۹	۱۳،۰۳۴،۱۷۰

مطابق با جدول فوق، برای داده‌های آموزشی (Train) میزان خطای RMSE حداقل و حداکثر به ترتیب برابر با ۶/۲ و ۸٪ بوده و برای داده‌های تست و اعتبارسنجی (Test) دارای مقدار حداقل و حداکثر برابر با ۸/۳ و ۹/۶ می‌باشد. به طور مثال میزان خطای RMSE برای داده‌های آموزشی در روش MLP برابر با ۶/۲٪ بوده که این عدد با تقسیم ۲۷۸۴ مترمکعب (Train RMSE) بر عدد ۴۴،۹۰۰ متر مکعب (میزان متوسط مصرف سرانه در بازه زمانی ۱۴۰۰/۱۰/۶ تا ۱۴۰۱/۳/۷) به دست می‌آید که حاصل به صورت درصدی (۶/۲٪) بیان شده است. به منظور محاسبه درصد خطا برای بقیه مقادیر، میزان سایر خطاها به عدد ۴۴،۹۰۰ تقسیم می‌شوند.

همچنین از روش رگرسیون ساده (برازش با معادله درجه اول) نیز استفاده شده است. به علاوه، مقدار پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های میانگین متحرک ۳ روزه و ۷ روزه به ترتیب بر اساس میانگین حسابی مقادیر آب مصرفی روزانه ۳ روز و ۷ روز قبل

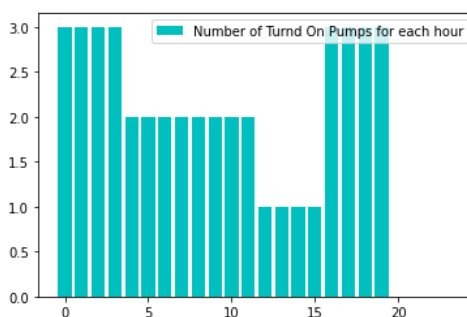
محاسبه می‌شود. به طور نمونه، مقدار پیش‌بینی شده برای روز بعد از بازه مذکور (روز یکشنبه ۱۴۰۱/۳/۸) مطابق با جدول ۳ خواهد بود.

جدول ۳- مقادیر پیش‌بینی شده مصرف آب روزانه در شبکه آب نجف‌آباد برای تاریخ ۱۴۰۱/۳/۸

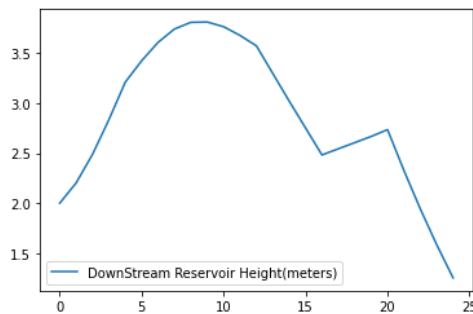
نام روش پیش‌بینی	رگرسیون خطی	SVM (رگرسیون غیرخطی)	میانگین متحرک ۳ روزه (MA3)	میانگین متحرک ۷ روزه (MA7)	MLP	RBF	میانگین کلیه روش‌ها
مقدار (مترمکعب)	۴۹،۰۴۷	۴۹،۹۰۷	۵۰،۸۶۴	۵۱،۰۶۵	۴۸،۵۶۳	۴۹،۹۲۳	۴۹،۸۹۵

پس از آنکه میزان آب مصرفی برای روز موردنظر تعیین شد، نیاز است تا از میان مقادیر موجود در جدول ۳، یک عدد بر اساس نظر بهره‌بردار انتخاب شده تا بهینه‌سازی بر اساس آن صورت گیرد. در اینجا به طور مثال، مقدار ۴۹،۸۹۵ مترمکعب به عنوان مقدار انتخابی برای میزان مصرف آب در روز ۱۴۰۱/۳/۸ انتخاب شده است. حال بر اساس ضرایب آب مصرفی ساعتی (جدول ۱)، میزان مصرف ساعتی تعیین شده تا عملیات پمپاژ بر اساس آن و بر اساس تراز لحظه‌ای آب موجود در مخازن و با توجه به ساعات پرباری، میان‌باری و کم‌باری شروع به بهینه‌سازی نماید.

به منظور بهینه‌سازی، اگر ابتدای روز ۱۴۰۱/۳/۸ مدنظر بوده (ساعت ۰۰:۰۰) و نیاز باشد تا عملیات پمپاژ بر اساس برنامه بهینه زمان‌بندی ارائه شود، تراز لحظه‌ای آب مخزن پایین‌دست (۱۰،۰۰۰ پادگان) توسط سامانه تله‌متری دریافت شده و بر اساس آن تعداد پمپ‌های بهینه که باید در هر یک از ساعات روشن باشند، ارائه می‌شود. به طور مثال فرض می‌شود که تراز لحظه‌ای آب در مخزن پایین‌دست، ۲ متر باشد. از طرفی به دلیل هزینه‌های تعمیر و نگهداری ایستگاه پمپاژ، پمپ‌ها نباید مداوم خاموش و روشن شوند بنابراین یک پارامتر دیگر به نام تناوب تغییر حالت پمپ‌ها تعریف شده که این پارامتر بیان می‌کند در روند بهینه‌سازی، پمپ‌ها چندساعت یکبار اجازه تغییر حالت (از روشن به خاموش یا برعکس) را دارند. مطابق با آنچه گفته شد برنامه بهینه زمان‌بندی برای روز مذکور مطابق با شکل ۸ و تراز آب موجود در مخزن پایین‌دست با توجه به شکل ۸، در شکل ۹ ارائه شده است. مطابق با شکل ۸ ملاحظه می‌شود که پارامتر تناوب تغییر حالات پمپ‌ها ۴ ساعته انتخاب شده است.



شکل ۸- تعداد پمپ‌های بهینه برای روشن شدن در تمامی ساعات برای تاریخ ۱۴۰۱/۳/۸ و با تعریف پارامتر تناوب تغییر حالات ۴ ساعته پمپ‌ها (تراز آب موجود در مخزن پایین دست برابر با ۲ متر)



شکل ۹- تراز آب در مخزن پایین دست متناظر با میزان آب پمپاژ شده (حاصل از شکل ۸)

با توجه به شکل ۸، از ساعت ۰۰:۰۰ تا ۰۳:۵۹ هر سه پمپ باید روشن شوند تا نیاز مشترکین کاملاً تأمین شود. از ساعت ۰۴:۰۰ تا ۰۷:۵۹ یکی از سه پمپ خاموش شده و پمپاژ با ۲ پمپ به کار خود ادامه می‌دهد. حال در ساعت ۰۸:۰۰ نیاز است تا بهینه سازی تعیین کند که چه تعداد پمپ باید در بازه ۰۸:۰۰ تا ۱۱:۵۹ روشن باشند. از آنجا که تعداد پمپ‌ها همان ۲ عدد می‌باشد بنابراین در این بازه زمانی نیز تغییر حالتی اتفاق نمی‌افتد. از ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۵:۵۹ یک پمپ دیگر خاموش شده و عملیات پمپاژ تنها با یک پمپ ادامه می‌یابد. رأس ساعت ۱۶:۰۰ (جز ساعات پرمصرف آب شبانه‌روز هستند)، نیاز است تا دو پمپ دیگر روشن شده و عملیات پمپاژ با هر سه پمپ ادامه یابد. رأس ساعت ۲۰:۰۰، با توجه به آنکه تراز آب در مخزن پایین دست (شکل ۹) در حال کاهش است ولی بهینه‌سازی تعیین کرده که نیاز نیست هیچ پمپی روشن شود و باید نیاز مشترکین فقط از آب موجود در مخزن تأمین شود. بدین ترتیب از ساعت ۲۰:۰۰ تا ۲۳:۵۹ تراز آب با توجه به مصرف مشترکین، کاهش یافته ولی همچنان کمتر از تراز مجاز حداقل (۱ متر) نشده است که دسته قید دوم مدل بهینه‌ساز نیز ارضا شده است. هنگامی که روز ۱۴۰۱/۳/۸ تمام شود مجدداً برنامه تهیه‌شده در ابتدای روز بعد (رأس ساعت ۰۰:۰۰ روز ۱۴۰۱/۳/۹) اقدام به بهینه‌سازی برای آن روز نموده و برنامه بهینه زمان‌بندی جدید ارائه می‌شود. شایان ذکر است شروع بهینه‌سازی می‌تواند در هر یک از ساعات دیگر شبانه‌روز و با هر تراز آب مخزن پایین دست دیگری نیز صورت پذیرد.

شایان ذکر است که هزینه برق مصرفی ایستگاه پمپاژ آزادگان برای بازه مذکور ۱۵۲ روزه بر اساس قبوض صادر شده برابر با ۳۸۲،۴۱۶،۰۹۰ ریال بوده که در جدول ۴، میزان هزینه برق مصرفی عملیات پمپاژ و میزان بهبود آن با استفاده از بهینه‌سازی MILP نسبت به حالت بهره‌برداری سنتی ارائه شده است.

جدول ۴- بهبود هزینه برق مصرفی ایستگاه پمپاژ نجف‌آباد نسبت به حالت بهره‌برداری سنتی انجام شده در بازه ۱۵۲ روزه مذکور

پارامتر تناوب تغییر حالت پمپ‌ها	۱ ساعته	۲ ساعته	۳ ساعته	۴ ساعته	۶ ساعته	۸ ساعته
میزان بهبود	٪ ۱/۲	٪ ۴/۹	٪ ۶/۳	٪ ۷/۷	٪ ۹/۲	٪ ۱۳/۳
هزینه نهایی برق مصرفی (ریال)	۳۷۷,۸۲۷,۰۹۶	۳۶۳,۶۷۷,۷۰۱	۳۵۸,۳۲۳,۸۷۶	۳۵۲,۹۷۰,۰۵۱	۳۴۷,۲۳۳,۸۰۹	۳۳۱,۵۵۴,۷۵۰

۵- نتیجه گیری:

هدف اصلی پژوهش حاضر پیش‌بینی آب مصرفی روزانه در شبکه‌های توزیع آب شهری بر اساس برخی روش‌های هوش مصنوعی، رگرسیون و میانگین متحرک ساده بوده تا بر اساس مقدار پیش‌بینی شده، بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی پمپاژ صورت گرفته و در نهایت هزینه‌های برق مصرفی عملیات پمپاژ کاهش یابد. بدین منظور از شبکه آب شهری نجف‌آباد برای بررسی نتایج استفاده شده است.

در طرح حاضر، بر اساس صلاحیت و انتخاب بهره‌بردار شبکه، می‌توان پارامتر تغییر تناوب پمپ‌ها را از ۴ ساعته به ۱، ۲، ۳، ۶، ۸، ۱۲ و یا ۲۴ ساعت تغییر داد. مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن است که هرچه مقدار این پارامتر کاهش یابد هزینه‌های تعمیر و نگهداری پمپ‌ها به دلیل خاموش و روشن شدن‌های مکرر در گام‌های زمانی کوتاه افزایش یافته ولی هزینه‌های برق مصرفی پمپاژ کاهش می‌یابد. این در حالی است که هرچه مقدار این پارامتر افزایش یابد هزینه‌های تعمیر و نگهداری پمپ‌ها کاهش یافته ولی هزینه‌های برق مصرفی پمپاژ افزایش می‌یابد. بنابراین، باید با انتخاب مقدار مناسب برای این پارامتر، تعادلی بین هزینه‌های تعمیر و نگهداری با هزینه‌های برق مصرفی پمپاژ برقرار شود که تعیین آن بر عهده بهره‌بردار بوده ولی مقدار ۴ ساعت یا ۶ ساعت با توجه به کاهش قابل قبول هزینه برق مصرفی و همچنین انتخاب گام زمانی مناسب برای بهبود هزینه‌های تعمیر و نگهداری پمپاژ، توصیه می‌شود.

به علاوه، برنامه این قابلیت را دارد که پس از انجام عملیات پیش‌بینی، بر اساس مقادیر پارامترهای RMSE و MSE حاصل از پیش‌بینی، به صورت هوشمند به بهره‌بردار پیشنهاد دهد که از میان روش‌های موجود، کدام روش دقت بیشتری داشته تا بهره‌بردار یک مقدار را برای بخش بهینه‌سازی انتخاب نماید. شایان ذکر است در حالی که نتایج بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی پمپ‌های دور متغیر نسبت به پمپ‌های دور ثابت منجر به هزینه‌های کمتر انرژی مصرفی می‌شود ولی در اینجا با انتخاب مدل بهینه‌سازی مناسب، هزینه‌های انرژی مصرفی پمپاژ بر اساس انتخاب مقدارهای مختلف برای پارامتر تناوب تغییر حالات پمپ‌ها،

از ۱/۲ تا ۱۳/۳٪ کاهش یافت که مقدار قابل توجهی برای کاهش هزینه‌های برق مصرفی در ایستگاه‌های پمپاژ شبکه‌های آب شهری با پمپ‌های دور ثابت می‌باشد.

۶-قدردانی:

بدین‌وسیله از جناب آقایان مهندس حسین اکبریان، مهندس کاظم جعفری، مهندس سید محسن صالح، سرکار خانم مهندس زهره صهبایی، آقایان مهندس یونس کاظمی و مهندس سیاوش زندی و خانم دکتر سمانه کارگر کمال تشکر را داریم.

۷-پی‌نوشت‌ها:

- 1-Moving Average
- 2-Multi Layer Perceptron
- 3-Raial Basis Function
- 4-Support Vector Regression
- 5-Auto Regressive Integrated Moving Average
- 6-Ant Colony Optimization
- 7-Demand Driven Simulation Method
- 8-Head Driven Simulation Method
- 9-Simple Genetic Algorithm
- 10-Fast Messy Genetic Algorithm
- 11-Pressure Reducing Valves
- 12-Pump as Turbines
- 13-Deep Reinforcement Learning
- 14-Ensemble Empirical Mode Decomposition
- 15-Difference Pattern Sequence Forecasting
- 16-Root Mean Square Error
- 17-Mean Absolute Error
- 18-Mean Percentage Absolute Error
- 19- Convolutional Neural Network
- 20-Mixed Integer Linear Programming

۸-مراجع:

بابایی، ن.، تابش، م.، و نظیف، س.، (۱۳۹۶)، "بهینه‌سازی کیفیت آب در شبکه‌های توزیع بر اساس وضعیت دور پمپ، نحوه تزریق کلر و نوع روش تحلیل"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۸(۲)، ۵۵-۶۴، <https://doi.org/10.22093/wwj.2017.16401>

دینی، م.، همتی، م.، و هاشمی، س.، (۱۴۰۰)، "بیشینه‌سازی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب شهر خمام با برنامه‌ریزی بهینه تعداد و سرعت پمپ‌ها"، *مجله آب و فاضلاب*، ۳۲(۶)، ۳۶-۴۷، <https://doi.org/10.22093/wwj.2021.275013.3118>

شکفته، م.ر.، جلیلی قاضی‌زاده، م.ر.، و یزدی، ج.، (۱۳۹۹)، "تئوری شناسایی محدوده‌ی نشت در نواحی مجزای مجزای شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی"، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۶(۳)، ۴۷-۶۲، https://www.iwrr.ir/article_108525.html?lang=fa

کرمی، ج.، مقدم، ع.، فرید حسینی، ع.، ثنایی نژاد، ح.، و ضیایی، ع.ن.، (۱۳۹۶)، "بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از ابزار Darwin Scheduler"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۲(۱)، ۳-۱۲، <https://doi.org/10.22112/JWWSE.2017.87910.1006>

مطیعی، ه.، قاسم‌نژاد، س.، (۱۳۹۶)، "کاربرد و توسعه مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی میزان شکست لوله‌های شبکه توزیع آب شهری - مورد مطالعاتی ناحیه یک منطقه یک تهران"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۲(۲)، ۴۸-۵۸، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2017.89374.1024>

نصراللهی، ح.، صفایی بروجنی، ر.، و صالح، س.م.ح.، (۱۴۰۰)، "بهینه‌سازی فشار-انرژی در شبکه توزیع آب (مطالعه موردی: شهر بهارستان اصفهان)"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۶(۴)، ۳۲-۴۴، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2021.277877.1264>

Adamowski, J., and Karapataki, C., (2010), "Comparison of multivariate regression and artificial neural networks for peak urban water-demand forecasting: evaluation of different ANN learning algorithms", *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(10), 729-743, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000245).

Alharsha, I., Memon, F.A., Farmani, R. and Hussien, W.E.A., (2022), "An investigation of domestic water consumption in Sirte, Libya", *Urban Water Journal*, 19(9), 922-944, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2105239>.

Basnet, L., Brill, D., Ranjithan, R. and Mahinthakumar, K., (2023), "Supervised Machine Learning Approaches for Leak Localization in Water Distribution Systems: Impact of

Complexities of Leak Characteristics”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 149(8), p.04023032, <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6047>.

Buhmann, M. D., (2000), “Radial basis functions”, *Acta Numerica*, Cambridge University Press, 9, 1–38, <https://doi.org/10.1017/S0962492900000015>.

Fernández García, I., Ferras, D. and Mc Nabola, A., (2019), “Potential of energy recovery and water saving using micro-hydropower in rural water distribution networks”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(3), p.05019001, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001045](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001045).

Gardner, M.W., and Dorling, S.R., (1998), “Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—a review of applications in the atmospheric sciences”, *Atmospheric environment*, 32(14-15), 2627-2636, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00447-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00447-0).

Hajgató, G., Paál, G. and Gyires-Tóth, B., (2020), “Deep reinforcement learning for real-time optimization of pumps in water distribution systems”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(11), p.04020079, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001287](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001287).

Hansun, S., (2013), “A new approach of moving average method in time series analysis”, In: *2013 conference on new media studies (CoNMedia)*, IEEE, 1-4, <https://doi.org/10.1109/CoNMedia.2013.6708545>.

Pandey, P., Bokde, N.D., Dongre, S. and Gupta, R., (2021), “Hybrid models for water demand forecasting”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(2), p.04020106, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001331](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001331).

Rapp, A.H., Capener, A.M. and Sowby, R.B., (2023), “Adoption of Artificial Intelligence in Drinking Water Operations: A Survey of Progress in the United States”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 149(7), p.06023002, <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-5870>.

Smola, A.J., and Schölkopf, B., (2004), “A tutorial on support vector regression”, *Statistics and computing*, 14, 199-222, <https://doi.org/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88>.

Topalli, A.K., Erkmen, I., and Topalli, I., (2006), “Intelligent short-term load forecasting in Turkey”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 28(7), 437-447, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.02.004>.

پذیرفته شده / ویرایش نشده