University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 56 (2026), Issue 3, 11-25

EXTENDED ABSTRACT

Prediction of Nodal Pressure Variations in Ahar and Oshnavieh Water Distribution Networks Using Multiple Linear Regression Model

Mehdi Dini [a,*], Roghayeh Mashhadi Alizadeh [b], Akbar Shirzad [c]

[a] *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Madani University of Azerbaijan, Tabriz, Iran*
[b] *M.Sc. Student, Faculty of Engineering, Shahid Madani University of Azerbaijan, Tabriz, Iran*
[c] *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran*

Received: 10 September 2025; **Reviewed:** 30 August 2026; **Accepted:** 06 September 2026

Keywords:
Multiple linear regression model, Prediction, Water distribution network, Nodal pressure, Ahar, Oshnavieh.

1. Introduction

Modeling nodal pressure data in Water Distribution Networks (WDNs) is necessary to understand the current state of the network and to provide recommendations based on existing conditions with a view to future horizons. In this research, the prediction of nodal pressure variations in WDNs is studied using a multiple linear regression model, based on variations in topographic and geometric indicators, which is considered a research innovation. For this purpose, more than 5,500 data points were collected from 22 stations in the Ahar WDN and 12 stations in the Oshnaviyeh WDN and were analyzed. The input variables for the model were selected based on a correlation coefficient analysis, and the relationships between the variables were determined using SPSS software. Statistical indices, including R_{xy} and NMSE were used to evaluate the performance of the multiple linear regression model.

2. Methodology

In this research, field data, including nodal pressure values at pressure-meter stations, were collected every 15 minutes for the Ahar WDN and every 10 minutes for the Oshnavieh WDN and were then arranged hourly. Using these data, during the data-recording period, the hourly average (PAve), minimum (PMin), maximum (PMax), median (PMed), and mode (PMod) pressure values were calculated. To determine the relationship between nodal pressure variations and physical and geometric indicators of the network at the pressure stations, several indicators were defined: the closest distance to the reservoirs (*L*); average diameter of the access path to the reservoirs (*D*); height difference from the reservoirs (*E*); average Hazen-Williams coefficient along the access path to the reservoirs (CHWa); and average resistance along the access path to the reservoirs (*Ra*) at the pressure stations. To examine the relationships between these variables, the correlation coefficients between them were calculated, and the variables with high correlation coefficients were selected from among the independent and dependent variables to determine the multiple linear regression relationships. To compare the performance of the regression models, the normalized mean square error (NMSE) and the correlation coefficient (*Rxy*) were used. Because of the large amount of data, covering 24 hours of the day, the

Publisher: Vice Chancellery for Research & Technology, University of Tabriz
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2026.69057.2453
Online ISSN: 2717-4077
* Orcid Code Corresponding Author: 0000-0002-1767-5528
E-mail addresses: mehdini@gmail.com (Mehdi Dini), rogaie1373@gmail.com (Roghayeh Mashhadi Alizadeh), a.shirzad@uut.ac.ir (Akbar Shirzad).

results for the hours with minimum, maximum, and average water consumption were compared. The research methodology diagram is shown in Fig. 1.

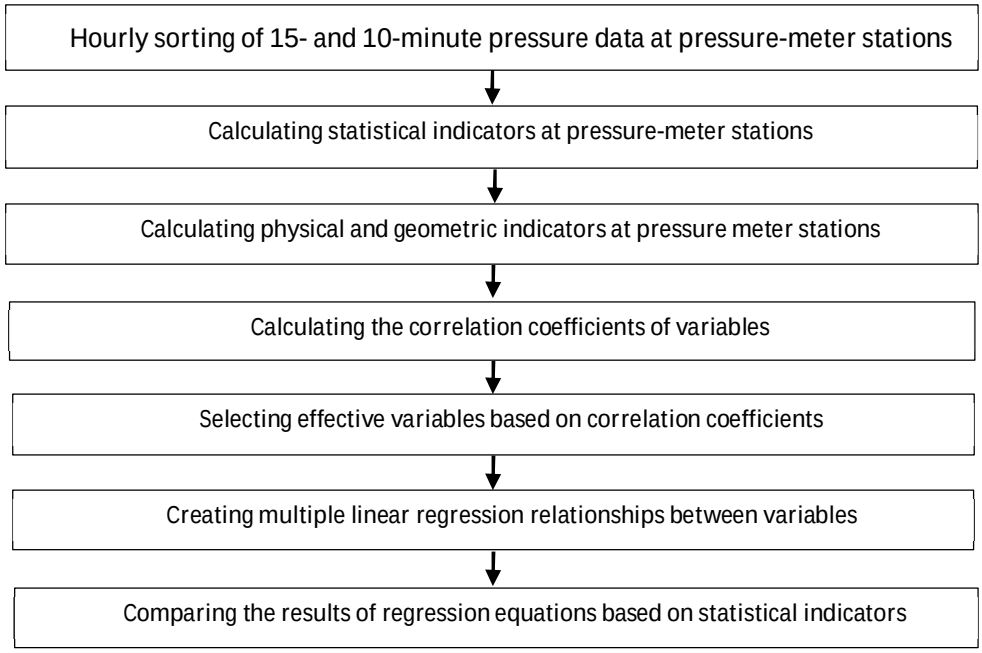


Fig. 1. Diagram of research methodology

In this research, the Ahar and Oshnavieh WDNs were used as a case study. The simplified Ahar WDN has 192 pipes, 169 nodes and one reservoir, five tanks and 30 stations, which is shown in Fig. 2. The simplified Oshnavieh WDN has 1960 pipes, 1920 nodes, eight wells, two tanks, and 12 measuring stations, as shown in Fig. 3.

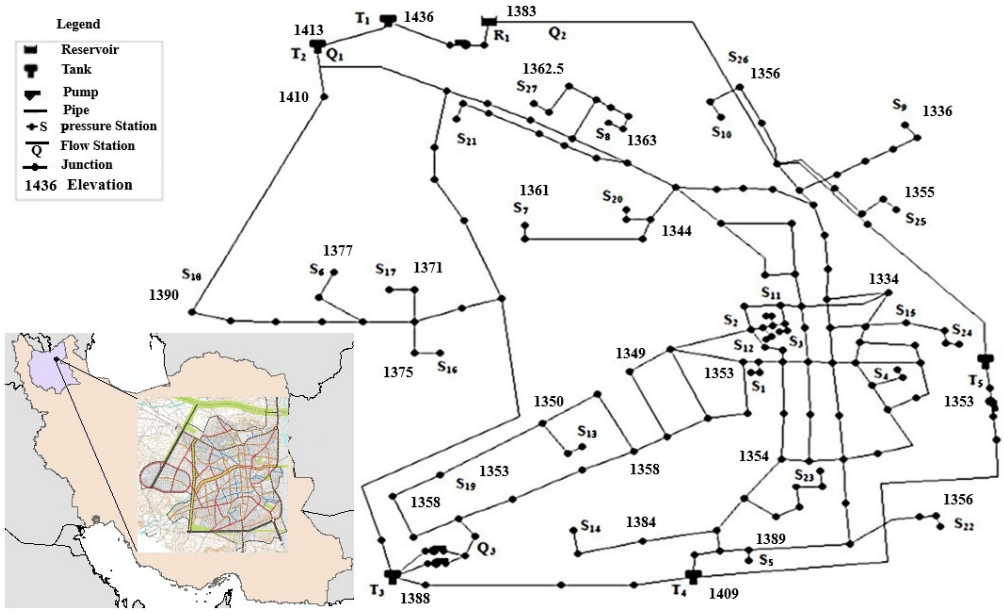


Fig. 2. Schematic structure of Ahar WDN



Fig. 3. Schematic structure of the Oshnavieh WDN

3. Results and discussion

In this research, the multiple regression method was used to model nodal pressure variations based on various topographic variables of pressure-meter stations with respect to the reservoirs. By analyzing the correlation coefficients of the variables, the most suitable independent and dependent variables were selected, and the relationship between them was obtained using multiple linear regression in SPSS. Modeling was performed for the Ahar and Oshnavieh WDNs.

3.1. Ahar WDN

Multiple regression equations between selected dependent and independent variables in the Ahar WDN were obtained using SPSS software. The best equation for the average nodal pressure at the minimum, maximum, and average consumption states is shown in Equations 1 to 3.

$$P_{Ave} = -45.727 - 0.003*L + 0.131*D + 0.590*C_{HWa} + 0.692E \quad \text{Min consumption} \quad (1)$$

$$P_{Ave} = -227.787 + 0.000*L + 0.248*D + 2.041*C_{HWa} + 0.551*E \quad \text{Max Consumption} \quad (2)$$

$$P_{Ave} = -108.672 - 0.001*L + 0.175*D + 1.022*C_{HWa} + 0.596*E \quad \text{Ave Consumption} \quad (3)$$

To compare the results of the multiple lineae regression model, the average nodal pressure for different consumption modes was calculated, and the results were compared with the field data using the statistical indicators Normalized Mean Square Error (NMSE) and correlation coefficient (*Rxy*). The names of the models are based on their independent input variables. For example, the LDE model uses the closest distance to the reservoirs (*L*), the average diameter of access to the reservoirs (*D*), and the height difference from the reservoirs (*E*) as inputs. Table 2 shows the values of the statistical indicators for the nodal pressure linear regression model.

Tab. 1. Comparison of the results of the average nodal pressure in different modes

	Ave Consumption			Max Consumption			Min Consumption		
	$LDC_{HWa}E$	$LC_{HWa}E$	*LDE*	$LDC_{HWa}E$	$LC_{HWa}E$	*LDE*	$LDC_{HWa}E$	$LC_{HWa}E$	*LDE*
NMSE	0.30	0.37	0.34	0.34	0.49	0.45	0.30	0.32	0.29
R_{xy}	0.93	0.79	0.81	0.81	0.71	0.73	0.84	0.83	0.84

Based on the results in Table 1 and by comparing the statistical indicators, models with lower normalized mean square error (NMSE) values and higher correlation coefficients (*Rxy*) have generally been selected as the best models. Specifically, the model with four independent input variables, designated as the LDCHWaE model, yielded the best results, as it exhibited the lowest normalized mean square error (with an average of 0.31) and the highest correlation coefficient (with an average of 0.82) across different consumption modes.

3.2. Oshnavieh WDN

Based on the independent and dependent variables selected from the analysis of correlation coefficients in the Oshnavieh WDN, multiple regression equations were derived using SPSS software. The best-performing equations for the average nodal pressure in the minimum, maximum, and average consumption modes are presented in Equations 4 to 6.

$$PAve = -71.993-0.004*L+0.075*D+0.476*\text{CHWa}+0.904*E \quad \text{Min consumption} \quad (4)$$

$$PAve = -233.948-0.014*L+0.261*D+1.498*CHWa+0.655*E \quad \text{Max Consumption} \quad (5)$$

$$PAve = -101.526-0.008*L+0.103*D+0.668*CHWa+0.914*E \quad \text{Ave Consumption} \quad (6)$$

To compare the results of the multiple regression model, the average nodal pressure for different consumption modes was calculated, and the results were compared with the field data using the statistical indicators Normalized Mean Square Error (NMSE) and correlation coefficient (*Rxy*). The results are presented in Table 2.

Tab. 2. Comparison of the results of the average nodal pressure in different modes

	Ave Consumption			Max Consumption			Min Consumption		
	$LDC_{HWa}E$	$LC_{HWa}E$	*LDE*	$LDC_{HWa}E$	$LC_{HWa}E$	*LDE*	$LDC_{HWa}E$	$LC_{HWa}E$	*LDE*
NMSE	0.11	0.13	0.19	0.49	0.62	0.8	0.05	0.06	0.08
R_{xy}	0.94	0.93	0.89	0.68	0.57	0.36	1.0	1.0	1.0

Based on the results in Table 2, the model with four independent input variables (LDCHWaE) generally demonstrates the best performance. A comparison of the evaluation indices in the table shows that this model has the lowest normalized mean square error (NMSE) across different consumption modes, with an average value of 0.22, and the highest correlation coefficient (*Rxy*), with an average value of 0.87.

4. Conclusions

In this study, the multiple regression method was used to predict pressure variations in WDNs based on various geometric and topographic variables of pressure-meter stations with respect to the reservoirs. For this purpose, field data including pressure values at 22 stations of the Ahar WDN and 12 stations of the Oshnavieh WDN were collected. From these data, variables with higher correlation coefficients, such as the independent variables of closest distance to the reservoirs (*L*), average diameter of access to the reservoirs (*D*), height difference from the reservoirs (*E*), and average Hazen-William's coefficient of access to the reservoirs (CHWa), and the dependent variable of average nodal pressure (PAve), were selected to develop the multiple linear regression relationships using SPSS. To compare the performance of the multiple regression model, the statistical indicators of normalized mean square error (NMSE) and correlation coefficient (*Rxy*) were used, and the results for minimum, average, and maximum consumption hours were compared. The results showed that in the Ahar and Oshnavieh WDNs, for estimating variations in average nodal pressure under different consumption modes, the model with four independent input variables (LDCHWaE) showed the best performance. For the above model, the average correlation coefficient under different consumption modes for the Ahar and Oshnavieh WDNs was 0.82 and 0.87, respectively, which fall within the acceptable range. Based

on the findings of this study, the proposed model can be used as a simple and low-cost tool for the preliminary estimation of nodal pressure and for supporting management analyses of WDNs. However, to generalize the results to other networks, it is necessary to examine networks with different structures, topologies, and operating conditions.

پیش‌بینی تغییرات فشارگرهی در شبکه‌های توزیع آب شهر اهر و اشنویه با استفاده از مدل رگرسیون چندگانه خطی

مهدی دینی*[1]، رقیه مشهدی علیزاده[2]، اکبر شیرزاد[3]

[1] دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز
[2] دانشجوی کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز
[3] دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی ارومیه

دریافت: 1404/6/19، بازنگری: 1405/6/8، پذیرش: 1405/6/15، نشر آنلاین: 1405/6/15

چکیده

مدل‌سازی داده‌های فشار در شبکه‌های توزیع آب و تحلیل نتایج آن‌ها برای اطلاع از شرایط فعلی شبکه و ارائه برنامه‌های بهره‌برداری با نگاه به افق پیش‌رو ضروری می‌باشد. در این تحقیق، هدف پیش‌بینی تغییرات فشار در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از مدل رگرسیون چندگانه خطی مبتنی بر تغییرات شاخص‌های توپوگرافی، هندسی و هیدرولیکی است که برای بیش از 5500 داده جمع‌آوری شده در 22 ایستگاه شبکه توزیع آب اهر و 12 ایستگاه شبکه توزیع آب اشنویه به‌کار برده شده است که با توجه به نوع داده‌های تولید شده در قالب شاخص‌های توپوگرافی، هندسی و هیدرولیکی به‌عنوان نوآوری تحقیق به‌حساب می‌آید. متغیرهای ورودی مدل بر اساس تحلیل ضریب همبستگی بین متغیرها، انتخاب و روابط بین متغیرها با استفاده از نرم‌افزار SPSS به‌دست آمده است. برای تحلیل نتایج مدل رگرسیون چندگانه خطی از شاخص‌های آماری استفاده شده است. نتایج برای ساعت‌های کمینه، میانگین و بیشینه مصرف ارائه شده است، برای پیش‌بینی تغییرات میانگین فشار گرهی در حالت‌های مختلف، چهار متغیر فاصله از مخزن، قطر متوسط مسیر، اختلاف ارتفاع از مخزن و ضریب هیزن- ویلیامز (Hazen-William's) متوسط مسیر به‌عنوان متغیر مستقل با ضریب همبستگی بالا انتخاب شدند و مدل با چهار متغیر ورودی فوق، با ضریب همبستگی بیش از 0/85، بهترین عملکرد را به‌دست آورد.

کلیدواژه‌ها: پیش‌بینی، مدل رگرسیون چندگانه خطی، شبکه توزیع آب، فشار گرهی، اهر، اشنویه.

1- مقدمه

فشار گرهی یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیکی در شبکه‌های توزیع آب است که نقش اساسی در بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع آب دارد. تغییرات فشار گرهی بر کیفیت خدمات‌رسانی، میزان نشت، احتمال شکست لوله‌ها و مصرف انرژی تأثیر مستقیم دارد. پیش‌بینی دقیق تغییرات فشار گرهی می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت، بهره‌برداری و برنامه‌ریزی بازسازی و نوسازی شبکه‌های توزیع آب داشته باشد. سالانه هزینه‌های قابل توجهی صرف نصب تجهیزات برای اندازه‌گیری تغییرات فشار در شبکه‌های توزیع آب می‌شود. اما به‌دلیل گستردگی شبکه‌ها و هزینه بالای تأمین، نصب و نگهداری تجهیزات اندازه‌گیری، امکان ثبت فشار در تمامی گره‌های شبکه وجود ندارد. هدف از این پژوهش توسعه روش‌های کم هزینه‌تر برای تخمین تغییرات فشار در گره‌های شبکه بدون نیاز به تجهیزات اندازه‌گیری می‌باشد.

به‌طورکلی، برای برآورد تغییرات فشار گرهی در نقاط فاقد اندازه‌گیری، دو راهکار وجود دارد. راهکار اول، به‌کارگیری مدل‌های هیدرولیکی کالیبره شده و راهکار دوم، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی فشار است.

در پژوهش حاضر، از راهکار دوم و از مدل رگرسیون چندگانه خطی برای پیش‌بینی تغییرات فشار مبتنی بر شاخص‌های توپوگرافی و هندسی شبکه استفاده شده است که مطابق مطالعات

ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز شاپا الکترونیکی: 2717-4077
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2026.69057.2453
* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 09122769531
* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0002-1767-5528
آدرس ایمیل: mehdini@gmail.com (م. دینی)، rogaie1373@gmail.com (ر. مشهدی علیزاده)، a.shirzad@uut.ac.ir (ا. شیرزاد).

انجام شده دقت مناسبی برای تخمین فشار در گره‌های فاقد داده اندازه‌گیری دارند (Khoa، 2024).

در مسائل تجربی، روش‌های متعددی برای تخمین یک پارامتر از روی یک یا چندمتغیر وجود دارد. یکی از روش‌ها برای پیش‌بینی رفتار یک متغیر وابسته نسبت به متغیرهای مستقل، مدل رگرسیون خطی است. رگرسیون خطی نه تنها یکی از قدیمی‌ترین روش‌های پیش‌بینی است بلکه ساده‌ترین روش تشریح شده برای برازش نیز می‌باشد (Kotu و Deshpande، 2015). تکنیک‌های زیادی برای انجام تحلیل رگرسیون توسعه داده شده است که در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است.

Ghasemnejad و Motiei (2017) کاربرد و توسعه مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی میزان شکست لوله‌های شبکه توزیع آب در منطقه یک تهران را بررسی کردند، در این تحقیق، از چهار مدل رگرسیون آماری شامل مدل‌های رگرسیون خطی، نمایی، پواسون و لجستیک برای تحلیل میزان شکست لوله‌ها استفاده شده است که هدف، یافتن معادلات لازم برای تخمین احتمال شکست لوله‌ها در آینده می‌باشد. نتایج نشان دادند که مدل رگرسیون لجستیک عملکرد بهتری داشته و با احتمال بالاتری می‌تواند حوادث را پیش‌بینی کند.

Jafari و همکاران (2020) یک رویکرد جدید پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها در شبکه توزیع آب را با استفاده از مدل هیبرید هوشمند در شهر گرگان پیشنهاد دادند. در این تحقیق، از آمار دوره زمانی چهار ساله از سال 1394 تا 1397 که در آن مشخصات شبکه شامل قطر، طول، سن، عمق نصب و تعداد شکست لوله‌ها وجود دارد، استفاده شده است و سه مدل مختلف آماری شامل رگرسیون خطی، خطی تعمیم‌یافته، بردار پشتیبان و دو مدل هوشمند شامل شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خور و پایه شعاعی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که مدل‌های ترکیبی بهترین عملکرد را در پیش‌بینی نرخ شکست داشتند.

Athari و Motiei (2020) ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون لجستیک در پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها در شبکه توزیع آب منطقه یک تهران را بررسی کردند. برای ساخت مدل رگرسیون، 70 درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزش و 30 درصد به‌عنوان داده‌های تست انتخاب شدند. نتایج نشان داد که با اعمال شرایط جدید به‌وجود آمده در شبکه توزیع آب، مدل‌ها قادرند به‌خوبی حوادث احتمالی را پیش‌بینی و از رخداد حادثه و ایجاد شکستگی در شبکه جلوگیری کنند.

Karamouz و همکاران (2005) در پژوهشی با استفاده از شبیه‌سازی قسمتی از شبکه توزیع آب تهران در نرم‌افزار EPANET 2.0، به پیش‌بینی فشار در نقاط مصرف شبکه‌های آبرسانی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و ترکیب آن با منطق فازی پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن ارتفاع مخزن، ارتفاع نقطه و میزان مصرف به‌عنوان ورودی‌های مدل، نشان دادند که مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی و استنتاج فازی توانایی بالایی در پیش‌بینی فشار دارند و می‌توانند به‌عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت بهینه شبکه‌های توزیع آب و کاهش نشت مورد استفاده قرار گیرند.

Tabesh و همکاران (2021) در پژوهشی به طراحی بهینه مکان‌های نمونه‌برداری فشار برای کالیبراسیون مدل‌های هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب پرداختند. آن‌ها با هدف کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی فشار، از تحلیل حساسیت عمومی سوبول[1] برای تفکیک منابع خطا و الگوریتم ژنتیک چندهدفه MI-NSGA-II برای انتخاب نقاط بهینه استفاده کردند. معیارهای این الگوریتم شامل حداقل کردن هزینه‌های نمونه‌برداری و حداکثر کردن آنتروپی اطلاعات بود. نتایج مطالعه نشان داد که پارامتر زبری لوله نقش مؤثرتری در تعیین مکان‌های نمونه‌برداری دارد و اندرکنش بین پارامترهای ورودی نیز در انتخاب نقاط بهینه تأثیرگذار است.

Soltani Asl و Faghfoor Mogharebi (2009) در پژوهشی با مطالعه موردی منطقه سرافرازان مشهد، به‌مدیریت هوشمند فشار برای کاهش نشت در شبکه‌های آبرسانی پرداختند. آن‌ها با مدل‌سازی شبکه در نرم‌افزار EPANET 2.10 و تلفیق روش اندازه‌گیری جریان حداقل شبانه با تحلیل هیدرولیکی، یک برنامه زمانی برای تغییرات فشار خروجی شیر فشارشکن ورودی تعیین کردند. نتایج نشان داد که با این روش می‌توان نشت شبانه را تا حدود 35 درصد کاهش داد و توزیع فشار را در شبکه یکنواخت‌تر کرد. این مطالعه تأکید دارد که پیاده‌سازی الگوی زمانی فشار توسط شیرهای فشارشکن با قابلیت کنترل زمانی، راهکاری عملی و مؤثر برای کاهش تلفات آب در شبکه‌های شهری است.

Maashari و Jalili Ghazizadeh (2025) در پژوهشی به تعیین مکان‌یابی بهینه نقطه میانگین ناحیه (AZP)[2] برای فشارسنجی در شبکه‌های توزیع آب پرداختند. آن‌ها با تبدیل شبکه به گراف و تخصیص وزن به یال‌ها براساس افت انرژی و استفاده از الگوریتم دایکسترا[3] و یک تابع هزینه‌ای جدید، مکان بهینه نصب حسگر را مشخص کردند. نتایج این مطالعه بر روی شبکه‌های مرجع هانوی[4] و پولاکیس[5] نشان داد که این روش می‌تواند فشاری را به‌عنوان نماینده فشار متوسط ارائه دهد که

1. Sobol
2. Average Zone Point
3. Dijkstra's algorithm
4. Hanoi
5. Poulakis

خطای آن کمتر از 0/5 درصد است و باعث کاهش 93 درصدی خطای روش‌های متعارف می‌شود.

Shi و همکاران (2013) تحلیل رگرسیون عرضه آب شهری مبتنی بر تغییرات دما را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از ضریب همبستگی گشتاور پیرسون و روش تحلیل رگرسیون چندگانه بین عرضه آب شهری و دما در بازه سال 2008 تا سال 2009 رابطه ایجاد کردند. نتایج نشان داد که مدل رگرسیون ساخته شده، می‌تواند زمینه خوبی را برای پیش‌بینی دقیق تأمین آب شهری فراهم کند.

Haque و همکاران (2013) مدل رگرسیون مؤلفه اصلی با ترکیب رگرسیون چندگانه خطی و تحلیل مؤلفه اصلی را برای پیش‌بینی تقاضای آب در منطقه نیوساوت ولز[6] توسعه دادند. نتایج نشان داد که مدل رگرسیون مؤلفه اصلی توسعه‌یافته قادر به پیش‌بینی تقاضای آب با درجه دقت بالاتری است و بهتر از مدل رگرسیون چندگانه خطی عمل می‌کند (Shirzad و همکاران، 2014). به مقایسه عملکرد ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی نرخ ترکیدگی لوله در شبکه‌های توزیع آب پرداختند. آن‌ها داده‌های واقعی در دو منطقه در ایران را به‌کار بردند. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی بهتر از مدل ماشین بردار پشتیبان عمل می‌کند و استفاده از فشار گرهی متوسط به‌جای فشار گرهی ماگزیمم به‌عنوان یک متغیر ورودی منجربه بهبود عملکرد و افزایش دقت مدل‌ها می‌شود.

Kemba و همکاران (2017) روشی برای تشخیص مکان نشت در شبکه توزیع آب شهر تسومب[7] با استفاده از ماشین بردار پشتیبان (SVM)[8] و تابع پایه شعاعی (RBF)[9] ارائه دادند. داده‌های فشار به‌کار رفته برای آموزش و تست مدل‌ها، از نرم‌افزار EPANET به‌دست آمد و این داده‌ها به 540 مجموعه آموزش و 60 مجموعه تست تقسیم شدند. نتایج نشان داد که دقت تشخیص نشت در مدل‌ها حدود 90 درصد می‌باشد.

Dirican (2019) رابطه رگرسیون بین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب در منطقه آناتولی مرکزی ترکیه را در طول دوره آماری بین می 2013 و ژوئن 2014 را بررسی کردند. در مجموع دوازده داده میدانی جمع‌آوری شده از چهار ایستگاه در شهر سوشهری[10] در قالب 14 پارامتر فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی قرار گرفتند. همبستگی و رگرسیون خطی بین زوج‌های مختلف پارامترهای کیفیت آب، رابطه معنی‌دار بین پارامترها را نشان داد.

Robles-Velasco و همکاران (2020) پیش‌بینی شکست لوله‌ها در شبکه‌های آبرسانی با استفاده از روش رگرسیون لجستیک و بردار پشتیبان را بررسی کردند. روش پیشنهادی برای یک شبکه واقعی در کشور اسپانیا به‌کار برده شد که باعث کاهش معنی‌دار تعداد خرابی‌های غیرمنتظره در منطقه مطالعاتی گردید.

Gergely و همکاران (2021) بازسازی فشار گرهی در شبکه‌های توزیع آب را با شبکه عصبی مبتنی بر گراف انجام دادند. در این مقاله، فشار گرهی، گره‌های شبکه با اندازه‌گیری فشار در تعداد محدودی از گره‌ها و با استفاده از شبکه عصبی مبتنی بر گراف تخمین زده شد. عملکرد مدل پیشنهادی بر روی سه شبکه مطالعاتی با تعداد گره‌های مشاهداتی متفاوت در مقایسه با تعداد کل گره‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی فشار گرهی را با حداکثر خطای نسبی 5 درصد نسبت به مشاهده حداقل 5 درصد گره‌ها بازسازی می‌کند.

Elkharbotly و همکاران (2022) پیش‌بینی آب بدون درآمد با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مدل رگرسیون چندگانه خطی در مصر را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدل دقت بالایی در پیش‌بینی آب بدون درآمد دارد.

McMillan و همکاران (2023) پیش‌بینی موقعیت نشت در شبکه‌های توزیع آب را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی حافظه کوتاه‌مدت و فیلتر زمان واقعی کالمن[11] انجام دادند. آن‌ها در این مطالعه از مجموعه داده‌های بیش از 2000 زون مجزا در شمال یورکشایر[12] انگلستان استفاده کردند که شامل سری‌های زمانی جریان آب است که در فواصل 15 دقیقه‌ای برای یک دوره یک‌ساله ثبت شده است. نتایج نشان داد که چارچوب پیشنهادی روی مجموعه داده‌های تست برای پیش‌بینی موقعیت نشت عملکرد خوبی دارد.

Truong و همکاران (2024) شبکه عصبی مبتنی بر گراف را برای تخمین فشار در سیستم‌های توزیع آب به‌کار بردند. در این مطالعه، یک رویکرد ترکیبی شامل مدل‌سازی مبتنی بر فیزیک شبکه و شبکه‌های عصبی مصنوعی مبتنی بر گراف برای تخمین فشار گرهی شبکه توسعه یافته است. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی از عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های قبلی برخوردار است و به‌طور میانگین، کاهش خطای مطلق 40 درصدی در داده‌های تست را ایجاد می‌کند.

Santos-Ruiz و همکاران (2019) در پژوهشی، روشی مبتنی بر رگرسیون فرآیند گاوسی[13] برای تخمین فشار در تمام گره‌های شبکه توزیع آب با استفاده از داده‌های تعداد محدودی حسگر فشار ارائه دادند. مکان حسگرها به‌گونه‌ای انتخاب شد که بیشترین واریانس فشار را پوشش داده و کمترین حساسیت را به نویز اندازه‌گیری داشته باشند. نتایج آزمایش روی شبکه هانوی نشان داد که با تنها سه حسگر فشار، خطای تخمین فشار در گره‌های

6. New South Wales
7. Tsomb
8. Support Vector Machines
9. Radial Basis Function
10. Suşehri
11. Kalman
12. Yorkshire
13. GPR

اندازه‌گیری‌نشده با خطای ناشی از نویز حسگرهای فیزیکی قابل مقایسه است.

Shirzad و همکاران (2017) در پژوهشی روشی برای بهینه‌سازی هم‌زمان طراحی اولیه و زمان‌بندی بازسازی شبکه‌های توزیع آب در طول چرخه عمر آن‌ها ارائه دادند. آن‌ها این رویکرد را طراحی پویا[14] نامیدند که در آن قطر لوله‌ها در سال اول و زمان تعویض آن‌ها در سال‌های بعد، با در نظر گرفتن رشد تقاضا و افزایش زبری لوله‌ها تعیین می‌شود. این مدل از موتور بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ای چندهدفه، مدل تحلیل وابسته به فشار و مدل پیش‌بینی شکست لوله مبتنی بر SVM استفاده می‌کند. نتایج نشان داد که طراحی پویا در مقایسه با طراحی ایستا یا زمان‌بندی جداگانه بازسازی، شبکه‌هایی با قابلیت اطمینان بالاتر و هزینه کمتر ایجاد می‌کند.

Hajgató و همکاران (2021) روشی مبتنی بر شبکه‌های عصبی گرافی (GNN) برای بازسازی فشار گره‌ها در شبکه‌های توزیع آب ارائه دادند. آن‌ها از فیلترهای طیفی‌گرافی محلی برای استفاده از داده‌های محدود سنسورها استفاده کردند. نتایج روی سه شبکه نشان داد که مدل پیشنهادی با نسبت مشاهده 5%، می‌تواند فشار را با خطای نسبی حداکثر 5% بازسازی کند. همچنین مشخص شد که استفاده از وزن‌دهی اتصالات (بر اساس افت اصطکاک) نسبت به اتصالات باینری مزیت خاصی ندارد.

Mansoor و Vairavamoorthy (2005) از شبکه عصبی مصنوعی (MLP) برای تخمین جریان خروجی گره‌ها بر اساس فشار در شبکه‌های توزیع آب استفاده کردند. مدل‌های معمول تقاضامحور هستند و با کاهش فشار، جریان را تنظیم نمی‌کنند. این پژوهش، با آموزش ANN روی داده‌های گسترده فشار، جریان و ویژگی‌های ثانویه شبکه، تابعی وابسته به فشار برای جریان خروجی ارائه داد. مدل نهایی در تحلیل شبکه‌های مختلف عملکرد خوبی داشت و تغییرات جریان را در شرایط مختلف پیش‌بینی کرد.

Bagyalakshmi و همکاران (2026) روشی جدید برای تخمین فشار در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شبکه کانولوشن گرافی آگاه از بافت صحنه[15] ارائه دادند. داده‌ها از شبکه توزیع آب اوستربیک[16] هلند گرفته شد. پیش‌پردازش با فیلتر تطبیقی چندمقیاسی گوسی (AMGCoF)[17]، استخراج ویژگی با تبدیل موجک ژاکوبی فوریه کسری[18] و بهینه‌سازی با الگوریتم رقابت آموزشی[19] انجام شد. نتایج نشان داد روش پیشنهادی نسبت به‌روش‌های موجود به‌ترتیب 16/20%، 26/81% و 30/18% دقت بالاتر و RMSE[20] و MAE کمتری دارد.

Adamowski و Karapataki (2010) پیش‌بینی اوج تقاضای آب شهری در نیکوزیا[21] قبرس را با مقایسه رگرسیون چندمتغیره و سه نوع شبکه عصبی مصنوعی[22] با الگوریتم‌های یادگیری مختلف انجام دادند. داده‌های شش‌ساله تقاضا و متغیرهای هواشناسی (دما و بارش) برای دو منطقه تحلیل شد. نتایج نشان داد که روش ANN با الگوریتم Levenberg-Marquardt دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. همچنین مشخص شد که تقاضای اوج آب با وقوع بارش، همبستگی بیشتری نسبت به مقدار بارش دارد.

Ozuomba (2025) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی روی شبکه توزیع آب نیجریه، مصرف و فشار را با دقت بالا پیش‌بینی کرد. مدل MLP با R^2 برابر 0/96 برای مصرف و 0/95 برای فشار، عملکردی بهتر از جنگل تصادفی داشت و امکان نظارت بلادرنگ و کاهش تنش لوله‌ها را فراهم کرد.

Sattari و همکاران (2025) یک مدل پیش‌بینی برای ارزیابی ریسک شکست لوله در شبکه‌های توزیع آب شهری ارائه دادند که در آن، رگرسیون لجستیک یادگیری ماشین با ابزارهای هم‌پوشانی فازی سامانه اطلاعات جغرافیایی تلفیق شده است. این مدل متغیرهای کلیدی شامل قطر، طول، عمر و فشار داخلی لوله را در نظر می‌گیرد تا احتمال وقوع شکست را برآورد کند. داده‌های واقعی مربوط به شکست‌ها و مشخصات لوله‌ها، طی یک دوره هفت‌ساله از سال 1394 تا سال 1400 در منطقه یک شبکه توزیع آب تهران جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد که لوله‌های با قطر 60 تا 150 میلی‌متر، طول کمتر از 200 متر، عمر بین 15 تا 25 سال، و فشار بالای 60 متر ستون آب، به‌طور معناداری احتمال شکست بیشتری دارند.

براساس مرور ادبیات فنی در این بخش، در ارتباط با پیش‌بینی رفتار شبکه‌های توزیع آب، تحقیقات زیادی انجام شده است. در این تحقیق، هدف پیش‌بینی تغییرات فشار در گره‌های شبکه توزیع آب است. به‌طورکلی برای تعیین مقادیر فشار گرهی، راهکارهای مختلفی وجود دارد که شامل نصب تجهیزات اندازه‌گیری در گره‌های شبکه و ثبت تغییرات فشار گرهی است که با توجه به محدود بودن تعداد این تجهیزات به‌دلیل هزینه بالا، برای همه گره‌ها ممکن نیست، راهکار بعدی استفاده از مدل‌های هیدرولیکی کالیبره شده شبکه توزیع آب است که به‌واسطه آن بتوان مقادیر فشار گرهی در هر گره از شبکه را به‌دست آورد. این راهکار نیز نیاز به کالیبراسیون دقیق شبکه با تعداد کافی از داده‌های فشارسنجی دارد که تهیه داده‌های کافی نیاز به هزینه

14. Dynamic Design
15. SCAGCN
16. Oosterbeek
17. Adaptive Multiscale Gaussian Co-Occurrence Filtering
18. FFJWT
19. ECO
20. Normal Mean Square Error
21. Nicosia
22. ANN

بالا خواهد داشت. راهکار آخر، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی است که روش‌های مختلفی مانند رگرسیون، شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی ژنتیک و غیره به‌کار برده می‌شود. در این تحقیق، توانمندی مدل رگرسیون چندگانه خطی برای پیش‌بینی مقادیر فشار در گره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است؛ که با توجه به نوع داده‌های تولید شده در قالب شاخص‌های توپوگرافی، هندسی و هیدرولیکی و جمع‌آوری بیش از 5500 داده در 22 ایستگاه شبکه توزیع آب اهر و 12 ایستگاه شبکه توزیع آب اشنویه دارای نوآوری می‌باشد. برای برازش مدل رگرسیون چندگانه خطی پیش‌بینی فشار گرهی از نرم‌افزار EXCEL و SPSS و برای مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه از EPANET استفاده شده است. همچنین برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از شاخص‌های آماری میانگین مربع خطای نرمال (NMSE) و ضریب همبستگی (r_{XY}) استفاده شده است.

2- روش تحقیق

2-1- مطالعه موردی و داده‌ها

در این پژوهش، شبکه توزیع آب شهرهای اهر و اشنویه به‌عنوان مطالعه موردی به‌کار برده شده است که شکل شماتیک شبکه‌ها و موقعیت آن‌ها در نقشه ایران در شکل‌های (1) و (2) نشان داده شده است. علت انتخاب این دو شبکه، در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز تحقیق در آن‌ها می‌باشد. شبکه ساده شده شهر اهر دارای 192 لوله، 169 گره و یک مخزن، پنج تانک و 30 ایستگاه است. در این شکل، R_1 مخزن موجود در محل تصفیه‌خانه آب اهر با ظرفیت 5000 متر مکعب می‌باشد که تنها منبع تأمین آب شهر به‌حساب می‌آید. T_1 تا T_5 به‌ترتیب تانک‌های ذخیره آب موجود در شهر و Q_1، Q_2 و Q_3 موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری دبی و S_1 تا S_{27} موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری فشار را نشان می‌دهد. داده‌های فشار گرهی و دبی لوله‌ها در ایستگاه‌های اندازه‌گیری به‌صورت هر 15 دقیقه یک‌بار و برای بیش از یک هفته در فصل پاییز سال 1391 اندازه‌گیری شده است. داده‌های فشار گرهی و دبی لوله‌ها در ایستگاه‌های اندازه‌گیری به‌صورت هر 15 دقیقه یک‌بار و برای بیش از یک هفته در فصل پاییز سال 1391 اندازه‌گیری شده است و نتایج تنها برای ساعت‌های کمینه، بیشینه و میانگین مصرف یعنی در ساعات 4، 12 و 22 ارائه شده است. از بین 27 ایستگاه فشارسنجی موجود در شبکه، داده‌های 22 ایستگاه به‌غیراز ایستگاه‌های S_{11}، S_{15}، S_{18}، S_{19} و S_{26} که فشار آن‌ها ثبت نشده بود، مورد استفاده قرار گرفته است (Dini و Tabesh، 2019).

شبکه ساده شده شهر اشنویه دارای 1960 لوله، 1920 گره، هشت مخزن (چاه)، دو تانک و 12 ایستگاه اندازه‌گیری فشار است. در این شکل، R_1 تا R_8 موقعیت مخازن (چاه‌ها) و T_1 تانک ذخیره 2000 مترمکعبی، T_2 تانک ذخیره 5000 مترمکعبی و S_1 تا S_{12} موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری فشار را نشان می‌دهد. داده‌های فشار گرهی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری به‌صورت هر 10 دقیقه یک‌بار و برای بیش از دو هفته در فصل بهار و تابستان سال 1398 اندازه‌گیری شده است و نتایج تنها برای ساعت‌های کمینه، بیشینه و میانگین مصرف یعنی در ساعات 5، 13 و 24 ارائه شده است. تغییرات ضرایب الگوی مصرف ساعتی شبکه توزیع آب اهر و اشنویه در شکل (3) آورده شده است (Dini و Tabesh، 2014؛ Shirzad و همکاران، 2020). مطابق این شکل در شبکه توزیع آب اهر، حداقل ضریب الگوی مصرف در ساعت 4 صبح و حداکثر ضریب الگوی مصرف در ساعت 12 ظهر و در شبکه توزیع آب اشنویه، حداقل ضریب الگوی مصرف در ساعت 5 و حداکثر ضریب الگوی مصرف در ساعت 13 بعد از ظهر اتفاق می‌افتد.

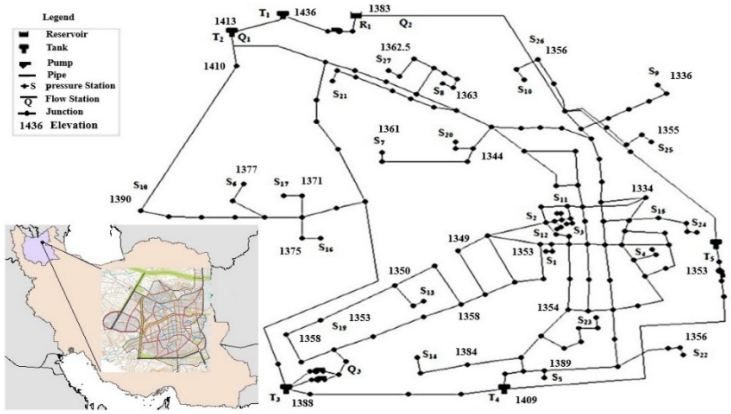
در جدول (1) و (2) مشخصات توپوگرافی ایستگاه‌های فشارسنجی نسبت به مخازن و تانک‌های موجود در شبکه توزیع آب شهر اهر و اشنویه آورده شده است. در این جداول L، D و E به‌ترتیب کوتاه‌ترین طول دسترسی از مخزن به ایستگاه، متوسط قطر دسترسی از مخزن به ایستگاه و اختلاف ارتفاع مخزن و ایستگاه می‌باشد.

$$\overline{X} = \frac{\sum_{j=1}^{m} fi\, Xi}{\sum_{j=1}^{m} fi} \quad (1)$$

$$M_d = L_{Md} + \frac{\frac{n}{2} - F}{f} * C \quad (2)$$

$$M_o = L_{Mo} + \frac{d1}{d1 + d2} * C \quad (3)$$

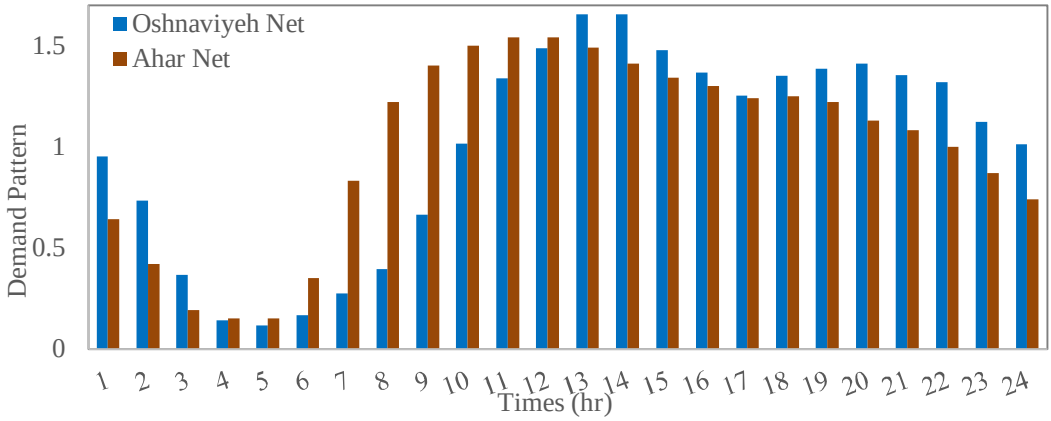
در فرمول فوق، $\bar{X}$ میانگین داده‌ها، fi فراوانی هر دسته، Xi نشان یا نماینده هر دسته، M_d میانه داده‌ها، L_{Md} کران پایین دسته میانه، f فراوانی دسته میانه، F فراوانی تجمعی قبل از دسته میانه، $\frac{n}{2}$ نصف فراوانی داده‌ها، C فاصله دسته میانه یا نما، M_o نمای داده‌ها، L_{Mo} کران پایین دسته نما، d_1 اختلاف فراوانی دسته نما و قبل از آن، d_2 اختلاف فراوانی دسته نما و بعداز آن است (Runnenburg، 1978).



شکل 1- شکل شماتیک شبکه توزیع آب اهر و موقعیت آن در نقشه ایران



شکل 2- شکل شماتیک شبکه توزیع آب اشنویه و موقعیت آن در نقشه ایران



شکل 3- ضرایب الگوی مصرف شبکه‌های توزیع آب اهر و اشنویه

جدول 1- مشخصات توپوگرافی شبکه توزیع آب اهر

شماره ایستگاه	R1			T4			T3			T2		
	E	D	L	E	D	L	E	D	L	E	D	L
S1	23	322/7	3820	56	256/6	1640	35	295/8	2200	60	287/9	3390
S2	34	319/4	3810	67	237/9	1720	46	295/9	2760	71	284/5	3250
S3	36	325/9	3350	69	246/3	2210	48	294/6	3740	73	284/7	3140
S4	19	324/8	3510	52	260/7	1750	31	297/0	2970	56	288/5	4160
S5	-13	312/3	4730	20	284/4	180	-1	285/9	4460	24	278/7	4870
S6	-1	295/2	6190	32	259/3	6620	11	234/4	2080	36	313/6	2620
S7	15	281/1	3000	43	213/6	3430	27	255/5	3840	52	300/5	2180
S8	13	268/7	3360	46	229/8	4230	25	259/8	3360	50	321/8	1700
S9	40	344/5	2075	73	243/3	4325	52	240/9	5975	77	252/9	3315
S10	19	359/2	1810	52	233/9	4420	31	226/3	5020	56	241/1	3360
S12	23	279/2	4670	56	263/5	1700	35	300/0	2060	60	286/6	3750
S13	23	291/0	5630	56	236/2	3270	35	224/1	1930	60	265/7	5420
S14	-11	271/3	5280	22	149/0	310	1	261/3	3630	26	265/4	5180
S16	1	271/1	4800	34	246/5	6390	13	248/6	1880	38	331/2	2420
S17	5	271/9	4780	38	247/1	6370	17	250/5	1860	42	333/3	2400
S20	32	301/9	2650	65	223/9	3080	44	268/8	3490	69	334/5	1830
S21	4	275/7	3270	32	213/8	3700	16	258/4	3730	41	308/1	2070
S22	20	274/7	4970	53	239/8	720	32	274/9	3580	57	276/0	5370
S23	21	257/8	5770	54	209/6	1960	33	249/9	3860	58	257/1	5410
S24	11	288/4	3020	44	232/2	2930	23	258/6	3350	48	259/8	4420
S25	21	339/2	1970	54	234/1	4430	33	234/2	6080	58	240/7	3420
S27	14	265/1	3430	47	227/5	4300	26	256/3	3430	51	312/6	1770

R_1: مخزن موجود در محل تصفیه‌خانه آب اهر با ظرفیت 5000 مترمکعب، T_2 تا T_4: تانک‌های ذخیره آب موجود در شهر، L: کوتاه‌ترین طول دسترسی از مخزن به ایستگاه، D: متوسط قطر دسترسی از مخزن به ایستگاه و E: اختلاف ارتفاع مخزن و ایستگاه

جدول 2- مشخصات توپوگرافی شبکه توزیع آب اشنویه

شماره ایستگاه	تانک T3905			تانک T1970		
	E	D	L	E	D	L
S1	57/4	214/1	3615	69/4	165/9	1904
S2	53/5	276/2	2535	65/5	296/6	1382
S3	1/1	255/2	3187	72/6	257/2	2034
S4	55/3	268/6	2695	67/3	281/4	1542
S5	46/8	246/2	2985	58/8	217/5	1274
S6	52/3	279/9	2440	64/3	305/2	1287
S7	54/6	241/3	2114	66/6	263/5	1874
S8	31/7	257/1	2813	43/7	233/7	985
S9	18/0	271/9	2153	30/0	288/6	443
S10	45/5	337/4	1213	57/5	222/2	1700
S11	41/7	400/0	678	53/7	205/5	1164
S12	55/3	268/6	2695	67/3	281/4	1542

2-2- شاخص‌های آماری، رگرسیون و ارزیابی مدل‌ها

2-2-1- شاخص‌های آماری

برای واکاوی داده‌های فشار گرهی، شاخص‌های آماری شامل میانگین، میانه و مد مورد استفاده قرار گرفته است که به‌صورت روابط (1) تا (3) ارائه شده است:

2-2-2- رگرسیون

روش رگرسیون از جمله روش‌های آماری برای بررسی و مدل‌سازی ارتباط بین متغیرها است. در این مبحث هدف اصلی تخمین ارتباط بین متغیرهای مستقل شامل شاخص‌های توپوگرافی و هندسی ایستگاه‌های فشارسنجی با متغیرهای فشار گرهی شبکه به‌عنوان متغیرهای مستقل می‌باشد. در این تحقیق، مدل رگرسیون چندگانه خطی به‌کار برده شده است که معادله آن به‌صورت رابطه (4) می‌باشد:

$$Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \cdots + a_nX_n \quad (4)$$

که در آن a_n ضرایب ثابت مدل رگرسیون است که از طریق نرم‌افزار SPSS تخمین زده می‌شود (Su و همکاران، 2012).

2-2-3- ارزیابی مدل‌ها

برای ارزیابی نتایج مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی، شاخص‌های ارزیابی میانگین مربعات خطای نرمال و ضریب

همبستگی (r_{xy}) به‌کار برده شده است. میانگین مربعات خطای نرمال میانگین مربع خطای نرمال به‌صورت رابطه (5) تعریف می‌شود که در آن $Y_{actuali}$ مقادیر داده‌های واقعی، var (y) واریانس داده می‌باشد. به‌دلیل این‌که مقدار این شاخص به‌تعداد داده‌ها وابسته نمی‌باشد از شاخص‌های خوب برای ارزیابی مدل‌ها می‌باشد. هرچه مقدار شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل عملکرد بهتری خواهد داشت (Poli و Cirillo، 1993).

$$NMSE = \frac{MSE}{var(Y_{actuali=1}{}^{n})} \quad (5)$$

ضریب همبستگی (r_{xy}) این ضریب یکی از معیارهای مورد استفاده در تعیین همبستگی بین دو متغیر است که شدت و نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) بین متغیرها را نشان می‌دهد. این ضریب بین 1- تا 1 است و در صورت عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است و طبق رابطه (6) تعریف شده است که در آن x_i و Y_i متغیرهای مورد بررسی و n تعداد داده‌ها می‌باشد (Asuero و همکاران، 2006).

$$r_{xy} = \frac{n\sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n\sum x_i{}^2 - (\sum x_i)^2][n\sum y_i{}^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (6)$$

2-3- هیدرولیک شبکه توزیع آب

هیدرولیک جریان در شبکه‌ها توزیع آب بر اساس قوانین بقای جرم، پایستگی انرژی و پایستگی اندازه حرکت تعریف می‌شود که در آن مبتنی بر قانون بقای جرم، معادله پیوستگی جریان در گره‌ها به‌صورت رابطه (7) تعریف می‌شود (Taebi و Chamani، 2014)، به‌طوری که در آن مجموع دبی‌های وردی و خروجی از یک گره باهم برابر هستند.

$$\sum_{i=1}^{n} A_i V_i = \sum_{j=1}^{m} A_j V_j \quad (7)$$

که در آن V سرعت جریان در لوله، A سطح مقطع لوله‌های ورودی به گره، n تعداد لوله‌های ورودی به گره و m تعداد لوله‌های خروجی از گره می‌باشد.

براساس قانون پایستگی انرژی، مجموع جبری افت هد در حلقه‌ها برابر صفر است و همچنین افت طولی هد در لوله‌ها از روابط دارسی- ویسباخ[23]، هیزن- ویلیامز و شزی- مانینگ[24] قابل محاسبه است. رابطه هیزن- ویلیامز یکی از متداول‌ترین روابط تجربی برای محاسبه افت هد ناشی از اصطکاک در لوله‌های تحت فشار است. این رابطه به‌دلیل سادگی، دقت مناسب و کاربرد گسترده در طراحی و تحلیل شبکه‌های توزیع آب شهری، در بسیاری از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله به‌صورت رابطه (8) می‌باشد (Taebi و Chamani، 2014)، که در آن Q دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)، L طول لوله (متر)، C_{HW} ضریب هیزن- ویلیامز و D قطر لوله (متر) می‌باشد (Jain و همکاران، 1978).

$$h_f = \frac{10.68LQ^{1/852}}{C_{HW}^{1.852}D^{4.87}} \quad (8)$$

در این تحقیق، برای مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب از نسخه EPANET2.01 و برای محاسبات آماری از نرم‌افزار اکسل EXCEL2010 و برای تخمین مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی از نرم‌افزار SPSS26 استفاده شده است.

2-4- روندنمایی تحقیق

در این تحقیق، داده‌های میدانی شامل مقادیر فشار ثبت‌شده در ایستگاه‌های فشارسنجی، از شرکت‌های آب و فاضلاب شهرستان‌های اهر و اشنویه دریافت شد. این داده‌ها برای شبکه توزیع آب اهر با گام زمانی 15 دقیقه و برای شبکه توزیع آب اشنویه با گام زمانی 10 دقیقه جمع‌آوری شده بودند که به‌منظور انجام تحلیل‌ها، به داده‌های ساعتی تبدیل و مرتب شدند برای این داده‌ها و در طول دوره زمانی ثبت اطلاعات، مقادیر میانگین (P_{Ave})، کمینه (P_{Min})، بیشینه (P_{Max})، میانه (P_{Med})، نما (P_{Mod}) فشار ساعتی محاسبه شده است. برای تعیین ارتباط بین تغییرات فشار گرهی با شاخص‌های فیزیکی و هندسی شبکه در ایستگاه‌های فشارسنجی چندین شاخص به صورت نزدیکترین فاصله به مخازن (L)، متوسط قطر دسترسی به مخازن (D)، اختلاف ارتفاع از مخازن (E)، متوسط ضریب هیزن- ویلیامز دسترسی به مخازن (C_{HWa}) و مقاومت متوسط لوله‌های مسیر به مخازن (Ra) در ایستگاه‌های فشارسنجی تعریف شد. برای بررسی ارتباط بین آن‌ها با همدیگر و با مقادیر فشار گرهی، ضرایب همبستگی بین آن‌ها محاسبه و متغیرهای با ضرایب همبستگی بالا از بین متغیرهای مستقل و وابسته برای تعیین روابط رگرسیون چندگانه خطی انتخاب شدند. برای مقایسه عملکرد مدل‌های رگرسیون ساخته شده از میانگین مربعات خطای نرمال و ضریب همبستگی (r_{xy}) استفاده شده است. با توجه به حجم زیاد داده‌ها شامل داده‌های 24 ساعته در طول شبانه‌روز، نتایج برای ساعت‌های کمینه، بیشینه و میانگین با همدیگر مقایسه شده است. روندنمایی کلی روش تحقیق در شکل (4) آورده شده است.

23. Darcy-Weisbach

24. Chezy-Manning



شکل 4- روند نمای روش تحقیق

3- نتایج و بحث

در این تحقیق، از روش رگرسیون چندگانه برای مدل‌سازی تغییرات فشار شبکه براساس متغیرهای مختلف توپوگرافی ایستگاه‌های فشارسنجی نسبت به مخازن استفاده شده است. برای این منظور، متغیرهای میانگین (P_{Ave})، کمینه (P_{Min})، بیشینه (P_{Max})، میانه (P_{Med})، نما (P_{Mod}) فشار گرهی به‌عنوان متغیرهای وابسته در ایستگاه‌های فشارسنجی و متغیرهای نزدیکترین فاصله به مخازن (L)، متوسط قطر دسترسی به مخازن (D)، اختلاف ارتفاع از مخازن (E)، متوسط ضریب هیزن- ویلیامز دسترسی به مخازن (C_{HWa}) و مقاومت متوسط لوله‌های مسیر به مخازن (Ra) به‌عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شده است. با تحلیل ضرایب همبستگی متغیرها، بهترین متغیرهای مستقل و وابسته انتخاب و روابط حاکم بر آن‌ها به‌روش رگرسیون چندگانه خطی و با نرم‌افزار SPSS به‌دست آمده است.

3-1- شبکه توزیع آب شهر اهر

در این بخش، نتایج تحلیل رگرسیون چندگانه خطی برای متغیرهای مستقل و وابسته مختلف در 22 ایستگاه فشارسنجی شبکه توزیع آب اهر در ساعات حداقل، حداکثر و متوسط مصرف بررسی شد. با توجه به حجم بالای نتایج و به‌منظور جلوگیری از طولانی شدن ارائه مطالب، در این بخش صرفاً نتایج مربوط به ساعت حداقل مصرف ارائه شده و نتایج سایر ساعات مصرف نیز به‌صورت مشابه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در شبکه توزیع آب اهر چند تانک و یک مخزن، تأمین آب شبکه را انجام می‌دهند که در بین آن‌ها با توجه به این‌که بیشتر ایستگاه‌های فشارسنجی تحت تأثیر تانک مرتبط با ایستگاه پمپاژ (T3) هستند و بیشترین ضریب همبستگی بین متغیرهای وابسته و مستقل نیز در این تانک وجود دارد، ضرایب همبستگی بین متغیرها در این ایستگاه بررسی شده است. در جدول (3-الف) ضرایب همبستگی متغیرهای مستقل نسبت به همدیگر، در جدول (3-ب) ضرایب همبستگی متغیرهای وابسته نسبت به همدیگر و در جدول (3) ضرایب همبستگی متغیرهای وابسته نسبت به متغیرهای مستقل آورده شده است. در مجموع، براساس نتایج جدول (3)، از بین متغیرهای مستقل (L: کوتاه‌ترین طول دسترسی از مخزن به ایستگاه، D: متوسط قطر دسترسی از مخزن به ایستگاه، E: اختلاف ارتفاع مخزن و ایستگاه، C_{HWa}: ضریب هیزن- ویلیامز و Ra: مقاومت متوسط لوله‌های مسیر به مخازن) با توجه به‌این‌که مقاومت متوسط لوله‌های مسیر دسترسی به مخزن با نزدیک‌ترین طول دسترسی به مخزن همبستگی بالا دارد از بین آن‌ها متغیر نزدیک‌ترین طول دسترسی به مخزن در کنار سایر متغیرها انتخاب شدند. در میان متغیرهای وابسته، متغیر فشار میانگین با متغیرهای دیگر مانند، فشار کمینه، بیشینه، میانه و نما همبستگی بسیار بالا دارد از این‌رو، تنها متغیر فشار میانگین برای تحلیل رگرسیون انتخاب می‌شود. دلیل حذف برخی متغیرهای مستقل و وابسته با خودهمبستگی بالا برای ساده‌سازی مدل رگرسیون چندگانه و محدود کردن متغیرهای به‌کار رفته به متغیرهای مؤثر می‌باشد.

جدول 3- ضرایب همبستگی متغیرهای مستقل و وابسته در حالت کمینه مصرف از شبکه

(الف) متغیرهای مستقل					
Ra	C_{HWa}	*E*	*D*	*L*	
0/81	0/47	-0/30	-0/45	1/00	L
-0/83	-۰/۱۴	۰/۱۶	۱/۰۰	-۰/۴۵	D
-0/16	-0/17	1/00	0/16	-0/30	E
0/26	1/00	-0/17	-0/14	0/47	C_{HWa}
1/00	0/26	-0/16	-0/83	0/81	Ra
(ب) متغیرهای وابسته					
P_{Mod}	P_{Med}	P_{Max}	P_{Min}	P_{Ave}	
1/00	1/00	0/97	1/00	1/00	P_{Ave}
1/00	1/00	0/95	1/00	1/00	P_{Min}
0/96	0/96	1/00	0/95	0/97	P_{Max}
1/00	1/00	0/96	1/00	1/00	P_{Med}
1/00	1/00	0/96	1/00	1/00	P_{Mod}
(ج) متغیرهای مستقل و وابسته					
Ra	C_{HWa}	*E*	*D*	*L*	
-0/37	-0/24	0/76	0/19	-0/54	P_{Ave}
-0/37	-0/24	0/76	0/20	-0/55	P_{Min}
-0/30	-0/23	0/73	0/09	-0/50	P_{Max}
-0/38	-0/23	0/75	0/21	-0/55	P_{Med}
-0/39	-0/23	0/76	0/22	-0/56	P_{Mod}

براساس متغیرهای مستقل و وابسته انتخاب شده از تحلیل ضرایب همبستگی در جدول (3-الف) و (3-ب) و نتایج ضرایب همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته در جدول (3-ج)، متغیرهای مستقل شامل طول، قطر، ارتفاع و ضریب هیزن- ویلیامز به‌عنوان متغیرهای ورودی و فشار میانگین به‌عنوان متغیر خروجی درنظر گرفته شدند. بر این اساس، مدل‌های رگرسیون سه ورودی شامل *LDE* و $LC_{HWa}E$ و مدل چهار ورودی $LDC_{HWa}E$ برای مدل‌سازی ارتباط بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته و پیش‌بینی رفتار فشار شبکه انتخاب شدند. از بین این مدل‌ها معادلات رگرسیون چندگانه خطی بین متغیرهای وابسته و مستقل منتخب با استفاده از نرم‌افزار SPSS به‌دست آمد که از بین همه مدل‌ها، بهترین آن‌ها برای میانگین فشار گرهی (P_{Ave}) و همچنین حالت‌های کمینه، بیشینه و میانگین مصرف در روابط (9) تا (11) آورده شده است.

$$PAve=-45.727-0.003*L+0.131*D+0.590*CHWa+0.692E \quad \text{کمینه مصرف} \quad (9)$$

$$PAve = -227.787 +0.000*L +0.248*D +2.041*CHWa +0.551*E \quad \text{بیشینه مصرف} \quad (10)$$

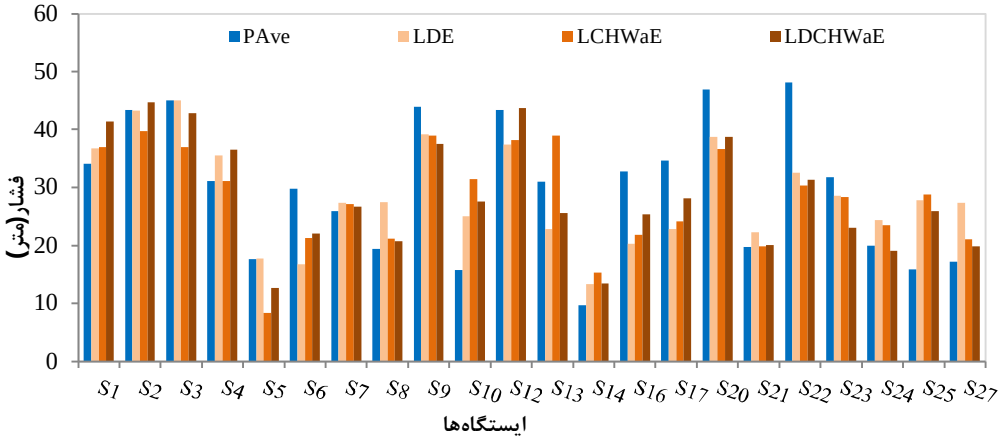
$$PAve = -108.672 -0.001*L +0.175*D +1.022* CHWa +0.596*E \quad \text{میانگین مصرف} \quad (11)$$

برای مقایسه نتایج خروجی مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی، متناسب با متغیرهای مستقل به‌کار رفته، مقادیر محاسباتی میانگین فشار گرهی برای حالت‌های مختلف مصرف شامل کمینه، بیشینه و میانگین مصرف محاسبه و نتایج در قالب شاخص‌های آماری میانگین مربعات خطای نرمال (NMSE) و ضریب همبستگی (r_{xy}) با مقادیر داده‌های میدانی مقایسه شد. نام‌گذاری مدل‌ها براساس متغیرهای مستقل ورودی می‌باشد. به‌طور مثال، مدل LDE مدلی است که ورودی آن‌ها به‌ترتیب نزدیک‌ترین طول دسترسی به مخزن (*L*)، متوسط قطر دسترسی به مخزن (*D*) و اختلاف ارتفاع مخزن و ایستگاه فشارسنجی (*E*) است. در جدول (4) مقادیر شاخص‌های آماری برای مدل‌های رگرسیون فشار گرهی آورده شده است.

جدول 4- مقایسه نتایج میانگین فشار گرهی در حالت‌های مختلف

میانگین مصرف			بیشینه مصرف			کمینه مصرف			
$LDC_{HWa}E$	$LC_{HWa}E$	*LDE*	$LDC_{HWa}E$	$LC_{HWa}E$	*LDE*	$LDC_{HWa}E$	$LC_{HWa}E$	*LDE*	
0/30	0/37	0/34	0/34	0/49	0/45	0/30	0/32	0/29	NMSE
0/83	0/79	0/81	0/81	0/71	0/73	0/84	0/83	0/84	r_{xy}

براساس نتایج جدول (4) و با مقایسه شاخص‌های آماری، به‌طورکلی برای مدل‌های رگرسیون میانگین فشار گرهی در حالت‌های مختلف، مدل دارای چهار متغیر مستقل ورودی به‌صورت LDC_{HWaE} بهترین نتایج را دارد. در مقایسه نتایج مدل‌های رگرسیون، مدل‌های که مقادیر میانگین مربع خطای نرمال (NMSE) کمتر و ضریب همبستگی (r_{xy}) بیشتر دارند به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شده است. به‌عنوان مثال، مدل LDC_{HWaE} برای حالت‌های مختلف مصرف دارای کمترین میانگین مربعات خطای نرمال با متوسط برابر 0/31 و بیشترین ضریب همبستگی با متوسط برابر 0/82 است. برای مقایسه دقیق‌تر نتایج در ایستگاه‌های مختلف فشارسنجی، مقادیر میانگین فشار گرهی در حالت بیشینه مصرف در مدل‌های LDE، LC_{HWaE} و LDC_{HWaE} در کنار مقادیر مشاهداتی در شکل (5) نشان داده شده است.



شکل 5- مقایسه مقادیر فشار محاسباتی و واقعی در زمان بیشینه مصرف در ایستگاه‌های شبکه توزیع آب اهر

مطابق نتایج ارائه شده در شکل (5) و جدول (4)، مدل‌های برتر در هر یک از ایستگاه‌های فشارسنجی متفاوت هستند. نتایج تجمیع‌شده عملکرد مدل‌ها در تمامی ایستگاه‌ها که در جدول (4) ارائه شده است، نشان می‌دهد که در حالت متوسط مصرف، مدل LDE، در حالت حداکثر مصرف، مدل LDC_{HWaE} و در حالت حداقل مصرف نیز مدل LDE، به‌عنوان مدل‌های دارای بهترین عملکرد انتخاب شده‌اند. در این بخش برای مقایسه مدل‌ها براساس مقایسه نتایج داده‌های محاسباتی و واقعی، درصورتی‌که برای مدل با نتایج نزدیک‌تر به مقدار واقعی امتیاز 3، برای حالت‌های بعدی امتیاز 2 و 1 در نظر گرفته شود. مجموع امتیازهای مدل‌های LDE، LC_{HWaE} و LDC_{HWaE} به‌ترتیب 38، 48 و 54 است که نشان می‌دهد مدل LDC_{HWaE} با امتیاز 54 رتبه بهتری نسبت به دو مدل دیگر دارد و مدل منتخب می‌باشد. علت تفاوت عملکرد در ایستگاه‌های مختلف در شبکه توزیع آب اهر مربوط به چند مخزنی بودن شبکه و تأثیرپذیری ایستگاه‌ها از مخازن مختلف است درحالی‌که در این پژوهش، مدل‌سازی نسبت به یکی از مخازن یعنی مخزن و ایستگاه پمپاژ T_3 انجام شده است.

3-2- شبکه توزیع آب شهر اشنویه

در این بخش، نتایج تحلیل رگرسیون چندگانه برای متغیرهای مستقل و وابسته برای 12 ایستگاه فشارسنجی در شبکه توزیع آب اشنویه در ساعت کمینه مصرف بررسی می‌شود. در شبکه توزیع آب اشنویه، دو مخزن، تأمین آب شبکه را انجام می‌دهند که در بین آن‌ها با توجه به‌این‌که بیشتر ایستگاه‌های فشارسنجی تحت تأثیر تانک T2 هستند و بیشترین ضریب همبستگی بین متغیرهای وابسته و مستقل نیز در این تانک وجود دارد، ضرایب همبستگی بین متغیرها در این ایستگاه بررسی شده است. در جدول (5-الف) ضرایب همبستگی متغیرهای مستقل نسبت به همدیگر، در جدول (5-ب) ضرایب همبستگی متغیرهای وابسته نسبت به همدیگر و در جدول (5-ج) ضرایب همبستگی متغیرهای وابسته نسب به متغیرهای مستقل آورده شده است. در این جدول به‌دلیل همبستگی بالا از بین متغیرهای مستقل، متغیر فاصله از مخزن، قطر متوسط مسیر، اختلاف ارتفاع از مخزن و ضریب هیزن-ویلیامز متوسط مسیر و از متغیرهای وابسته، متغیر میانگین فشار گرهی برای تحلیل رگرسیون انتخاب می‌شوند.

جدول 5- ضرایب همبستگی متغیرهای مستقل و وابسته در حالت کمینه مصرف از شبکه

(الف) متغیرهای مستقل					
Ra	C_{Hwa}	*E*	*D*	*L*	
0/43	0/23	0/90	-0/26	1/00	*L*
-0/82	-0/92	-0/03	1/00	-0/26	*D*
0/28	0/00	1/00	-0/03	0/90	*E*
0/75	1/00	0/00	-0/92	0/23	C_{Hwa}
1/00	0/75	0/28	-0/82	0/43	*Ra*
(ب) متغیرهای وابسته					
P_{Mod}	P_{Med}	P_{Max}	P_{Min}	P_{Ave}	
1/00	0/97	0/86	0/97	1/00	P_{Ave}
0/99	0/96	0/72	1/00	0/97	P_{Min}
0/82	0/82	1/00	0/72	0/86	P_{Max}
0/97	1/00	0/82	0/96	0/97	P_{Med}
1/00	0/97	0/82	0/99	1/00	P_{Mod}
(ج) متغیرهای مستقل و وابسته					
Ra	C_{HWa}	*E*	*D*	*L*	
0/38	0/19	0/94	-0/16	0/86	P_{Ave}
0/34	0/08	0/99	-0/09	0/90	P_{Min}
0/36	0/37	0/66	-0/24	0/55	P_{Max}
0/39	0/22	0/93	-0/20	0/89	P_{Med}
0/37	0/17	0/96	-0/15	0/88	P_{Mod}

براساس متغیرهای مستقل و وابسته انتخاب شده از تحلیل ضرایب همبستگی ارائه شده در جدول (5)، متغیرهای مستقل شامل طول، قطر، ارتفاع و ضریب هیزن- ویلیامز به‌عنوان متغیرهای ورودی و فشار میانگین گرهی (P_{Ave}) به‌عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شدند. سپس، معادلات رگرسیون چندگانه خطی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته با استفاده از نرم‌افزار SPSS استخراج گردید. براین اساس، مدل‌های رگرسیون سه‌ورودی شامل *LDE* و $LC_{HWa}E$ و مدل چهارورودی $LDC_{HWa}E$ برای مدل‌سازی ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته و پیش‌بینی رفتار فشار شبکه توسعه داده شدند. بهترین مدل‌های حاصل برای میانگین فشار گرهی (P_{Ave}) در حالت‌های کمینه، بیشینه و میانگین مصرف در روابط (12) تا (14) ارائه شده‌اند.

$$PAve = -71.993 - 0.004*L + 0.075*D + 0.476*CHWa + 0.904*E \quad \text{کمینه مصرف} \quad (12)$$

$$PAve = -233.948 - 0.014*L + 0.261*D + 1.498*CHWa + 0.655*E \quad \text{بیشینه مصرف} \quad (13)$$

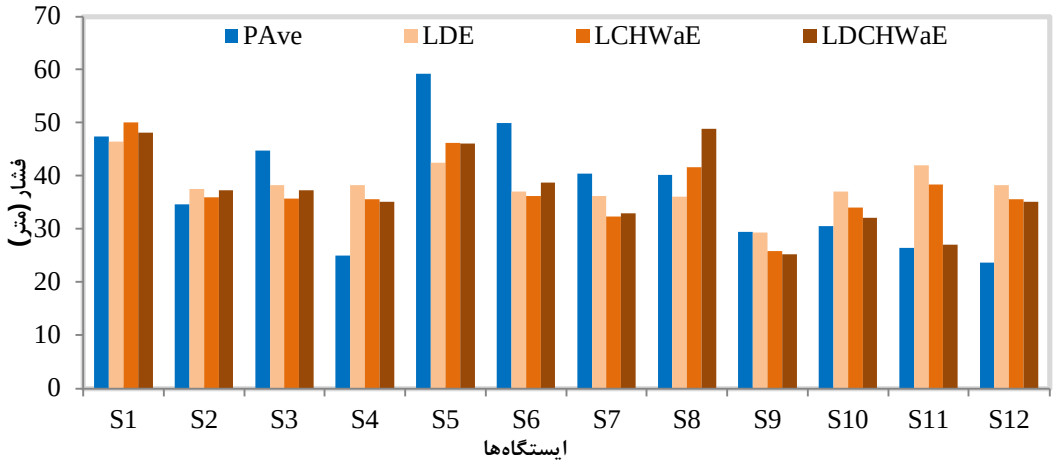
$$PAve = -101.526 - 0.008*L + 0.103*D + 0.668*CHWa + 0.914*E \quad \text{میانگین مصرف} \quad (14)$$

برای مقایسه نتایج خروجی مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی، متناسب با متغیرهای مستقل به‌کاررفته، مقادیر محاسباتی میانگین فشار گرهی برای حالت‌های مختلف مصرف شامل کمینه، بیشینه و میانگین مصرف از شبکه محاسبه و نتایج با مقادیر داده‌های میدانی در قالب شاخص‌های آماری میانگین مربعات خطای نرمال (NMSE) و ضریب همبستگی (r_{xy}) مقایسه و نتایج در جدول (6) آورده شده است.

جدول 6- مقایسه نتایج میانگین فشار گرهی در حالت‌های مختلف مصرف

کمینه مصرف			بیشینه مصرف			میانگین مصرف			
LDE	$LC_{HWa}E$	$LDC_{HWa}E$	*LDE*	$LC_{HWa}E$	$LDC_{HWa}E$	*LDE*	$LC_{HWa}E$	$LDC_{HWa}E$	
0/08	0/06	0/05	0/80	0/62	0/49	0/19	0/13	0/11	*NMSE*
1/0	1/0	1/0	0/36	0/57	0/68	0/89	0/93	0/94	r_{xy}

براساس نتایج جدول (6)، در حالت کلی، از بین مدل‌ها، مدل با سه متغیر یعنی LDE و LC_{HWaE} و مدل با چهار متغیر LDC_{HWaE}، مدل دارای چهار متغیر مستقل ورودی (LDC_{HWaE}) بهترین نتایج را دارد، مقایسه شاخص‌های ارزیابی در جدول (6) نشان می‌دهد که شاخص میانگین مربعات خطای نرمال برای مدل فوق در حالت‌های مختلف مصرف کمترین مقدار و به‌طور متوسط برابر 0/22 است و مقدار ضریب همبستگی در حالت‌های مختلف مصرف بیشترین مقدار و به‌طور متوسط برابر 0/87 است. برای مقایسه دقیق‌تر نتایج در ایستگاه‌های مختلف فشارسنجی، مقادیر فشار گرهی هر ایستگاه در حالت کمینه مصرف از شبکه برای سه مدل رگرسیون، LDE، LC_{HWaE} و LDC_{HWaE} در کنار مقادیر مشاهداتی در شکل (6) نشان داده شده است. در این بخش نیز برای رتبه‌بندی مدل‌ها براساس میزان نزدیکی نتایج مدل‌ها به مقادیر مشاهداتی به‌ترتیب امتیاز 3، 2 و 1 برای مدل‌های رگرسیون درنظر گرفته شده است که مجموع امتیازها برای سه مدل فوق به‌ترتیب 21، 23 و 28 به‌دست آمده است که نشان می‌دهد مدل LDC_{HWaE} در رتبه اول قرار دارد.



شکل 6- مقایسه مقادیر داده‌های محاسباتی با فشار واقعی در زمان کمینه مصرف در ایستگاه‌های شبکه توزیع آب اشنویه

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از روش رگرسیون چندگانه خطی برای پیش‌بینی تغییرات فشار در شبکه‌های توزیع آب بر اساس متغیرهای مختلف هندسی و توپوگرافی ایستگاه‌های فشارسنجی نسبت به مخازن استفاده شده است. برای این منظور، داده‌های میدانی شامل مقادیر فشار در 22 ایستگاه شبکه توزیع آب شهر اهر و 12 ایستگاه شبکه توزیع آب اشنویه مورد بررسی قرار گرفته است که در آن‌ها متغیرهای با ضرایب همبستگی بالا از بین متغیرهای مستقل شامل نزدیک‌ترین فاصله به مخازن (L)، متوسط قطر دسترسی لوله‌ها به مخازن (D)، اختلاف ارتفاع از مخازن (E)، متوسط ضریب هیزن- ویلیامز دسترسی به مخازن (C_{HWa}) و متغیر وابسته شامل متوسط فشار گرهی (P_{Ave}) برای تنظیم روابط رگرسیون چندگانه خطی انتخاب شدند و روابط با استفاده از نرم‌افزار SPSS به‌دست آمد. برای مقایسه عملکرد مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی از شاخص‌های آماری میانگین مربعات خطای نرمال (NMSE) و ضریب همبستگی (r_{xy}) استفاده شده و نتایج برای ساعت‌های کمینه، میانگین و بیشینه مصرف با همدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان داد که در شبکه توزیع آب اهر و اشنویه، مدل چهارمتغیره LDC_{HWaE} در مقایسه با سایر مدل‌ها، عملکرد بهتری دارد به‌طوری که دارای کمترین مقدار میانگین مربعات خطای نرمال (NMSE) و بیشترین ضریب همبستگی به‌ترتیب برابر 0/31 و 0/82 و 0/22 و 0/87 می‌باشند. مقایسه نتایج مدل‌ها در ایستگاه‌های مختلف نشان داد که عملکرد مدل‌ها در تمامی نقاط شبکه یکسان نیست و این موضوع در شبکه اهر به‌دلیل وجود چند مخزن و تأثیرپذیری ایستگاه‌ها از منابع مختلف تأمین آب، مشهودتر است. با این حال، نتایج کلی دو مطالعه موردی نشان داد که استفاده هم‌زمان از شاخص‌های طول، قطر، اختلاف ارتفاع و ضریب هیزن- ویلیامز مسیر دسترسی، می‌تواند رویکرد مناسبی برای تخمین فشار گرهی در نقاط فاقد اندازه‌گیری باشد. براساس یافته‌های این پژوهش، مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار ساده و کم‌هزینه برای برآورد اولیه فشار گرهی و پشتیبانی از تحلیل‌های مدیریتی شبکه‌های توزیع آب مورد استفاده قرار گیرد؛ با این حال، برای تعمیم نتایج به سایر شبکه‌ها، بررسی شبکه‌های با ساختار، توپولوژی و شرایط بهره‌برداری متفاوت ضروری است.

5- مراجع

Amini Gh, Entezam H, Sadeghpour A, Davoudabadi A, "Application of data mining in identifying subscribers with unauthorized water consumption (case study: Qom Water and Wastewater Company)", 2nd National Congress on Water and Wastewater Science and Engineering of Iran, 2018, November 12-13, Isfahan, Iran (in Persian). https://civilica.com/doc/855965

Asuero AG, Sayago A, González AG, "The correlation coefficient: An overview", Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2006, 36 (1), 41-59. https://doi.org/10.1080/10408340500526766

Athari M, Motiei H, "Evaluation of the performance of the logistic regression model in urban water distribution networks (case study: District 1 of Tehran Water and Wastewater Company)", 3rd National Congress on Water and Wastewater Science and Engineering of Iran, 2020, December 3, Shiraz, Iran (In Persian). https://civilica.com/doc/1184533

Bagyalakshmi N, Sujatha S, Hosanna Princye P, "Enhancing pressure estimation in water distribution systems utilizing optimized scene context aware graph convolutional network for improved predictive performance", International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 2026, 36 (7), 901-926. https://doi.org/10.1142/S0218194025500470

Dini M, Tabesh M, "A new method for simultaneous calibration of demand pattern and Hazen-Williams coefficients in water distribution systems", Water Resources Management, 2014, 28 (7), 2021-2034. https://doi.org/10.1007/s11269-014-0592-4

Dini M, Tabesh M, "Optimal renovation planning of water distribution networks considering hydraulic and quality reliability indices", Urban Water Journal, 2019, 16 (4), 249-258. https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1669185

Dirican S, "A preliminary correlation and regression study on drinking water quality of Susehri district in Turkey", Romanian Biotechnological Letters, 2019, 24 (2). https://doi.org/10.25083/rbl/24.2/201.207

Elkharbotly MR, Seddik M, Khalifa A, "Toward sustainable water: prediction of non-revenue water via artificial neural network and multiple linear regression modelling approach in Egypt", Ain Shams Engineering Journal, 2022, 13 (5), 101673. https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101673

Hajgató G, Gyires-Tóth B, Paál G, "Reconstructing nodal pressures in water distribution systems with graph neural networks", arXiv preprint arXiv:2104.13619, 2021. https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.13619

Haque MM, Rahman A, Hagare D, Kibria G, "Principal component regression analysis in water demand forecasting: An application to the Blue Mountains, NSW, Australia", Journal of Hydrology and Environment Research, 2013, 1 (1), 49-59. https://doi.org/10.23919/ISTAFRICA.2017.8102401

Jafari S, Zahiri A, Bozorg-Haddad O, Mohammadrezapour-Tabari M, "A new approach for predicting pipe failure rate in water distribution networks using a hybrid intelligent model (case study: Gorgan water distribution network)", Journal of Water and Soil Conservation (Agricultural Sciences and Natural Resources), 2020, 27 (5), 149-166 (in Persian). https://doi:10.22069/jwsc.2021.17670.3319

Jain AK, Mohan DM, Khanna P, "Modified Hazen-William's formula", Journal of the Environmental Engineering Division, 1978, 104 (1), 137-146. https://doi/10.1061/JEEGAV.0000723

Karamouz M, Tabesh M, Nazif S, Moridi A, "Prediction of pressure in water supply networks using artificial neural networks and fuzzy inference", Water and Wastewater, 2005, 16 (1), 3-14 (in Persian). https://www.wwjournal.ir/article_2079.html?lang=en

Karapataki C, Adamowski J, "Comparison of multivariate regression and artificial neural networks for peak urban water-demand forecasting: evaluation of different ANN learning algorithms", Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 15 (10), 729-743. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000472

Kemba J, Gideon K, Nyirenda CN, "Leakage detection in Tsumeb East water distribution network using EPANET and support vector regression", In 2017 IST-Africa Week Conference (IST-Africa), 2017, 1-8. https://doi.org/10.23919/ISTAFRICA.2017.8102401

Khoa TD, "Anomaly detection and inlet pressure prediction in water distribution systems using machine learning", arXiv preprint arXiv:2410.09530, 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.09530

Kotu V, Deshpande B, "Predictive analytics and data mining: Concepts and practice with RapidMiner", San Francisco: Morgan Kaufmann, 2015, 165-193. https://doi.org/10.1016/C2014-0-00329-2

Moashari R, Jalili Ghazizadeh MR, "Locating the Average Pressure Zone Point in Water Distribution Networks through Hydraulic Analysis", Journal of Water & Wastewater Science and Engineering, 2025, 10 (1), 19-29 (In Persian). https://www.magiran.com/paper/2875208

Mansoor MAM, Vairavamoorthy K, "Application of neural networks for estimating nodal outflows as a function of pressures in water distribution systems", In Computing in Civil Engineering, 2005, 1-12. https://doi.org/10.1061/40794(179)44

Motiei H, Ghasemnejad S, "Application and development of regression models for predicting pipe failure rate in urban water distribution networks-case study of District 1 of Tehran", Water and Wastewater Science and Engineering, 2017, 2 (2), 48-58 (in Persian). https://doi.org/10.22112/jwwse.2017.89374.1024

Poli AA, Cirillo MC, "On the use of the normalized mean square error in evaluating dispersion model performance", Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1993, 27 (15), 2427-2434. https://doi.org/10.1016/0960-1686(93)90410-Z

Engineering Science and Technology (JMEST), 2025, 12 (9). https://www.jmest.org/wp-content/uploads/JMESTN 42354608. pdfPoli AA

Robles-Velasco A, Cortés P, Muñuzuri J, Onieva L, "Prediction of pipe failures in water supply networks using logistic regression and support vector classification", Reliability Engineering & System Safety, 2020, 196, 106754. https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106754

Runnenburg JTh, "Mean, median, mode", Statistica Neerlandica, 1978, 32 (2), 73-79. https://doi.org/10.1111/j.1467-9574.1978.tb01386.x

Santos-Ruiz I, López-Estrada FR, Puig V, Blesa J, "Estimation of node pressures in water distribution networks by Gaussian process regression", In 2019 4th Conference on Control and Fault Tolerant Systems (Sys Tol), 2019, 50-55. https://doi.org/ 10.1109/SYSTOL.2019.8864793

Sattari M, Motiee H, Athari M, "Evaluating pipe failure risk in water distribution networks using GIS fuzzy overlay, ROC curves and machine learning logistic regression", Water Supply, 2025, 25 (11), 1539-1555. https://doi.org/10.2166/ws.2025.093

Shi HH, Weng WG, Zhai ZG, Li YY, "The relationship and regression analysis of urban water supply and temperature", In Applied Mechanics and Materials, 2013, 256-259, 2420-2423. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.2420

Shirzad A, Tabesh M, Atayikia B, "Multiobjective optimization of pressure dependent dynamic design for water distribution networks", Water Resources Management, 2017, 31 (9), 2561-2578. https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-017-1602-0

Shirzad A, Tabesh M, Farmani R, "A comparison between performance of support vector regression and artificial neural network in prediction of pipe burst rate in water distribution networks", KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18 (4), 941-948. https://doi.org/10.1007/s12205-014-0537-8

Soltani Asl M, Faghfoor Moghrebi M, "Intelligent pressure management to reduce leakage in water supply networks, case study: Sarafrazan district of Mashhad", Water and Wastewater Journal, 2009, 20 (3), 99-104 (in Persian). https://www.wwjournal.ir/article_1685.html

Su X, Yan X, Tsai CL, "Linear regression", Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2012, 4 (3), 275-294. https://doi.org/10.1002/wics.1198

Taebi A, Chamani MR, "Water distribution systems", Publication center of Isfahan University of Technology, 2014, 628. https://lib.ui.ac.ir/dl/search/default.aspx?Term=61884&Field=0&DTC=1

Tabesh M, Abbasi Moghaddam V, Shirzad A, "Optimal design of pressure sampling in water distribution networks for calibration of hydraulic models", Hydraulics, 2021, 16 (1), 53-66 (in Persian). https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.257302.1488

Udang EU, Etiese MI, Ozuomba S, "Artificial neural networks (ANNs)-based water consumption and pressure prediction for a water distribution network (WDN)", Journal of Multidisciplinary