

Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 2, pp: 105-123

Selection of the Best Statistical Index of Nodal Pressure Values for Use in Calibrating the Hydraulic Model of the Water Distribution Network Based on Field Data Processing

M. Dini^{1*}, R. Mashhadi Alizadeh², A. Shirzad³, S. Hashemi⁴

1. Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran
(Corresponding Author) m.dini@azaruniv.ac.ir and mehdini@gmail.com
2. MSc. Student, Dept. of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran
3. Assoc. Prof., Faculty of Civil Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran
4. Hydraulic Modelling Engineer, Jacobs Engineering Group, Toronto, Ontario, Canada

(Received Nov. 24, 2022 Accepted Feb. 2, 2023)

To cite this article:

Dini, M., Mashhadi Alizadeh, R., Shirzad, A., Hashemi, S. 2023. "Selection of the best statistical index of nodal pressure values for use in calibrating the hydraulic model of the water distribution network based on field data processing" Journal of Water and Wastewater, 34(2), 105-123. Doi: 10.22093/wwj.2023.374161.3307. (In Persian)

Abstract

Due to the widespread use of computers and measuring equipment in the operation of water distribution networks, a large amount of data is recorded for monitoring and evaluating the performance of water distribution networks and it is used in the modeling and calibration process. The management of these data is very necessary to achieve more accurate models on the one hand and the speed of their processing on the other hand. In this research, the purpose is to process nodal pressure field data to select the best statistical indicators for calibrating the water distribution network model. For this purpose, more than 5500 data collected in 22 stations of Ahar water distribution network and 12 stations of Oshnaviyeh water distribution network have been analyzed. First, by categorizing the data with Sturges experimental method, the probability of the data being placed in the central index categories of average, median, and mode and other categories in different stations in the times of minimum, maximum, and average consumption has been determined, and by summarizing the results, the best central index has been selected. Then, to analyze how the data changes, the minimum and maximum values, the range of variation, and the standard deviation of the data are presented along with the histogram of the categories. The trend of data variations in different stations in the minimum, maximum, and average consumption times shows that there is no specific harmony for data variations, so the maximum or minimum values of



the range of variation and the standard deviation of the data are moved spatially in the stations. Also, the process of data allocation to categories shows that in the Ahar water distribution network, most data is allocated to the mode category at about 28.6 percent, followed by other categories at about 26.3 percent. Also, in the Oshnaviyeh water distribution network, the highest allocation is related to other categories with about 30.2 percent, followed by the mode category with 27.2 percent. Considering the multiplicity and dispersion of other categories and the unity of the mode category, the mode category is the best choice for both case studies. In general, by using mode values instead of other central indicators in the calibration of water distribution networks, due to the effectiveness of more field data, more favorable results will be obtained in the construction of the network model.

Keywords: Calibration, Field Data, Nodal Pressure, Statistical Indicators, Water Distribution Network.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۲، صفحه: ۱۲۳-۱۰۵

انتخاب بهترین شاخص آماری مقدار فشار گرهی برای استفاده در کالیبراسیون مدل

هیدرولیکی شبکه توزیع آب مبتنی

بر پردازش داده‌های میدانی

مهدی دینی^{۱*}، رقیه مشهدی علیزاده^۲، اکبر شیرزاد^۳، سعید هاشمی^۴

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

(نویسنده مسئول) m.dini@azaruniv.ac.ir و mehdini@gmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

۴- دکترای مدل‌سازی هیدرولیکی، شرکت مهندسی جاکوبس، تورنتو، کانادا

(دریافت ۱۴۰۱/۹/۳ پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۳)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

دینی، م.، مشهدی علیزاده، ر.، شیرزاد، ا.، هاشمی، س.، ۱۴۰۲، "انتخاب بهترین شاخص آماری مقدار فشار گرهی برای استفاده در کالیبراسیون مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب مبتنی بر پردازش داده‌های میدانی" مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۲)، ۱۰۵-۱۲۳. Doi: 10.22093/wwj.2023.374161.3307

چکیده

با توجه به، به کارگیری گسترده کامپیوترها و تجهیزات اندازه‌گیری در بهره‌برداری شبکه‌های توزیع آب، حجم زیادی از داده‌ها برای پایش و ارزیابی عملکرد شبکه‌های توزیع آب ثبت می‌شود و در مرحله مدل‌سازی و کالیبراسیون استفاده می‌شود. مدیریت این داده‌ها برای رسیدن به مدل‌های دقیق‌تر از یک طرف و سرعت عمل در پردازش آنها از طرف دیگر بسیار ضروری است. در این پژوهش، هدف، پردازش داده‌های میدانی فشار گرهی برای انتخاب بهترین شاخص‌های آماری برای کالیبراسیون مدل شبکه توزیع آب بود. برای این منظور، بیش از ۵۵۰۰ داده جمع‌آوری شده در ۲۲ ایستگاه شبکه توزیع آب اهر و ۱۲ ایستگاه شبکه توزیع آب اشنویه بررسی شد. ابتدا، با دسته‌بندی داده‌ها به روش تجربی استورجس، احتمال قرار گرفتن داده‌ها در دسته‌های شاخص‌های مرکزی میانگین، میانه و نما و سایر دسته‌ها در ایستگاه‌های مختلف در ساعت‌های حداقل، حداکثر و متوسط مصرف تعیین و با جمع‌بندی نتایج، بهترین شاخص مرکزی انتخاب شد. سپس برای تحلیل نحوه تغییرات داده‌ها، مقدار حداقل و حداکثر، دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها به همراه هیستوگرام دسته‌ها ارائه شد. روند تغییرات داده‌ها در ایستگاه‌های مختلف در ساعت‌های حداقل، حداکثر و متوسط مصرف نشان داد که هارمونی مشخصی برای تغییرات داده‌ها وجود ندارد، به طوری که مقدار حداکثر یا حداقل دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها به صورت مکانی در ایستگاه‌ها جابه‌جا می‌شوند. همچنین روند تخصیص داده‌ها به دسته‌ها نشان داد که در شبکه توزیع آب اهر بیشترین تخصیص داده‌ها به دسته نمایی با حدود ۲۸/۶ درصد و بعد سایر دسته‌ها با حدود ۲۶/۳ درصد قرار دارد و در شبکه توزیع آب اشنویه بیشترین تخصیص مربوط به سایر دسته‌ها با حدود ۳۰/۲ درصد و بعد دسته نمایی با ۲۷/۲ درصد قرار دارد. با توجه به تعدد و پراکندگی سایر دسته‌ها و واحد بودن مقوله حالت، دسته نمایی، بهترین انتخاب بود. به طور کلی با بهره‌گیری از مقدار نما به جای دیگر شاخص‌های مرکزی در کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب، به دلیل تأثیرپذیری از تعداد داده‌های میدانی بیشتر، نتایج مطلوب‌تری در ساخت مدل شبکه حاصل خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های آماری، داده‌های میدانی، شبکه توزیع آب، کالیبراسیون، فشار گرهی



۱- مقدمه

الکتریکی^۴، اسیدیته (PH)، نسبت جذب سدیم^۵ و سدیم قادر است طبقه کیفیت آب را با دقت بسیار خوبی مشخص کند (Sattari et al., 2017)

امینی و همکاران در پژوهشی، از روش داده کاوی خوشه‌بندی دو مرحله‌ای به شناسایی الگوی مصرف آب مشترکین خانگی در شهر قم پرداختند. با استفاده از این روش، میانگین مصرف ماهانه مشترکین در سال تعیین و تعرفه متناسب برای هر خوشه پیشنهاد شده و مشترکین پرمصرف به استفاده از کاهنده‌های مصرف تشویق شدند. همچنین آنها در پژوهش دیگری به بررسی و ارائه مدلی برای تشخیص مصارف غیرمجاز در شهر قم با استفاده از دو روش، خوشه‌بندی دو مرحله‌ای و شبکه عصبی پرداختند. درصد پیش‌بینی صحیح بیش از ۹۲ درصد در هر یک از نمونه‌های آموزش، صحت‌سنجی و تست حاکی از دقت زیاد مدل‌ها است، به‌طوری که از این روش می‌توان برای شناسایی مصارف غیرمجاز و مشکوک استفاده کرد (Amini et al., 2018a, Amini et al., 2018b).

هاشمی و همکاران، به شناسایی عوامل هیدرولیکی مهم در دینامیک انرژی شبکه آب با استفاده از تجزیه و تحلیل اجزای اصلی^۶ شبکه پرداختند. روش پیشنهادی آنها بر روی دو مجموعه بزرگ از لوله‌های دارای نشت و بدون نشت شامل بیش از ۴۰۰۰ لوله انتخاب شده از ۱۸ سیستم توزیع آب آمریکای شمالی برای تضمین تطبیق‌پذیری و ویژگی‌های لوله و اهمیت آماری الگوهای بررسی شده اعمال شده است. مقایسه نتایج نشان داد که دبی جریان، مجارورت هیدرولیکی به اجزای اصلی شبکه و افت واحد طول لوله‌ها تأثیر بیشتری بر کارایی انرژی لوله‌ها در مقایسه با تغییرات فشار و نشت شبکه دارد (Hashemi et al., 2018).

تاج‌آبادی و همکاران، با تحلیل داده‌های میدانی فشار و شکستگی یک روش داده محور را برای تعیین رابطه فشار و شکستگی در بخشی از شبکه توزیع آب شهر تهران توسعه دادند. در روابط به‌دست آمده، از دو شاخص متوسط فشار حداکثر روزانه و حداکثر فشار حداکثر روزانه استفاده شد و نتایج نشان داد که شاخص متوسط فشار حداکثر روزانه نتایج دقیق‌تری در مقایسه با

داده‌های جمع‌آوری شده از سیستم‌های مختلف در حال بهره‌برداری انبوه، اما فاقد ارزش هستند، به‌طوری که خود داده‌ها به تنهایی قابل استفاده نیستند و در واقع دانش نهفته موجود در آنها قابل استفاده است. وجود حجم گسترده‌ای از داده‌ها باعث شده که بشر نیازمند ابزار و تکنولوژی باشد تا بتواند به‌صورت هوشمند این داده‌ها را سازمان‌دهی و آنها را به اطلاعات و دانش تبدیل کند. داده‌کاوی در مدیریت داده‌ها و تبدیل آن به اطلاعات، اهمیت زیادی دارد. این مسئله زمانی بیشتر اهمیت پیدا می‌کند که حجم زیادی از داده‌ها موجود باشد. به هر میزان حجم داده‌ها بیشتر و رابطه موجود میان آنها پیچیده‌تر باشد، دسترسی به اطلاعات و روابط پنهان میان داده‌ها دشوارتر خواهد بود. در پژوهش‌های قبلی، داده‌کاوی به‌عنوان یکی از روش‌های تولید اطلاعات از داده‌های خام به‌طور گسترده استفاده شده است.

قربانی، برای بررسی دقت مدل‌های پیش‌بینی جریان رودخانه‌ای از داده‌های بلندمدت ثبت شده در حوضه آبریز آرازکوسه واقع در استان گلستان استفاده کرد. در این پژوهش مدل بارش رواناب^۱ به‌عنوان مدل مفهومی هیدرولوژیکی و مدل درخت تصمیم^۲ و مدل نزدیکترین همسایگی K^۳ به‌عنوان مدل‌های داده کاوی برای مدل‌سازی جریان ماهانه رودخانه انتخاب شدند. هدف، بررسی هم‌زمان این مدل‌ها در یک حوضه آبریز برای پیش‌بینی جریان ماهانه رودخانه بود که بررسی نتایج نشان داد استفاده از مدل‌های داده کاوی منجر به بهبود نتایج نسبت به مدل‌های هیدرولوژیکی مفهومی شده است. همچنین بررسی سری زمانی نتایج نشان داد که دقت مدل‌های داده کاوی در تخمین جریان‌های کم، بهتر از تخمین جریان‌های زیاد است (Ghorbani, 2016).

ستاری و همکاران، با استفاده از داده کاوی به پیش‌بینی کیفیت آبهای سطحی در رودخانه‌های واقع در دامنه‌های شمالی کوه سهند پرداختند. آنها که در این کار از روش تصمیم‌گیری درختی استفاده کردند، پارامترهای زیادی به‌عنوان پارامترهای هیدرولیکی و کیفی تعریف کردند که از میان آنها، چهار پارامتر شامل هدایت

⁴ Electrical Conductivity (EC)

⁵ Sodium Adsorption Ratio (SAR)

⁶ Principal Component Analysis (PCA)

¹ Identification of Unit Hydrographs and Component Flows from Rainfall, Evaporation and Stream Flow Data (IHACRES)

² Decision Tree M5 (DTM5)

³ K-Nearest Neighborhood (KNN)



با تجهیز شبکه‌های توزیع آب به تجهیزات اندازه‌گیری شامل فشارسنج‌ها و دبی‌سنج‌ها، حجم بزرگی از داده‌ها از شبکه جمع‌آوری می‌شود و در مرحله مدل‌سازی و کالیبراسیون شبکه به‌عنوان داده‌های میدانی استفاده می‌شود. با توجه به ساده‌سازی مدل شبکه به‌صورت مدل‌سازی استاتیک برای حداکثر مصرف روزانه یا مدل دینامیکی به‌صورت مصارف ساعتی در روز، نیاز است که داده‌های جمع‌آوری شده میدانی در قالب جداول و شاخص‌های آماری دسته‌بندی و در مدل شبکه برای کالیبراسیون ضرایب استفاده شود. پژوهش‌های موجود در زمینه کالیبراسیون استاتیکی یا دینامیکی مدل شبکه‌های توزیع آب، از شاخص میانگین مقدار فشار یا کلر آزاد باقیمانده داده‌های میدانی استفاده کرده‌اند که با وجود نتایج مطلوب مدل کالیبراسیون، ابهام در میزان پوشش هر یک از داده‌های میدانی وجود دارد (Dini and Tabesh, 2017, Dini and Tabesh, 2014).

در مجموع، پژوهش خاصی در این ارتباط وجود ندارد که نحوه استفاده از بهترین شاخص‌های آماری برای بهره‌گیری از داده‌های میدانی در مرحله کالیبراسیون مدل‌های شبکه را نشان داده باشد، به‌طوری که در ضمن داشتن نتایج مطلوب برای شاخص آماری منتخب، بتواند تعداد بیشتری از داده‌های میدانی را پوشش دهد. در این پژوهش، انتخاب بهترین شاخص آماری مرکزی برای تعیین مقدار فشار گرهی برای کالیبراسیون مدل شبکه توزیع آب بررسی شد که به‌عنوان نوآوری پژوهش به حساب می‌آید. برای این منظور بیش از ۵۵۰۰ داده در شبکه‌های توزیع آب شهر اهر و شهر آشنویه جمع‌آوری و به روش تحلیل آماری بررسی شد تا بهترین شاخص‌های مرکزی برای کالیبراسیون مدل شبکه توزیع آب پیشنهاد شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مطالعه موردی و داده‌ها

در این پژوهش، مطالعه موردی بر روی شبکه توزیع آب شهرهای اهر و آشنویه انجام شد. شهر اهر با جمعیت حدود ۱۰۰ هزار نفر در کشور ایران، استان آذربایجان شرقی و در ۹۰ کیلومتری شهر تبریز واقع شده است. شبکه ساده شده شهر اهر ۱۹۲ لوله، ۱۶۹ گره، ۱ باب مخزن، ۵ تانک و ۳۰ ایستگاه اندازه‌گیری شامل ۲۷ ایستگاه فشارسنجی و ۳ ایستگاه دبی‌سنجی دارد که در شکل ۱ نشان داده

شخص حداکثر فشار حداکثر روزانه دارد (Taj Abadi et al., 2018).

آوند و همکاران، با استفاده از مدل داده‌کاوی جنگل تصادفی^۱ و مدل آماری رگرسیون خطی تعمیم‌یافته^۲ نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی را در محدوده سی‌سخت یا سوج بررسی کردند. ارزیابی دقت مدل‌های داده‌کاوی استفاده شده در این پژوهش با استفاده از منحنی عملکرد نسبی^۳ سنجش شد. نتایج نشان داد دقت مدل جنگل تصادفی در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بیش از مدل رگرسیون خطی تعمیم‌یافته است (Avand et al., 2019).

طالبیان و همکاران، برای مدیریت تأمین آب و انجام اقدامات پیشگیرانه، راهکاری مبتنی بر یادگیری ماشین ارائه داده‌اند. آنها با در اختیار داشتن سری زمانی مصرف آب، دو مدل مبتنی بر یادگیری ماشین شامل ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی طراحی کردند. نتایج نشان داد که ایده افزایش داده‌های آموزشی توسط روش میانگین متحرک خودهمبسته یکپارچه^۴ در افزایش دقت مدل‌های پیشنهادی بسیار مؤثر بوده است. آنها در ادامه با استفاده از داده‌های واقعی مصرف آب، دقت پیش‌بینی این مدل‌ها را ارزیابی کرده و به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی، یک مدل ترکیبی شامل شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان با استفاده از معیار شباهت سری‌های زمانی پیشنهاد کردند که در مقایسه با مدل‌های مجزا نتایج بهتری داشت (Talebian et al., 2019).

امینی در پژوهشی، مدلی را برای شناسایی موارد دست‌کاری کنتور آب مبتنی بر تکنیک‌های داده‌کاوی ارائه کرد. وی به‌منظور تحلیل داده‌ها از سابقه مصرف و پرداخت صورت‌حساب مشترکان و همچنین روش‌های داده‌کاوی با ناظر مانند درخت تصمیم، ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی، رگرسیون لجستیک، نزدیک‌ترین همسایگی و روش بدون ناظر خوشه‌بندی استفاده کرد. در این پژوهش رگرسیون لجستیک با دقت زیاد به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای شناسایی کنتورهای دست‌کاری شده انتخاب شد (Amini, 2020).

¹ Random Forest (RF)

² Generalized Linear Model (GLM)

³ Relative Operating Characteristic (ROC)

⁴ Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)



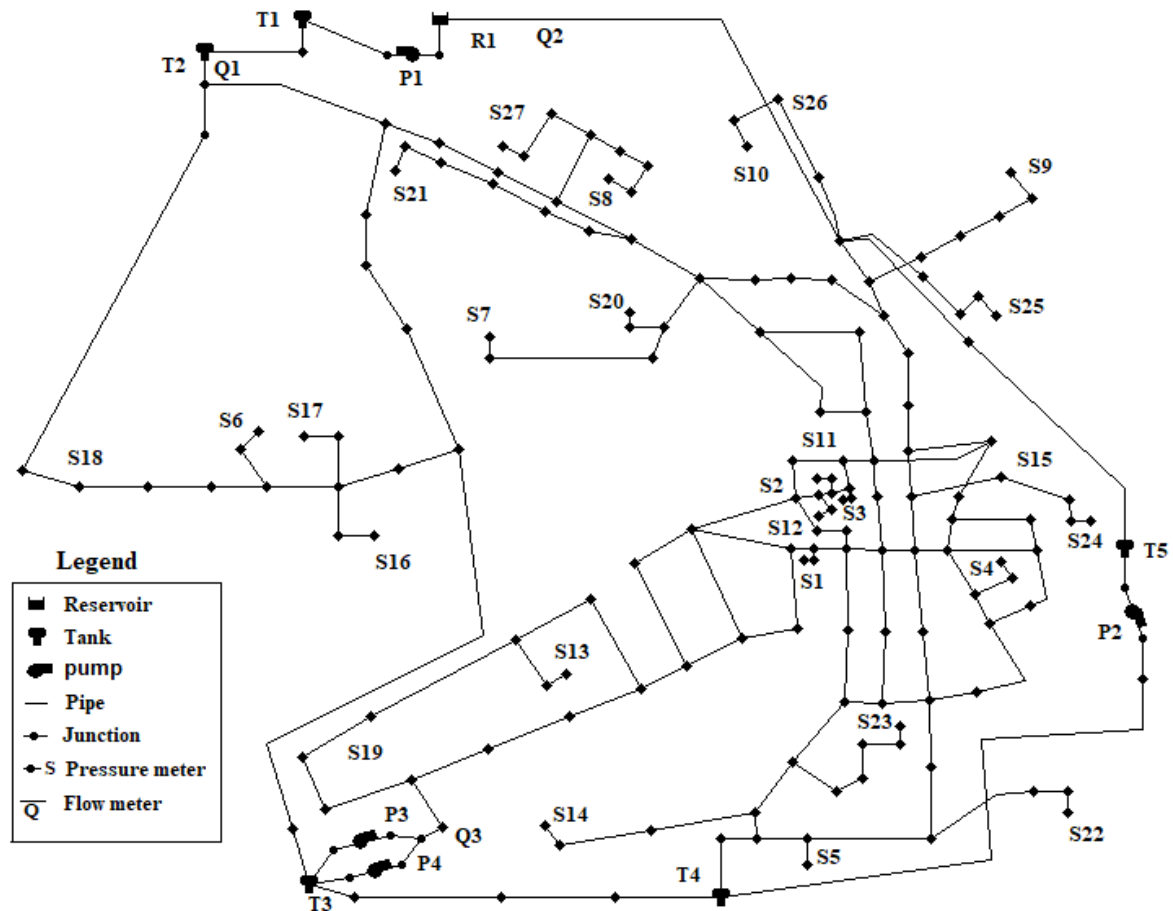


Fig. 1. Schematic of the Ahar water distribution network

شکل ۱- شماتیک شبکه توزیع آب اهر

آب اهر، داده‌های ۲۲ ایستگاه شامل ایستگاه‌های موجود در روی شکل ۱ به غیر از ایستگاه‌های S_{11} , S_{15} , S_{18} و S_{26} که فشار آنها ثبت نشده بود، استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل نتایج از تمامی داده‌های ۱۵ دقیقه‌ای موجود در ایستگاه‌ها استفاده شد و نتایج تنها برای ساعت‌های حداقل، حداکثر و متوسط مصرف یعنی در ساعات ۴، ۱۲ و ۲۲ ارائه شد.

شهر اشنویه با جمعیت حدود ۳۵ هزار نفر در قسمت غربی استان آذربایجان غربی در ارتفاع ۱۵۲۴ متری نسبت به سطح آبهای آزاد در طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۶۰ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲ دقیقه و ۲۰ ثانیه واقع شده است (Shirzad et al., 2020). شبکه ساده شده شهر اشنویه، ۱۹۶۰ لوله، ۱۹۲۰ گره، ۸ باب مخزن (۸ حلقه چاه)، ۲ تانک و ۱۲ ایستگاه اندازه‌گیری فشار دارد که در شکل ۲ نشان داده شده است. در این

شده است (Dini and Tabesh, 2019). در این شکل، R_1 مخزن موجود در محل تصفیه‌خانه آب اهر با ظرفیت ۵۰۰۰ مترمکعب است که تنها منبع تأمین آب شهر به حساب می‌آید. T_1 تا T_5 به ترتیب تانک‌های ذخیره آب موجود در شهر، Q_1 ، Q_2 و Q_3 موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری دبی و S_1 تا S_{27} موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری فشار را نشان می‌دهد.

در این شبکه، داده‌های فشار گرهی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری به صورت هر ۱۵ دقیقه یک‌بار و برای بیش از ۱ هفته در فصل پاییز سال ۱۳۹۱ اندازه‌گیری شد. مدل‌سازی شبکه توزیع آب اهر بر اساس متوسط فشار ساعتی در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز انجام شد، به طوری که در آن تغییرات فشار در ساعت‌های مختلف متناسب با تغییرات ضرایب الگوی مصرف ساعتی بر اساس ضرایب شکل ۳ انجام شد. از بین ۲۷ ایستگاه فشارسنجی موجود در شبکه توزیع





Fig. 2. Schematic of the Oshnaviyeh water distribution network

شکل ۲- شماتیک شبکه توزیع آب اشنویه

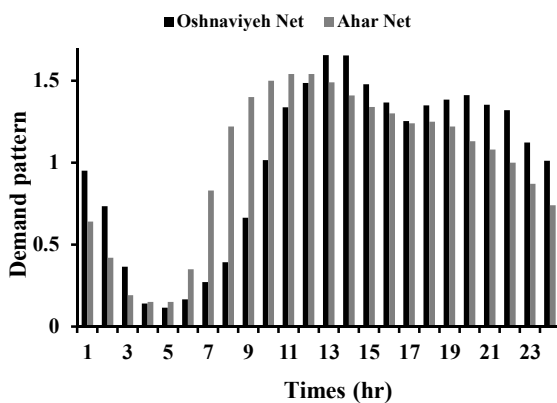


Fig. 3. Nodal Demand pattern in Ahar and Oshnaviyeh water distribution network

شکل ۳- الگوی مصرف در شبکه توزیع آب شهر اهر و اشنویه

۱۳ و ۲۴ ارائه شد.

۲-۲- مرتب‌سازی و دسته‌بندی داده‌ها

با توجه به تعداد زیاد داده‌ها و عدم امکان استفاده از تمامی داده‌ها در

شکل، T_1 تانک ذخیره ۲۰۰۰ مترمکعبی، T_2 تانک ذخیره ۵۰۰۰ مترمکعبی و S_1 تا S_{12} موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری فشار را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است سامانه آبرسانی شهر اشنویه همچنین شامل خط انتقال به طول ۴ کیلومتر، شبکه توزیع آب به طول ۱۰۵ کیلومتر (با دو پهنه مجزا)، ۱ دستگاه شیر فشارشکن و ۲ ایستگاه پمپاژ مجهز به بوسترپمپ (پمپاژ مستقیم به شبکه) است. در این شبکه، داده‌های فشار گرهی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری به صورت هر ۱۰ دقیقه یک بار و برای بیش از ۲ هفته در فصل بهار و تابستان سال ۱۳۹۸ اندازه‌گیری شد. مدل‌سازی شبکه توزیع آب اشنویه بر اساس متوسط فشار ساعتی در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز انجام شد، به طوری که در آن تغییرات فشار در ساعت‌های مختلف متناسب با تغییرات ضرایب الگوی مصرف ساعتی بر اساس ضرایب شکل ۳ است. برای تجزیه و تحلیل نتایج از تمامی داده‌های ۱۰ دقیقه‌ای موجود در ایستگاه‌ها استفاده شد و نتایج تنها برای ساعات‌های حداقل، حداکثر و متوسط مصرف یعنی در ساعات ۵،



$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum f_i (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (6)$$

که در آنها

\bar{X} میانگین داده‌ها، f_i فراوانی هر دسته، X_i نشان یا نماینده هر دسته، M_d میانه داده‌ها، L_{Md} کران پایین دسته میانه‌دار، f فراوانی دسته میانه‌دار، F فراوانی تجمعی دسته ماقبل دسته میانه‌دار، n تعداد کل داده‌ها، C طول هر دسته، M_0 نمای داده‌ها، L_{M0} کران پایین دسته نمایی، d_1 اختلاف فراوانی دسته نمایی و دسته ماقبل آن، d_2 اختلاف فراوانی دسته نمایی و دسته بعد از آن، R دامنه تغییرات، X_{max} بزرگترین داده، X_{min} کوچکترین داده و σ انحراف معیار داده‌ها است.

۲-۴- روندنمای پژوهش

در این پژوهش، داده‌های میدانی فشار گرهی در دو شبکه توزیع آب واقعی بررسی و تحلیل آماری شد. برای این منظور در گام اول، داده‌های فشار گرهی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های فشارسنجی جمع‌آوری شد. در گام دوم داده‌های جمع‌آوری شده در بازه‌های زمانی ۱۰ یا ۱۵ دقیقه‌ای، به صورت ساعتی و برای روزهای متوالی مرتب و در گام سوم داده‌های مرتب شده، دسته‌بندی شدند. در گام چهارم مقدار حداقل و حداکثر داده‌ها و ضریب تغییرات آنها بر اساس داده‌های مرتب شده ۱۰ یا ۱۵ دقیقه‌ای در هر ساعت و مقدار میانگین، میانه و نما بر اساس داده‌های دسته‌بندی شده تعیین شد. در دو گام آخر نیز نتایج تجزیه و تحلیل شد و در زمان‌های مختلف حداقل، متوسط و حداکثر مصرف شبکه، مقایسه شد. روندنمای کلی روش پژوهش در شکل ۴ آمده است.

۳- نتایج و بحث

به طور کلی، در مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب و تنظیم ضرایب مختلف شبکه، امکان استفاده از همه داده‌های میدانی وجود ندارد و باید برابری قابل قبول از داده‌های میدانی به صورت روزانه، ساعتی یا در بازه‌های زمانی کوچکتر استفاده شود. انتخاب بازه زمانی می‌تواند مرتبط با نوع مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه شامل مدل‌سازی استاتیک (حداکثر روزانه) و یا مدل‌سازی دینامیک (۲۴ ساعت در

مدل‌سازی و کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب، معمولاً متوسط داده‌ها به صورت ساعتی در آنها استفاده می‌شود و در مجموع نیاز به مرتب‌سازی و دسته‌بندی داده‌ها به صورت ساعتی وجود دارد. در این پژوهش، با توجه به اینکه داده‌های فشار گرهی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری در شبکه توزیع آب اهر به صورت ۱۵ دقیقه یک‌بار و در شبکه توزیع آب اشنویه به صورت ۱۰ دقیقه یک‌بار و در طول چندین روز متوالی اندازه‌گیری شد.

ابتدا داده‌ها به صورت ساعتی در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز مرتب شدند و برای بررسی روند تغییرات ساعتی داده‌های فشار، این داده‌ها در دسته‌های مختلف فشار دسته‌بندی شدند که برای دسته‌بندی آنها از معادله تجربی استورجس به صورت معادله ۱ استفاده شد (Nazmfar et al., 2018)

$$K = 1 + 3.3 \log n \quad (1)$$

که در آن

n تعداد داده‌ها و k تعداد دسته‌ها است. با توجه به اینکه حداقل داده‌ها در هر دسته ۲۸ و حداکثر ۵۲ است، حدود ۵ تا ۷ دسته برای تغییرات فشار در هر ساعت در نظر گرفته شده است.

۲-۳- شاخص‌های آماری

برای واکاوی داده‌های فشار گرهی، شاخص‌های آماری شامل میانگین، میانه، نما، دامنه تغییرات و انحراف معیار (به ترتیب مطابق معادلات ۲ تا ۶) استفاده شد (Bohrani, 2011)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^m f_j X_j}{\sum_{j=1}^m f_j} \quad (2)$$

$$M_d = L_{Md} + \frac{\frac{n}{2} - F}{f} \times C \quad (3)$$

$$M_0 = L_{M0} + \frac{d_1}{d_1 + d_2} \times C \quad (4)$$

$$R = X_{max} - X_{min} \quad (5)$$



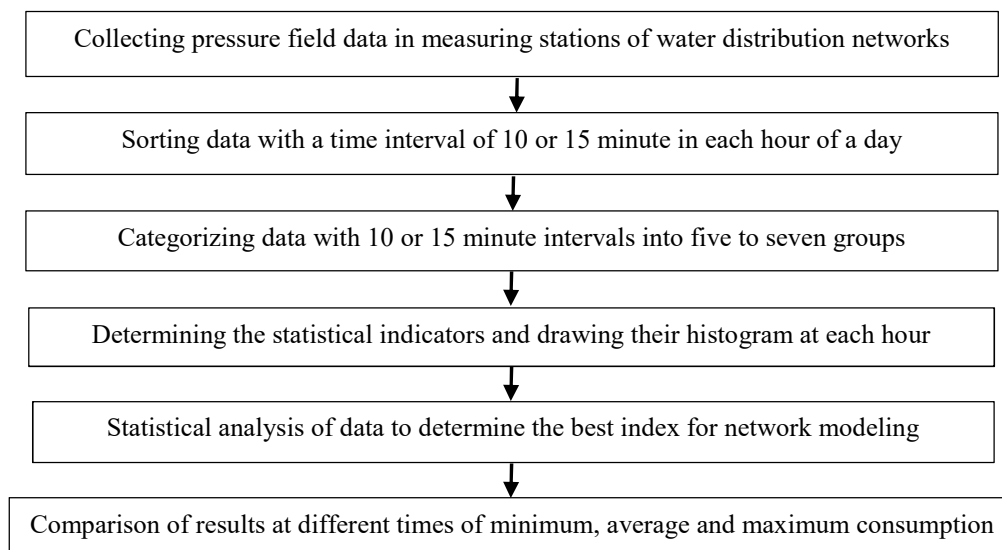


Fig. 4. Flowchart of the methodology

شکل ۴- روند نمای روش پژوهش

افتاد. مقدار شاخص‌های آماری برای ایستگاه‌های مختلف در زمان حداقل مصرف در جدول ۱ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، در زمان حداقل مصرف، حداکثر فشار گرهی در ایستگاه S3 از مناطق پست شهر اتفاق افتاد و مقدار آن برابر ۷۲/۷ متر و بیش از حداکثر فشار مجاز تعریف شده در نشریه ۳-۱۱۷ (بازنگری پنجم) یعنی ۶۰ متر بود. همچنین حداقل فشار گرهی در ایستگاه S5 از مناطق مرتفع شهر و با مقدار ۱/۲۰ متر اتفاق افتاد که کمتر از حداقل مقدار مجاز برای پوشش فشار در ساختمان‌های ۳ طبقه یعنی ۲۲ متر بود. بیشترین دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها در ایستگاه‌های S3 و S12 با مقدار به ترتیب ۸/۱۶، ۳/۷۵ و ۴/۱۶، ۴/۶۶ متر و کمترین دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها در ایستگاه S20 با مقدار ۸/۰ و ۲۲/۰ متر اتفاق افتاد.

برای بررسی روند تغییرات مقدار میانگین، میانه و نما در ایستگاه‌های مختلف شبکه توزیع آب اهر نمودار هیستوگرام داده‌های دسته‌بندی شده برای چهار ایستگاه منتخب شامل S1، S12، S17 و S24 در زمان حداقل مصرف در شکل ۴ نشان داده شده است. در ایستگاه اول مقدار میانگین، میانه و نما داده‌ها به ترتیب برابر ۱۶/۵۸، ۲۰/۵۸ و ۴۲/۵۹ متر بود که بر اساس هیستوگرام این ایستگاه در شکل ۵ در حدود ۴۰ درصد داده‌ها در دسته نما و حدود ۱۰ درصد داده‌ها در دسته میانگین و میانه و حدود ۵۰ درصد

طول شبانه‌روز یا بازه‌های زمانی کوچکتر) باشد. در ارتباط با هر کدام از این مدل‌ها و در مرحله تنظیم ضرایب نیاز است در مورد نوع و نحوه استفاده از برایندهای داده‌های میدانی جمع‌آوری شده، تصمیم‌گیری شود. سوال مطرح در این پژوهش این بود که در تنظیم ضرایب مدل شبکه توزیع آب، از بین شاخص‌های آماری مرکزی شامل میانگین، میانه و نما داده‌ها، بهتر است کدام شاخص استفاده شود؟ برای این منظور تحلیل آماری داده‌های میدانی در شبکه توزیع آب شهر اهر و شبکه توزیع آب شهر اشنویه بررسی شد که نتایج حاصل از آن برای زمان‌های حداقل، متوسط و حداکثر مصرف ارائه می‌شود.

۳-۱- شبکه توزیع آب شهر اهر

در این بخش، نتایج تحلیل آماری بیش از صد داده جمع‌آوری شده از ۲۲ ایستگاه فشارسنجی در شبکه توزیع آب اهر به صورت ۱۵ دقیقه‌ای و در طول بیش از ۱ هفته در ساعت‌های حداقل، حداکثر و متوسط مصرف شبکه ارائه می‌شود.

۳-۱-۱- نتایج تحلیل آماری برای زمان حداقل مصرف در شبکه توزیع آب اهر

حداقل مصرف در شبکه توزیع آب اهر در ساعت ۴ شب اتفاق



جدول ۱- تغییرات فشار در هر یک از ایستگاه‌ها در زمان حداقل مصرف در شبکه توزیع آب اهر

Table 1. The pressure variation at each station for the minimum consumption time in the water distribution network of Ahar

Station	Average (m)	Max (m)	Min (m)	Median (m)	Mode (m)	R (m)	SD (m)
S1	58.16	59.70	56.50	58.20	59.42	3.20	1.14
S2	68.88	70.30	67.30	69.25	69.96	3.00	1.03
S3	69.58	72.70	55.90	70.61	71.19	16.80	3.75
S4	51.52	53.70	46.40	52.23	52.70	7.30	2.21
S5	20.78	21.20	20.10	20.83	21.17	1.10	0.38
S6	37.78	38.50	37.10	38.06	37.77	1.40	0.31
S7	50.04	50.80	49.10	50.13	50.21	1.70	0.42
S8	50.00	51.20	48.30	50.14	50.30	2.90	0.71
S9	52.15	53.90	50.80	52.07	52.00	3.10	0.76
S10	24.89	25.50	24.10	25.00	25.18	1.50	0.47
S12	65.20	68.40	52.00	67.00	67.93	16.40	4.66
S13	62.79	64.50	60.60	62.83	62.90	4.00	0.97
S14	23.80	25.00	22.20	24.09	24.27	2.80	0.75
S16	38.40	39.80	37.80	40.00	39.33	2.00	0.65
S17	42.83	43.00	41.00	43.30	43.20	2.00	0.59
S20	65.65	66.00	65.20	65.68	65.70	0.80	0.22
S21	38.23	38.80	37.30	38.25	38.30	1.50	0.43
S22	51.75	52.10	51.20	51.75	51.75	0.90	0.35
S23	55.78	56.60	54.80	56.00	56.17	1.80	0.62
S24	42.68	43.70	42.20	42.57	42.41	1.50	0.45
S25	26.75	28.30	24.90	26.50	28.00	3.40	1.42
S27	50.10	50.90	49.40	50.08	50.00	1.50	0.43
Sum	47.62	72.7	20.1	47.93	48.18	3.66	1.03

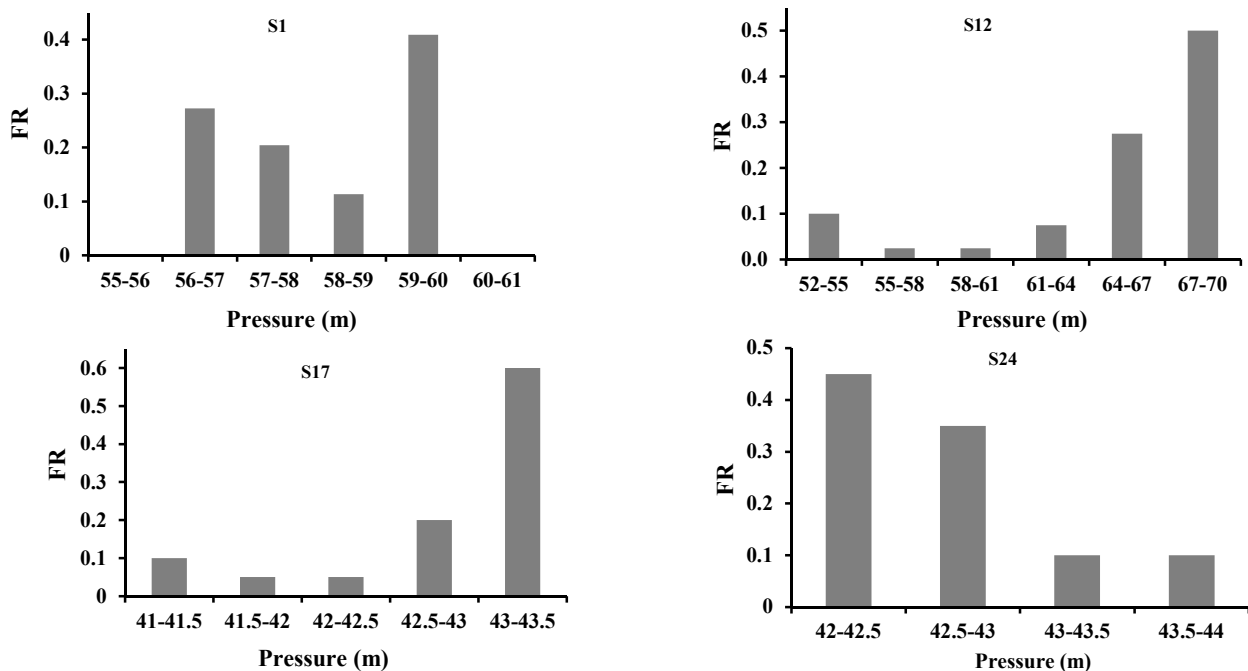


Fig. 5. Frequency variation of nodal pressure data for the minimum consumption time at different stations of the water distribution network of Ahar

شکل ۵- تغییرات فراوانی داده‌های فشار گره‌های شبکه در زمان حداقل مصرف در ایستگاه‌های مختلف شبکه توزیع آب اهر



مقدار ۳۱ متر، بیشترین انحراف معیار داده‌ها در ایستگاه S17 با مقدار ۱۲/۹۳ متر، کمترین دامنه تغییرات در ایستگاه S14 با مقدار ۴/۳۰ متر و کمترین انحراف معیار داده‌ها در ایستگاه S10 با مقدار ۱/۰۲ متر اتفاق افتاد.

در شکل ۶ نمودار هیستوگرام داده‌های دسته‌بندی شده برای چهار ایستگاه منتخب شامل S1، S12، S17 و S24 نشان داده شده است. در ایستگاه اول مقدار میانگین، میانه و نمای داده‌های فشار به ترتیب برابر ۰۹/۳۴، ۲۰/۳۴ و ۳۳/۳۴ متر بود که حدود ۲۵ درصد داده‌ها در دسته میانگین، میانه و نما و حدود ۷۵ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت. در ایستگاه ۱۲ مقدار میانگین، میانه و نمای داده‌ها به ترتیب برابر ۴۰/۴۳، ۰۰/۴۴ و ۳۸/۴۴ متر بود که حدود ۳۸ درصد داده‌ها در دسته میانگین، میانه و نما و حدود ۶۲ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت. همچنین در ایستگاه ۱۷، مقدار میانگین، میانه و نمای داده‌ها به ترتیب برابر ۶۰/۳۴، ۰۰/۳۴ و ۲۷/۳۷ متر بود که حدود ۲۰ درصد داده‌ها در دسته میانه، حدود ۳۵ درصد داده‌ها در دسته نما و حدود ۴۵ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشته و هیچ داده‌ای در دسته میانگین قرار ندارد که در نوع خود بسیار اهمیت دارد و در نهایت در ایستگاه ۲۴ مقدار میانگین، میانه و نما به ترتیب برابر ۹۵/۱۹، ۴۸/۲۱ و ۴۰/۲۲ متر بود که در آن ۵۵ درصد داده‌ها در دسته نما و میانه، حدود ۲۰ درصد داده‌ها در دسته میانگین و ۲۵ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت.

برای بررسی بیشتر این موضوع، مقدار درصد داده‌ها که در دسته میانگین، میانه، نما و سایر دسته‌ها در ایستگاه‌های مختلف قرار گرفته‌اند، در جدول ۴ برای زمان حداکثر مصرف آمده است. به‌طور کلی در زمان حداکثر مصرف در شبکه توزیع آب اهر، حدود ۱۸ درصد داده‌ها در دسته میانگین، ۲۶ درصد داده‌ها در دسته میانه، ۳۰ درصد داده‌ها در دسته نما و ۲۶ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت.

۳-۱-۳- نتایج تحلیل آماری برای زمان متوسط مصرف در شبکه توزیع آب اهر

متوسط مصرف در شبکه توزیع آب اهر در ساعت ۲۲ شب اتفاق افتاد. مقدار شاخص‌های آماری برای ایستگاه‌های مختلف در این ساعت در جدول ۵ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، در زمان

داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت. در ایستگاه ۱۲، مقدار میانگین، میانه و نمای داده‌ها به ترتیب برابر ۲۰/۶۵، ۰۰/۶۷ و ۹۳/۶۷ متر بود که حدود ۳۰ درصد داده‌ها در دسته میانگین و حدود ۵۰ درصد داده‌ها در دسته میانه و نما و حدود ۲۰ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت. همچنین در ایستگاه ۱۷، مقدار میانگین، میانه و نمای داده‌ها به ترتیب برابر ۸۳/۴۲، ۳۰/۴۳ و ۲۰/۴۳ متر بود که با مقایسه در نمودار هیستوگرام این ایستگاه در شکل ۵ مشخص شد که حدود ۶۰ درصد داده‌ها در دسته میانه و نما و حدود ۲۰ درصد داده‌ها در دسته میانگین و حدود ۲۰ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار دارد و در نهایت در ایستگاه ۲۴ مقدار میانگین، میانه و نما به ترتیب برابر ۶۸/۴۲، ۵۷/۴۲ و ۴۱/۴۲ متر بود که در آن ۴۵ درصد داده‌ها در دسته نما و ۳۵ درصد داده‌ها در دسته میانگین و نما و ۲۰ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت.

برای بررسی بیشتر این موضوع مقدار درصد داده‌ها که در دسته میانگین، میانه و نما و سایر دسته‌ها در ایستگاه‌های مختلف قرار گرفته‌اند، در جدول ۲ برای زمان حداقل مصرف نشان داده شده است. جمع‌بندی نتایج این جدول که نشان‌دهنده درصد تخصیص داده‌های میدانی به دسته‌های میانگین، میانه، نما و سایر دسته‌ها در زمان حداقل مصرف برای تمامی ایستگاه‌ها است، در سطر آخر جدول ۲ آمده است. به‌طور کلی در زمان حداقل مصرف در شبکه توزیع آب اهر، حدود ۲۰ درصد داده‌ها در دسته میانگین، ۲۵ درصد داده‌ها در دسته میانه، ۳۰ درصد داده‌ها در دسته نما و ۲۰ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت.

۳-۱-۲- نتایج تحلیل آماری برای زمان حداکثر مصرف در شبکه توزیع آب اهر

حداکثر مصرف در شبکه توزیع آب اهر در ساعت ۱۲ ظهر اتفاق افتاد. مقدار شاخص‌های آماری برای ایستگاه‌های مختلف در زمان حداکثر مصرف در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، در این زمان، حداکثر فشار گرهی در ایستگاه S20 اتفاق افتاد که مقدار آن برابر ۲۰/۵۳ متر و کمتر از حداکثر فشار مجاز تعریف شده در نشریه ۳-۱۱۷ یعنی ۶۰ متر بود. همچنین حداقل فشار گرهی در ایستگاه S21 و با مقدار ۵۰/۳ متر اتفاق افتاد که بسیار کمتر از حداقل مقدار مجاز برای پوشش فشار در یک ساختمان یک طبقه یعنی ۱۴ متر بود. بیشترین دامنه تغییرات در ایستگاه S27 با



جدول ۲- درصد تخصیص داده‌های میدانی به دسته‌های میانگین، میانه، نما و سایر دسته‌ها در زمان حداقل مصرف در ایستگاه‌های مختلف شبکه توزیع آب اهر

Table 2. Allocation percentage of field data to the average, median, mode and other categories for the minimum consumption time at different stations of the water distribution network of Ahar

Station	Average	Median	Mode	Other
S1	0.114	0.114	0.409	0.477
S2	0.077	0.077	0.481	0.442
S3	0.365	0.519	0.519	0.115
S4	0.159	0.455	0.455	0.386
S5	0.205	0.205	0.432	0.364
S6	0.563	0.563	0.563	0.438
S7	0.563	0.563	0.563	0.438
S8	0.550	0.550	0.550	0.450
S9	0.575	0.575	0.575	0.425
S10	0.225	0.450	0.450	0.325
S12	0.275	0.500	0.500	0.225
S13	0.375	0.375	0.375	0.625
S14	0.100	0.425	0.425	0.475
S16	0.050	0.350	0.350	0.600
S17	0.200	0.600	0.600	0.200
S20	0.700	0.700	0.700	0.300
S21	0.400	0.400	0.400	0.600
S22	0.500	0.500	0.500	0.500
S23	0.250	0.438	0.438	0.313
S24	0.350	0.350	0.450	0.200
S25	0.000	0.160	0.500	0.500
S27	0.375	0.375	0.375	0.625
Sum	20%	25%	30%	25%

جدول ۳- تغییرات فشار در هر یک از ایستگاه‌ها در زمان حداکثر مصرف در شبکه توزیع آب اهر

Table 3. The pressure variation at each station for the maximum consumption time in the water distribution network of Ahar

Station	Average (m)	Max (m)	Min (m)	Median (m)	Mode (m)	R (m)	SD (m)
S1	34.09	38.10	28.70	34.20	34.33	9.40	2.65
S2	43.30	47.70	36.40	42.91	46.14	11.30	2.64
S3	45.00	51.90	31.40	49.08	49.20	20.50	4.46
S4	31.05	38.30	14.80	32.23	32.61	23.50	4.70
S5	17.61	19.40	11.00	18.00	18.13	8.40	1.84
S6	29.80	32.60	26.20	30.26	32.52	6.40	1.56
S7	25.88	33.30	16.10	26.20	26.57	17.20	3.86
S8	19.44	25.70	12.50	20.15	20.91	13.20	3.16
S9	43.92	46.90	23.50	45.40	45.81	29.00	5.97
S10	15.73	17.10	13.80	15.65	15.41	4.40	1.02
S12	43.40	47.40	37.30	44.00	44.38	10.10	2.54
S13	31.03	38.40	21.80	32.13	34.94	19.50	5.72
S14	9.73	11.60	7.30	10.06	10.41	4.30	1.13
S16	32.70	34.10	25.00	34.00	32.00	9.10	2.65
S17	34.60	37.90	32.60	34.00	37.27	9.10	12.93
S20	46.90	53.20	28.40	51.25	52.43	24.80	9.13
S21	19.70	26.90	3.50	22.17	24.30	23.40	7.28
S22	48.14	49.80	41.20	48.81	49.14	8.60	1.98
S23	31.78	34.50	25.40	33.20	33.82	9.10	2.97
S24	19.95	25.70	7.40	21.48	22.40	18.30	4.13
S25	15.81	19.70	4.30	17.50	18.00	15.40	4.91
S27	17.23	26.70	4.30	21.63	24.96	31.00	10.67
Sum	29.85	53.20	3.50	31.10	32.08	14.82	4.45



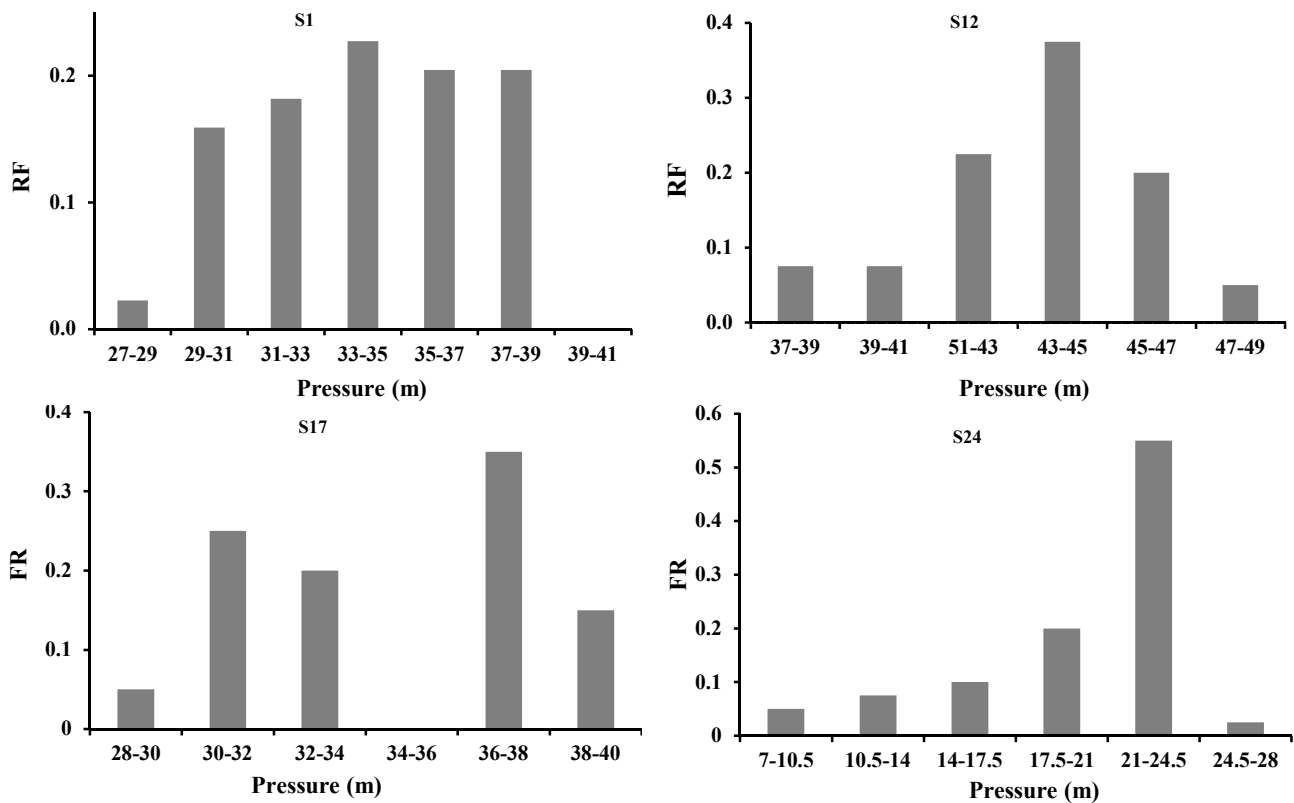


Fig. 6. Frequency variation of nodal pressure data for the maximum consumption time at different stations of the water distribution network of Ahar

شکل ۶- تغییرات فراوانی داده‌های فشار گره‌های شبکه در زمان حداکثر مصرف در ایستگاه‌های مختلف شبکه توزیع آب اهر

دسته میانگین و میانه و حدود ۳۵ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت. در ایستگاه ۱۲ مقدار میانگین، میانه و نمای داده‌ها به ترتیب برابر $۵۲/۴۰$ ، $۵۰/۷۰$ و $۵۱/۱۰$ متر بود که حدود ۳۸ درصد داده‌ها در دسته میانگین، میانه و نما و حدود ۶۲ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت. همچنین در ایستگاه ۱۷ مقدار میانگین، میانه و نمای داده‌ها به ترتیب برابر $۳۸/۲۵$ ، $۳۸/۲۹$ و $۳۸/۵۰$ متر بود که حدود ۳۰ درصد داده‌ها در دسته میانگین، میانه و نما و حدود ۷۰ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت و در نهایت در ایستگاه ۲۴ مقدار میانگین، میانه و نما به ترتیب برابر $۳۴/۹۳$ ، $۳۵/۰۹$ و $۳۵/۳۸$ متر بود که در آن ۴۰ درصد داده‌ها در دسته نما و میانه، ۳۰ درصد داده‌ها در دسته میانگین و ۳۰ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت.

برای بررسی بیشتر این موضوع مقدار درصد داده‌ها که در دسته میانگین، میانه، نما و سایر دسته‌ها در ایستگاه‌های مختلف قرار گرفته‌اند در جدول ۶ برای زمان متوسط مصرف نشان داده شده

متوسط مصرف، حداکثر فشار گرهی در ایستگاه S3 از مناطق پست شهر اتفاق افتاد و مقدار آن برابر $۶۸/۹۰$ متر و بیشتر از حداکثر فشار مجاز تعریف شده در نشریه ۳-۱۱۷ یعنی ۶۰ متر بود. همچنین حداقل فشار گرهی در ایستگاه S5 از مناطق مرتفع شهر و با مقدار $۱۰/۲۰$ متر اتفاق افتاد که کمتر از حداقل مقدار مجاز برای پوشش فشار در ساختمان‌های یک طبقه یعنی ۱۴ متر بود. بیشترین دامنه تغییرات داده‌ها در ایستگاه S3 با مقدار $۳۰/۴۰$ متر و بیشترین انحراف معیار داده‌ها در ایستگاه S23 با مقدار $۸/۳۳$ متر و کمترین دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها در ایستگاه S5 با مقدار $۲/۶۰$ و $۰/۴۹$ متر اتفاق افتاد.

نمودار هیستوگرام داده‌های دسته‌بندی شده در زمان متوسط مصرف در ایستگاه‌های منتخب شامل S1، S12، S17، S24 در شکل ۷ نشان داده شده است. در ایستگاه اول مقدار میانگین، میانه و نمای داده‌ها به ترتیب برابر $۴۳/۹۶$ ، $۴۳/۵۰$ و $۴۱/۴۳$ متر بود که در حدود ۴۵ درصد داده‌ها در دسته نما، حدود ۲۰ درصد داده‌ها در



جدول ۴- درصد تخصیص داده‌های میدانی به دسته‌های میانگین، میانه، نما و سایر دسته‌ها در زمان حداکثر مصرف در ایستگاه‌های مختلف شبکه توزیع آب اهر

Table 4. Allocation percentage of field data to the average, median, mode and other categories for the maximum consumption time at different stations of the water distribution network of Ahar

Station	Average	Median	Mode	Other
S1	0.227	0.227	0.227	0.773
S2	0.262	0.262	0.31	0.429
S3	0.288	0.462	0.462	0.25
S4	0.682	0.682	0.682	0.318
S5	0.477	0.477	0.477	0.523
S6	0.208	0.208	0.396	0.396
S7	0.417	0.417	0.417	0.583
S8	0.225	0.425	0.425	0.35
S9	0.806	0.806	0.806	0.194
S10	0.325	0.325	0.35	0.325
S12	0.375	0.375	0.375	0.625
S13	0.167	0.167	0.271	0.563
S14	0.2	0.425	0.425	0.375
S16	0.2	0.4	0.4	0.4
S17	0	0	0.35	0.65
S20	0.15	0.6	0.6	0.25
S21	0.3	0.3	0.4	0.3
S22	0.158	0.632	0.632	0.211
S23	0.167	0.556	0.556	0.278
S24	0.2	0.55	0.55	0.25
S25	0	0.5	0.5	0.5
S27	0.2	0.2	0.45	0.35
Sum	18%	26%	30%	26%

جدول ۵- تغییرات فشار در هر یک از ایستگاه‌ها در زمان متوسط مصرف در شبکه توزیع آب اهر

Table 5. The pressure variation at each station for the average consumption time in the water distribution network of Ahar

Station	Average (m)	Max (m)	Min (m)	Median (m)	Mode (m)	R (m)	SD (m)
S1	43.96	59.20	35.60	43.50	41.43	22.60	5.58
S2	54.69	66.70	48.60	53.05	50.74	18.10	4.96
S3	54.13	68.90	38.50	53.92	52.32	30.40	7.12
S4	41.24	57.10	30.90	39.50	38.00	26.20	6.95
S5	19.98	20.60	18.00	20.03	20.08	2.60	0.49
S6	33.06	35.50	28.60	33.33	33.55	6.90	1.35
S7	35.81	45.10	15.70	36.64	37.09	29.40	5.67
S8	32.50	41.10	17.50	34.25	35.50	23.60	5.87
S9	48.43	50.70	46.90	48.50	48.50	6.60	1.29
S10	20.20	21.80	18.20	20.33	20.44	4.50	1.00
S12	52.40	65.60	42.80	50.70	51.10	22.80	6.11
S13	45.54	57.20	40.20	45.38	45.25	20.50	4.63
S14	16.48	28.20	10.20	13.41	11.96	18.00	5.41
S16	35.70	36.70	32.90	36.30	36.14	4.20	1.33
S17	38.25	40.70	36.30	38.29	38.50	4.40	1.24
S20	59.08	63.10	53.90	59.21	59.83	9.20	2.11
S21	31.81	35.80	28.40	31.75	32.50	7.40	2.03
S22	50.00	51.00	45.60	50.35	50.57	5.40	1.14
S23	41.40	53.90	27.10	40.50	39.00	26.80	8.33
S24	34.93	38.20	30.60	35.09	35.38	7.60	1.59
S25	21.75	24.70	18.30	21.90	22.80	6.40	1.83
S27	37.13	41.80	27.20	37.42	37.00	14.60	3.24
Sum	38.57	68.90	10.20	38.33	38.08	14.46	3.60



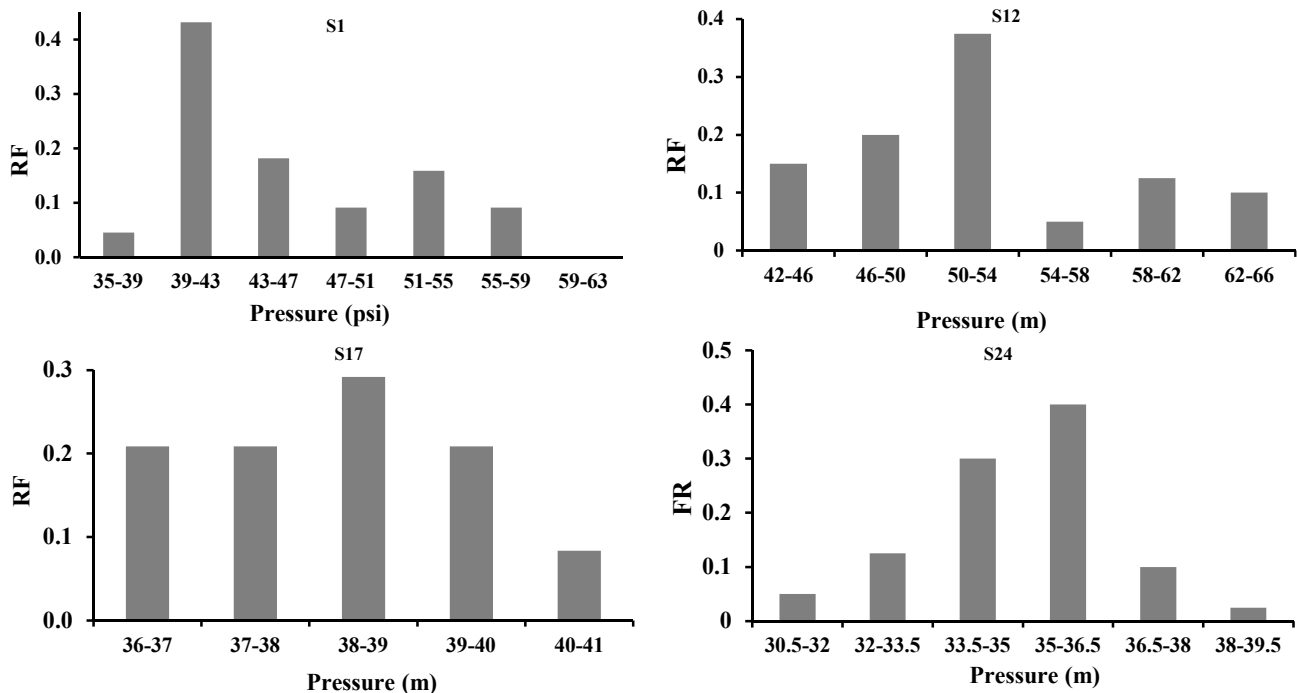


Fig. 7. Frequency variation of nodal pressure data for the average consumption time at different stations of the water distribution network of Ahar

شکل ۷- تغییرات فراوانی داده‌های فشار گره‌های شبکه در زمان متوسط مصرف در ایستگاه‌های مختلف شبکه توزیع آب اهر

جدول ۶- درصد تخصیص داده‌های میدانی به دسته‌های میانگین، میانه، نما و سایر دسته‌ها

در زمان متوسط مصرف در ایستگاه‌های مختلف شبکه توزیع آب اهر

Table 6. Allocation percentage of field data to the average, median, mode and other categories for the average consumption time at different stations of the water distribution network of Ahar

Station	Average	Median	Mode	Other
S1	0.182	0.182	0.432	0.386
S2	0.192	0.192	0.442	0.365
S3	0.25	0.25	0.308	0.442
S4	0.25	0.25	0.341	0.409
S5	0.432	0.432	0.432	0.568
S6	0.563	0.563	0.563	0.438
S7	0.458	0.458	0.458	0.542
S8	0.175	0.40	0.40	0.425
S9	0.40	0.40	0.40	0.20
S10	0.535	0.535	0.535	0.465
S12	0.375	0.375	0.375	0.625
S13	0.271	0.271	0.271	0.729
S14	0.108	0.514	0.514	0.378
S16	0.208	0.208	0.25	0.542
S17	0.292	0.292	0.292	0.708
S20	0.292	0.292	0.333	0.375
S21	0.25	0.25	0.25	0.50
S22	0.65	0.65	0.65	0.35
S23	0.15	0.15	0.30	0.55
S24	0.30	0.40	0.40	0.30
S25	0.25	0.25	0.30	0.45
S27	0.30	0.30	0.30	0.70
Sum	21%	23%	26%	31%



شده از ۱۲ ایستگاه فشارسنجی در شبکه توزیع آب اشنویه به صورت ۱۰ دقیقه‌ای و در طول بیش از ۱ هفته در ساعت‌های حداقل، حداکثر و متوسط مصرف شبکه در جدول ۸ ارائه شده است. مطابق این جدول، در زمان حداقل مصرف در شبکه توزیع آب اشنویه، از میان داده‌های جمع‌آوری شده در ایستگاه‌های مختلف، بیشترین تخصیص داده‌ها مربوط به سایر دسته‌ها در ایستگاه ۲ با حدود ۷۲/۶ درصد و بعد از آن مربوط به دسته‌های میانگین، میانه و نما در ایستگاه ۵ با حدود ۶۵ درصد بود. همچنین جمع‌بندی تمامی ایستگاه‌ها نشان داد که در زمان حداقل مصرف به ترتیب ۲۷، ۲۴ و ۱۹ درصد داده‌ها در دسته‌های نما، میانه و میانگین و ۳۱ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار دارند. در زمان حداکثر مصرف، بیشترین تخصیص داده‌ها مربوط به سایر دسته‌ها در ایستگاه ۱ با حدود ۷۳/۴ درصد و بعد از آن نیز مربوط به سایر دسته‌ها در ایستگاه ۷ با حدود ۷۲/۶ درصد بود.

همچنین، جمع‌بندی تمامی ایستگاه‌ها نشان داد که در زمان حداکثر مصرف، به ترتیب ۲۲، ۲۲ و ۲۱ درصد داده‌ها در دسته‌های نما، میانه و میانگین و ۳۵ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار دارند. همچنین در زمان متوسط مصرف بیشترین تخصیص داده‌ها مربوط به هر سه دسته نما، میانه و میانگین در ایستگاه ۵ و سایر دسته‌ها در ایستگاه‌های ۱۰ و ۱۱ با حدود ۶۰ درصد داده‌ها بود. بررسی کلی نتایج برای تمامی ایستگاه‌ها نشان داد که در زمان متوسط مصرف برعکس زمان حداقل و حداکثر مصرف دسته نما بیشترین تخصیص در حدود ۳۰ درصد و دسته میانه، سایر دسته‌ها و دسته میانگین به ترتیب ۲۹، ۲۵ و ۱۶ درصد تخصیص‌ها را دارند.

همچنین بررسی نتایج برای کل شبکه در سه زمان حداقل، حداکثر و متوسط نشان داد که در این شبکه بیشترین تخصیص داده‌ها مربوط به سایر دسته‌ها و بعد از آن دسته نما، میانه و میانگین قرار دارد که به ترتیب ۳۰/۲، ۲۶/۳، ۲۴/۹ و ۱۸/۶ درصد از داده‌های جمع‌آوری شده را شامل می‌شوند. با توجه به تعدد و پراکندگی دسته‌ها در سایر دسته‌ها و با توجه به اینکه عدد مربوط به سایر دسته‌ها از تجمیع نتایج چند دسته به دست آمد، در حالی که عدد دسته نما مربوط به یک دسته واحد است، در این شبکه نیز دسته نما بهترین شاخص مرکزی برای استفاده در کالیبراسیون مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب است.

است. به طور کلی در زمان متوسط مصرف در شبکه توزیع آب اهر، حدود ۲۱ درصد داده‌ها در دسته میانگین، ۲۳ درصد داده‌ها در دسته میانه، ۲۶ درصد داده‌ها در دسته نما و ۳۱ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار داشت.

مقایسه کلی تغییرات داده‌ها در ایستگاه‌های مختلف در ساعت‌های حداقل، حداکثر و متوسط مصرف در جداول ۳، ۵ و ۷ نشان می‌دهد که هارمونی مشخصی برای تغییرات داده‌ها وجود ندارد، به طوری که مقدار حداکثر یا حداقل دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها در ساعت‌های مختلف به صورت مکانی در ایستگاه‌های شبکه جابه‌جا می‌شوند. به طور مثال در زمان حداقل مصرف، حداکثر دامنه تغییرات در ایستگاه ۳، حداکثر انحراف معیار در ایستگاه ۱۲ و حداقل دامنه تغییرات و انحراف معیار هر دو در ایستگاه ۲۰ اتفاق افتاد. این در حالی است که در زمان حداکثر مصرف، حداکثر دامنه تغییرات در ایستگاه ۲۷، حداکثر انحراف معیار در ایستگاه ۱۷، حداقل دامنه تغییرات در ایستگاه ۱۴ و حداقل انحراف معیار در ایستگاه ۱۰ رخ داد. در زمان متوسط مصرف نیز حداکثر دامنه تغییرات و انحراف معیار هر دو در ایستگاه ۳ و حداقل دامنه تغییرات و انحراف معیار هر دو در ایستگاه ۵ اتفاق افتاد. این موضوع طبیعت تصادفی تغییرات و پیچیدگی توزیع مصارف در شبکه‌های توزیع آب را نمایان کرد.

جمع‌بندی نتایج برای سه زمان حداقل، متوسط و حداکثر مصرف در شبکه توزیع آب اهر در ارتباط با نحوه تخصیص داده‌های میدانی به دسته‌های شاخص‌های مرکزی شامل میانگین، میانه و نما در جدول ۷ نشان داده شده است. همان طور که از این جدول مشخص است، از مجموع داده‌های موجود در ۲۲ ایستگاه بررسی شده شهر اهر، به طور کلی ۲۸/۶ درصد داده‌ها در دسته نما، ۲۴/۶ درصد داده‌ها در دسته میانه، ۱۹/۶ درصد داده‌ها در دسته میانگین و ۲۷/۲ درصد داده‌ها در سایر دسته‌ها قرار دارند که نشان‌دهنده استفاده از نما در کالیبراسیون مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب، به دلیل تأثیرپذیری از تعداد داده‌های میدانی بیشتر می‌تواند دقت مدل را افزایش دهد.

۳-۲- شبکه توزیع آب شهر اشنویه

در این بخش، نتایج تحلیل آماری بیش از صدها داده جمع‌آوری



جدول ۷- درصد تخصیص داده‌های میدانی به دسته‌های میانگین، میانه، نما و سایر دسته‌ها در زمان‌های حداقل، حداکثر و متوسط مصرف در شبکه توزیع آب اهر

Table 7. Allocation percentage of field data to the average, median, mode and other categories for the minimum, maximum and average times in the water distribution network of Ahar

	Average	Median	Mode	Other
Minimum time	20%	25%	30%	25%
Maximum time	18%	26%	30%	26%
Average time	21%	23%	26%	31%
Sum	19.6%	24.6%	28.6%	27.2%

جدول ۸- درصد تخصیص داده‌های میدانی به دسته‌های میانگین، میانه، نما و سایر دسته‌ها در زمان‌های حداقل، حداکثر و متوسط مصرف در ایستگاه‌های مختلف شبکه توزیع آب اشنویه

Table 8. Allocation percentage of field data to the average, median, mode and other categories for the minimum, maximum and average times at different stations of the water distribution network of Oshnaviyeh

Station	Min consumption				Max consumption				Average consumption				
	Ave	Med	Mod	Other	Ave	Med	Mod	Other	Ave	Med	Mod	Other	
S1	0.177	0.427	0.427	0.395	0.266	0.266	0.266	0.734	0.169	0.419	0.419	0.411	
S2	0.274	0.274	0.274	0.726	0.452	0.452	0.452	0.548	0.242	0.524	0.524	0.234	
S3	0.427	0.427	0.427	0.573	0.226	0.226	0.274	0.500	0.169	0.387	0.387	0.444	
S4	0.169	0.379	0.379	0.452	0.303	0.303	0.303	0.697	0.161	0.540	0.540	0.298	
S5	0.650	0.650	0.650	0.350	0.500	0.500	0.500	0.500	0.600	0.600	0.600	0.400	
S6	0.137	0.403	0.403	0.460	0.405	0.405	0.405	0.595	0.145	0.540	0.540	0.315	
S7	0.266	0.089	0.315	0.331	0.274	0.274	0.274	0.726	0.169	0.387	0.387	0.444	
S8	0.355	0.250	0.355	0.395	0.339	0.274	0.339	0.387	0.315	0.411	0.411	0.274	
S9	0.266	0.266	0.347	0.387	0.355	0.468	0.468	0.177	0.153	0.419	0.419	0.427	
S10	0.183	0.300	0.300	0.517	0.274	0.274	0.290	0.435	0.400	0.400	0.400	0.600	
S11	0.233	0.233	0.308	0.458	0.331	0.331	0.331	0.669	0.350	0.350	0.458	0.600	
S12	0.105	0.460	0.460	0.435	0.350	0.350	0.350	0.650	0.169	0.548	0.548	0.282	
Sum	19%	24%	27%	31%	21%	22%	22%	35%	16%	29%	30%	25%	
Sum	Average				Median				Mode				Other
	18.6%				24.9%				26.3%				30.2%

حداکثر، دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها بررسی و نتایج برای برخی ایستگاه‌ها در قالب هیستوگرام ارائه شد. همچنین میزان تخصیص داده‌ها به دسته‌های میانگین، میانه، نما و سایر دسته‌ها بررسی شد. با توجه به حجم بسیار زیاد داده‌ها در قالب ۳۶ ایستگاه فشارسنجی در دو شهر مورد مطالعه و تغییرات زمانی ۲۴ ساعته، نتایج در زمان حداقل، حداکثر و متوسط مصرف گزارش شد. تحلیل نتایج نشان داد از نظر زمانی و مکانی هارمونی مشخصی برای تغییرات داده‌ها در ساعت‌های حداقل، حداکثر و متوسط مصرف در ایستگاه‌های مختلف وجود ندارد، به طوری که

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از تحلیل آماری داده‌های فشار گرهی برای بررسی رفتار فشار گرهی و تعیین بهترین شاخص آماری مرکزی برای به‌کارگیری آن در کالیبراسیون مدل‌های شبکه‌های توزیع آب استفاده شد که به‌عنوان نوآوری پژوهش به حساب می‌آید. برای این منظور بیش از ۵۵۰۰ داده فشار گرهی در ۲۲ ایستگاه شبکه توزیع آب اهر و ۱۲ ایستگاه شبکه توزیع آب اشنویه، بررسی شد. داده‌ها در زمان‌ها و مکان‌های مختلف با استفاده از روش تجربی استورجس دسته‌بندی و روند تغییرات آن با تعیین مقدار حداقل،



بیشتری از داده‌های میدانی را فراهم کرده و می‌تواند منجر به ارتقای دقت مدل شود. انجام موضوع برای تمامی ساعت‌های شبانه‌روز و تولید داده‌های موردنیاز در ایستگاه‌های جدید با تحلیل آماری داده‌های میدانی می‌تواند در قالب پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد.

۵- قدردانی

نویسندگان، از مدیریت محترم امور آب و فاضلاب شهرهای اهر و اشنویه به دلیل کمک به تهیه داده‌های میدانی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مقدار حداقل و حداکثر دامنه تغییرات در ساعت‌ها و ایستگاه‌های مختلف متغیر بود که ماهیت تصادفی تغییرات و پیچیدگی توزیع مصارف در شبکه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین روند تخصیص داده‌ها به دسته‌ها نشان داد که در شبکه توزیع آب اهر بیشترین تخصیص با ۲۸/۶ درصد برای دسته نما و بعد با ۲۷/۲ درصد برای سایر دسته‌ها بود. این مورد در شبکه توزیع آب اشنویه برای سایر دسته‌ها و دسته نما، به ترتیب ۳۰/۲، ۲۶/۳ درصد بود که با توجه به تعدد و پراکندگی سایر دسته‌ها، دسته نما بهترین انتخاب بود. استفاده از شاخص نما به جای میانه یا میانگین در کالیبراسیون مدل‌های شبکه‌های توزیع آب، امکان هم‌پوشانی مدل هیدرولیکی با تعداد

References

- Amini, G., Entezam, H., Sadeghpour, A. & Davood Abedi, A. 2018a. Application of data mining to identify subscribers with unauthorized use of water (case study of Qom water and Wastewater Company). *2nd Iran Water and Wastewater Science Engineering Congress and National Conference on Demand and Supply of Drinking Water and Sanitation*, Isfahan, Iran. (In Persian)
- Amini, G., Entezam, H., Sadeghpour, A. & Davood Abedi, A. 2018b. Identification and extraction of water consumption patterns by data mining (case study of Qom water and wastewater company). *2nd Iran Water and Wastewater Science Engineering Congress and National Conference on Demand and Supply of Drinking Water and Sanitation*, Isfahan, Iran. (In Persian)
- Amini, G. 2020. Modeling of unauthorized water consumption detection (case study: Qom). *Journal of Water and Wastewater*, 31(4), 184-193. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2020.209875.2958>.
- Avand, M. T., Janizadeh, S. & Farzin, M. 2019. Groundwater potential determination on Yasouj-Sisakht area using random forest and generalized linear statistical models. *Range and Watershed Management* 72, 609-623. (In Persian)
- Bohrani, N. 2011. *Probability and Statistics for Engineers*. Gothenburg Pub., Tehran, Iran. (In Persian)
- Dini, M. & Tabesh, M. 2014. A new method for simultaneous calibration of demand pattern and Hazen-Williams coefficients in water distribution systems. *Water Resources Management*, 28, 2021-2034. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0592-4>.
- Dini, M. & Tabesh, M. 2017. Water distribution network quality model calibration: a case study-Ahar. *Water Science and Technology: Water Supply*, 17, 759-770. <https://doi.org/10.2166/ws.2016.166>.
- Dini, M. & Tabesh, M. 2019. Optimal renovation planning of water distribution networks considering hydraulic and quality reliability indices. *Urban Water Journal*, 16, 249-258. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1669185>.
- Ghorbani, K. 2016. Evaluation of hydrological and data mining models in monthly river discharge simulation and prediction (case study: Araz-Kouseh watershed). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23, 203-217. (In Persian)



- Hashemi, S., Filion, Y. & Speight, V. 2018. Identification of factors that influence energy performance in water distribution system mains. *Water*, 10, 428. <https://doi.org/10.3390/w10040428>.
- Nazmfar, H., Eshgheichharborj, A., Alvai, S. & Eshghei, S. 2018. Spatial analysis of the healthy city indicators in urban settlements (case study: Ardabil province). *Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 265-282. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jest.2019.13716>.
- Sattari, M. T., Mirabbasi Najaf Abadi, R. & Abbasgoli Naebzad, M. 2017. Surface water quality prediction using data mining method (case study: rivers of northern side of Sahand Mountain). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4, 407-419. (In Persian)
- Shirzad, A., Heidarzadeh, M. & Mohamadi, M. A. 2020. Providing hydraulic model and evaluating reliability of water distribution networks (case study: Oshnaviyeh City). *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 5, 39-47. (In Persian). <https://doi.org/10.22112/jwwse.2020.201614.1169>.
- Taj Abadi, Y., Jalili Ghazizade, M. & Moslehi, I. 2018. A field data-based method to determine the pressure-burst relationships in urban water distribution networks. *Environmental Sciences*, 16, 127-140. (In Persian)
- Talebian, M., Ahmadifar, H., Mirroshan, S. & Shakeri, M. 2019. Forecasting water consumption using data mining methods. *3rd International Conference on Smart Computing*. Rasht, Iran. (In Persian)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

