

Research Paper

مقاله پژوهشی

Calibration of Water Distribution Networks by Considering the Uncertainty of Nodal Pressure

کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن عدم قطعیت متغیر فشار در گره‌ها

Mehdi Dini^{1*}, Gholamreza Abbaspoor² and Seyyedeh Atra Saghebian²

مهدی دینی^{۱*}، غلامرضا عباس‌پور^۲ و سیده عطری ثاقبیان^۲

1- Associate Professor, Civil Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

2- M.Sc., Faculty of Engineering, Shahid Madani University of Azerbaijan, Tabriz, Iran.

۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

* Corresponding Author, Email: m.dini@azaruniv.ac.ir

* نویسنده مسئول، ایمیل: m.dini@azaruniv.ac.ir

Received: 04/07/2022

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۳

Revised: 09/12/2022

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۰۹/۱۸

Accepted: 16/03/2023

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Given that, observational data have different uncertainties, the calibration of water distribution networks based on a definite value can affect the results of the calibrated model. In this research, the calibration of water distribution networks by considering the uncertainty of nodal pressure has been investigated. For this purpose, first, by generating a series of nodal pressure data using the Monte Carlo method, the Hazen-Williams coefficients of the network have been obtained. Then, by producing a series of Hazen-Williams coefficients, the nodal pressure values have been calculated and the results of the two pressures have been compared. The calibration model was performed using the particle swarm optimization algorithm by linking the EPANET simulator in MATLAB. The proposed method has been implemented on the two-loop sample network and real water distribution network of Sufian city. The results show that the application of node pressure uncertainty in network nodes leads to multiple sets of solutions for Hazen-Williams coefficients of pipes with different variation ranges and standard deviations, which according to the average absolute error of 4 and 3.8 percent between the average nodal pressure in the sample and the real network in the non-deterministic mode with the deterministic mode, the proposed method, can be a more accurate method for calibrating networks. However, it should be noted that there are challenges in the modeling and execution time of calibration models.

با توجه به این‌که داده‌های مشاهداتی دارای عدم قطعیت‌های مختلف هستند، کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب بر اساس یک مقدار قطعی می‌تواند، نتایج مدل کالیبره شده را تحت تاثیر قرار دهد. در این تحقیق، کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن عدم قطعیت مقادیر فشار در گره‌های شبکه بررسی می‌شود. برای این منظور سری داده‌های فشار به روش مونت کارلو برای گره‌های شبکه تولید و ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه بر اساس این مقادیر به دست آمده و با تولید سری ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه، مقادیر فشار محاسباتی در گره‌های شبکه محاسبه و نتایج دو فشار مقایسه شده است. کالیبراسیون مدل شبکه با الگوریتم دسته ذرات در لینک با مدل EPANET در محیط MATLAB انجام شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه نمونه دوحلقه‌ای و شبکه توزیع آب شهر صوفیان پیاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اعمال عدم قطعیت فشارگره‌ها، منجر به مجموعه جواب‌های متعدد برای ضرایب هیزن-ویلیامز با دامنه تغییرات و انحراف معیار متفاوت می‌شود که با توجه به متوسط خطای مطلق ۴ و ۳/۸ درصدی بین میانگین فشارگره‌ها در شبکه نمونه و شبکه واقعی در حالت غیرقطعی با حالت قطعی، روش پیشنهادی می‌تواند روش دقیق تری برای کالیبراسیون شبکه‌ها باشد، با این وجود چالش‌هایی در مدل‌سازی و زمان اجرای مدل‌های کالیبراسیون وجود دارد.

Keywords: Water Distribution Network, Hazen-Williams Coefficient, Calibration, Uncertainty, Nodal Pressure.

کلمات کلیدی: شبکه توزیع آب، ضریب هیزن-ویلیامز، کالیبراسیون، عدم قطعیت، فشارگره‌ها.

شبیه‌ساز با دقت یکسان، حداقل نقاط نمونه‌برداری از نظر مکانی و زمانی، بسیار وابسته به عدم قطعیت داده‌ها است و با اعمال عدم قطعیت داده‌ها، تعداد نقاط نمونه‌برداری مورد نیاز، به شدت افزایش می‌یابد.

دینی و همکاران (۱۴۰۰) در تحقیقی، پهنه‌بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب با اعمال عدم قطعیت هم‌زمان چند پارامتر را بررسی کردند. برای این منظور ابتدا مقادیر قطعی پارامترها در سال‌های مختلف مدل‌سازی و سپس با استفاده از توزیع نرمال برای ضرایب هیزن-ویلیامز لوله‌ها، و مصارف گره‌ها و توزیع یکنواخت برای قطر لوله‌ها، مقادیر غیرقطعی آن‌ها را برآورد کردند. در نهایت، مقادیر غیرقطعی به مدل شبیه‌ساز شبکه اعمال شد. مدل‌سازی عدم قطعیت پارامترها با روش مونت کارلو در دو حالت ضریب تغییرات ۲۰ و ۴۰ درصد و کارایی هیدرولیکی شبکه با ارزیابی شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه انجام شد. روش پیشنهادی، بر روی شبکه توزیع آب کلیر پیاده‌سازی شد که نتایج به دست آمده نشان داد که در هر دو حالت، بالاترین سطح عملکرد شبکه با احتمال وقوع زیاد در سال‌های اولیه دوره طرح در ساعت‌های حداکثر مصرف و در سال‌های انتهایی دوره طرح در ساعت‌های متوسط مصرف اتفاق می‌افتد. هم‌چنین روند تغییرات سالانه سطوح عملکرد شبکه بیانگر این است که بهترین سرویس‌دهی شبکه با ضریب تغییرات ۱۰ درصد، در سال ۲۳ با احتمال ۵۵ درصد و با ضریب تغییرات ۲۰ درصد، در سال ۲۰ با احتمال ۴۶ درصد اتفاق می‌افتد.

Kang et al. (2009) روش مونت کارلو را برای پیش‌بینی عدم قطعیت مدل در شرایط تقاضاهای ناپایدار را بررسی کردند. هدف تحقیق، ارزیابی طرح‌های تقریبی جایگزین و بررسی توانایی آن‌ها در پیش‌بینی عدم قطعیت مدل با تلاش محاسباتی کم‌تر بود که در آن، از روش‌های تخمین نقطه‌ای، روش ممان دوم مرتبه اول و یک روش شبیه‌سازی، نمونه‌گیری به صورت مقایسه‌ای استفاده شده است. پارامترهای ورودی مدل شامل قطر و ضریب زبری لوله، تقاضای مکانی و زمانی گره‌ها و ضرایب زوال حجمی و دیواره لوله و متغیرهای خروجی مدل شامل فشار گرهی، سن آب و غلظت کلر هستند. برای بررسی تاثیر مقدار عدم قطعیت ورودی بر خروجی مدل، سه سطح عدم قطعیت ارزیابی شده و روش پیشنهادی در یک شبکه با ۱۱۶ لوله و ۹۰ گره مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مونت کارلو ابزاری مناسب برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت و قابلیت اطمینان برای سیستم‌های توزیع آب است. اگر تعداد شبیه‌سازی‌ها به اندازه کافی زیاد باشد، نتایج نیز قابل اعتمادتر خواهد بود.

از موضوعات بسیار مهم در مدل‌سازی، تطبیق نتایج حاصل از مدل‌سازی با وضعیت واقعی سیستم است. برای دستیابی به این هدف لازم است مدل توسط داده‌های میدانی کالیبره شود. کالیبراسیون در تعریف، عبارت است از تنظیم پارامترهای مدل به گونه‌ای که مقادیر مشاهده‌ای با مقادیر محاسبه‌ای تا حد امکان تطابق داشته باشند. پارامترهای مدل شبکه توزیع آب شامل مشخصه‌های فیزیکی و بهره‌برداری مدل است که عمدتاً شامل ضرایب زبری لوله‌ها و نیاز آبی گره‌ها هستند. مقادیر مشاهده‌ای یا محاسبه‌ای نیز عمدتاً شامل فشار گرهی، تراز تانک‌ها و مقدار جریان در لوله‌ها است. برای کالیبراسیون دقیق یک مدل شبیه‌ساز دقت در مکان و زمان نمونه‌برداری و عدم قطعیت داده‌ها بسیار مهم است. در این ارتباط در برخی تحقیقات تنظیم پارامترهای مدل در چهار وضعیت، مصرف میانگین، حداکثر، حداقل و شرایط جریان آتش‌نشانی بررسی شده که در آن بهترین نتایج کالیبراسیون براساس شرایط جریان آتش‌نشانی به دست آمده است (Tabesh et al., 2010; 2011).

به‌طور کلی در مسائل واقعی برای تحلیل حالات خارج از عملکرد نرمال شبکه، لازم است رفتار این شبکه‌ها در بازه‌ای از حالات ممکن در زمان بهره‌برداری مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد تا با توجه به نتایج، بتوان از سیستم به گونه‌ای بهره‌برداری کرد که ضمن برآورده کردن مطلوب نیازها، از ایجاد اثرات مخرب به‌هنگام وقوع برخی از حالات بحرانی جلوگیری کرد. در این ارتباط اعمال عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها و پارامترهای مدل شبکه در بررسی حالات ممکن بهره‌برداری موثر است. در رابطه با بررسی عدم قطعیت مدل‌ها تحقیقات زیادی انجام شده است.

سیفاللهی و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی که به روش مونت کارلو و با بررسی تاثیر توأم عدم قطعیت در نیاز گره‌ها و زبری لوله‌ها در یک شبکه آب دو حلقه‌ای انجام شد نشان دادند که چنین شبکه‌ای تنها در ۱۰ سال اول از ۳۰ سال دوره بهره‌برداری، قادر به ارائه سرویس و تامین تقاضا با فشار مورد نیاز است، در حالی که در حالت قطعی بودن متغیرهای فوق، در طول کل دوره بهره‌برداری، قادر به ارائه سرویس و تامین تقاضا بوده است. هم‌چنین با افزایش درصدی از عدم قطعیت در هر متغیر به‌طور جداگانه، کارایی شبکه با درصد بیشتری کاهش می‌یابد. دینی و تابش (۱۳۹۲) مسئله کالیبراسیون هیدرولیکی شبکه نمونه دو حلقه‌ای را در دو حالت، اعمال و بدون اعمال عدم قطعیت داده‌ها بررسی کردند. نتایج نشان داد که در کالیبراسیون یک مدل

عدم قطعیت پارامترها، به ویژه برای شبکه‌های مقیاس بزرگ یک روش مؤثر است. Geranmehr et al. (2019) تغییرات مقادیر فشارگره‌ها و سرعت جریان لوله‌ای در شبکه‌های توزیع آب بر اساس تغییرات عدم قطعیت در سه متغیر هد مخازن، مصارف گره‌ها و ضریب زبری لوله‌ها را بررسی کردند. در این پژوهش، از روش برش α فازی به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت و از نرم‌افزار اپانت و الگوریتم ژنتیک برای مدل‌سازی تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار شبکه استفاده شد. نتایج نشان داد که سرعت جریان در لوله‌ها به مقدار زیادی تحت تأثیر عدم قطعیت پارامترهای فوق است، به طوری که تجمع عدم قطعیت‌های مختلف، عملکرد شبکه را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

دینی و همکاران (۱۴۰۱) کارایی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب را با اعمال عدم قطعیت پارامترهای قطر و زبری لوله‌ها و تقاضای گره‌ها بررسی کردند. برای این منظور، سری داده‌های احتمالاتی برای هر یک از پارامترهای ذکر شده توسط شبیه‌سازی مونت کارلو تولید و از شاخص قابلیت اطمینان فشار گره‌ها شبکه برای ارزیابی کارایی شبکه استفاده شد. این روش بر روی یک شبکه نمونه و یک شبکه واقعی به کار برده شد. مقایسه نتایج در حالت قطعی و غیرقطعی نشان می‌دهد که روش غیرقطعی مزیت‌های بیشتری در پیش‌بینی نتایج نامطلوب مدل نسبت به روش قطعی دارا است.

در تمامی تحقیقات انجام شده در مطالعات قبلی، بررسی عدم قطعیت مدل‌ها با اعمال عدم قطعیت برای تعدادی از پارامترها یا داده‌های مدل و ارزیابی خروجی مدل مانند فشار، کیفیت آب در گره‌ها و سرعت جریان در لوله‌ها انجام شده است. با توجه به ماهیت مدل‌سازی به صورت یک مدل شبیه‌ساز با حالت‌های مختلف ورودی، چالشی از نظر مدت زمان اجرای مدل و تعیین پارامترهای مدل بوجود نمی‌آید. این در حالی است که اگر این موضوع برعکس شود، یعنی مقادیر خروجی مدل مانند فشار در گره‌ها و سرعت جریان در لوله‌ها دارای عدم قطعیت باشند و بر اساس آن‌ها پارامترها و ضرایب مدل شبکه تنظیم شوند، مدل‌سازی در قالب یک مدل بهینه‌سازی کالیبراسیون خواهد بود و چالش بزرگی را از نظر تعیین ضرایب غیرقطعی و زمان اجرای مدل و شبیه‌سازی مدل شبکه ایجاد خواهد کرد که در این تحقیق این موضوع به عنوان نوآوری تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور یک مدل بهینه‌سازی کالیبراسیون ایجاد شده که در آن با وارد کردن مقادیر غیرقطعی برای خروجی مدل، ضرایب غیرقطعی مدل محاسبه شده است. مدل‌سازی در محیط MATLAB و با به کارگیری الگوریتم جامعه مورچگان و تلفیق آن

(Sumer and Lansey 2009) در تحقیقی تأثیر عدم قطعیت‌های موجود را بر روی پارامترهای مدل بررسی کرده و روشی را برای ارزیابی تأثیر عدم قطعیت‌ها در مقادیر زبری لوله‌ها ارائه دادند که در آن از روش ممان دوم مرتبه اول برای تحلیل پارامترهای غیرقطعی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تخمین دقیق میانگین پارامترها و تغییرات آن نقش مهمی در افزایش دقت و کاهش هزینه‌های مدل‌سازی دارد. Branisavljevic et al. (2009) کاهش عدم قطعیت مصارف گره‌ها در مدل شبکه‌های توزیع آب را با به کارگیری داده‌های جریان ورودی بررسی کردند. در این پژوهش، دبی ورودی در حالت‌های مختلف اندازه‌گیری شد و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، عدم قطعیت مصارف گره‌ها کمینه‌سازی شدند. به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت مصارف گره‌ها از روش برش فازی و برای صحت‌سنجی مدل از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. نتایج نشان داد که با به کارگیری برخی از اطلاعات اضافی اندازه‌گیری شده، می‌توان عدم قطعیت‌ها را کاهش داد.

Pasha and Lansey (2010) تأثیر عدم قطعیت پارامترها بر کیفیت آب در یک سیستم توزیع آب تحت شرایط پایدار و ناپایدار را با استفاده از روش مونت کارلو مورد بررسی قرار دادند. منابع عدم قطعیت برای کیفیت آب شامل ضرایب زوال حجمی و دیواره، قطر و زبری لوله و تقاضای مصرف در گره‌ها بودند. نتایج نشان داد که بزرگترین عدم قطعیت‌ها زمانی ایجاد می‌شوند که الگوهای جریان تغییر کنند. هم‌چنین برای کالیبره کردن دقیق یک مدل شبیه‌ساز، توجه به مکان و زمان نمونه‌برداری و عدم قطعیت داده‌ها بسیار مهم هستند. Pérez et al. (2015) تأثیر عدم قطعیت‌های موجود در تقاضای گره‌ها را بر روی مقادیر فشارگره‌ها بررسی کردند. مدل‌سازی عدم قطعیت با استفاده از روش مونت کارلو در یک شبکه واقعی انجام شد. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل قطعی تقاضای گره‌ها نمی‌توان عدم قطعیت‌های موجود در فشار گره‌ها را توجیه کرد. در حالی که با تحلیل اثر عدم قطعیت تقاضا بر عدم قطعیت فشار، به عبارت دیگر، با تغییر مدل تقاضا و با تولید تقاضای متناسب‌تر بین گره‌ها در یک شبکه، فشارهای پیش‌بینی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر می‌شود و عدم قطعیت مقادیر فشار گره‌ها شبکه کاهش می‌یابد.

Sivakumar et al. (2016) با در نظر گرفتن زبری لوله به عنوان پارامتر دارای عدم قطعیت، دبی جریان در لوله‌ها و فشار در گره‌های شبکه را برآورد کردند. برای این منظور، روش مبتنی بر بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در هر برش α فازی استفاده شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی برای تجزیه و تحلیل

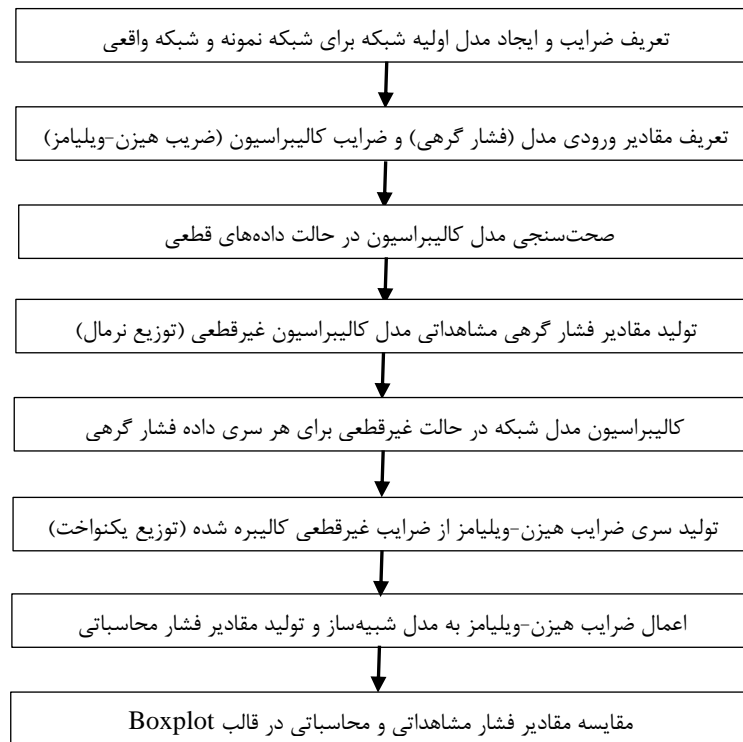
قطعی برای شبکه دو حلقه‌ای از نرم‌افزار EPANET و داده‌های میدانی مربوط به شبکه صوفیان از داده‌های اندازه‌گیری شده شرکت آب و فاضلاب شهر صوفیان، تهیه شده و با استفاده از توزیع نرمال، داده‌های غیرقطعی فشارگرهی مشاهداتی به دست آمدند. در مرحله بعدی برای هر یک از سری داده‌های فشار غیرقطعی، ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه از طریق مدل کالیبراسیون به دست آمد. برای مقایسه نتایج، براساس مقادیر ضرایب هیزن-ویلیامز غیرقطعی کالیبره شده، سری داده‌های هیزن-ویلیامز شبکه با استفاده از توزیع یکنواخت تولید و به مدل شبیه‌ساز اعمال می‌شود تا مقادیر فشار محاسباتی به دست آید. نتایج دو فشار به صورت نمودارهای Boxplot با هم‌دیگر مقایسه شده است. روند انجام تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.

با شبیه‌ساز EPANET انجام شده است. مزایای این روش با استفاده از یک شبکه نمونه و یک شبکه واقعی بررسی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- روش تحقیق

در این تحقیق، به منظور کالیبراسیون شبکه توزیع آب با در نظر گرفتن عدم قطعیت داده‌های فشارگرهی شبکه، از دو شبکه نمونه و شبکه واقعی استفاده شده است، برای این منظور، ابتدا مدل کالیبراسیون بر روی شبکه دو حلقه‌ای در حالت داده‌های قطعی صحت‌سنجی شد و سپس در حالت داده‌های غیرقطعی، برای شبکه دو حلقه‌ای و شبکه توزیع آب صوفیان مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا داده‌های فشارگرهی به صورت



شکل ۱- روندنمای تحقیق

که Q : دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)، L : طول لوله (متر)، CHW : ضریب هیزن-ویلیامز و D : قطر لوله (متر) هستند (تائبی و چمنی، ۱۳۹۳).

۲-۳- تابع هدف و بهینه سازی

تابع هدف مدل کالیبراسیون در این تحقیق به صورت رابطه (۲) است که در آن اختلاف مقادیر فشارگرهی مشاهداتی و محاسباتی غیرقطعی در هر اجرای مدل در گره‌های نمونه‌برداری

۲-۲- هیدرولیک شبکه

رابطه هیزن-ویلیامز یکی از معادلات افت فشار در شبکه‌های توزیع آب است. این فرمول برای لوله‌های صاف با قطرهای متوسط تا بزرگ خوب عمل می‌کند و با تغییر در ضریب هیزن-ویلیامز می‌تواند برای لوله‌های کهنه نیز به کار برده شود. رابطه هیزن-ویلیامز به صورت فرمول (۱) ارائه شده است.

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

2 و 1 = W استفاده شده است. هم‌چنین تعداد ذرات برابر 50 و تعداد تکرار متناسب با خطای تابع هدف متغیر است (Kennedy and Elberhat, 1995).

۲-۴- عدم قطعیت پارامترها

برای تولید عدم قطعیت مقادیر فشار گرهی شبکه از روش مونت کارلو و توزیع نرمال یا توزیع یکنواخت استفاده شده است. تابع چگالی احتمال توزیع نرمال به صورت رابطه (۵) و تابع چگالی احتمال توزیع یکنواخت به صورت رابطه (۶) هستند.

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$f_x(x) = \frac{1}{b - a} \quad a < x < b \quad (6)$$

که μ_x : میانگین متغیر x ، σ_x : انحراف معیار استاندارد متغیر x ، $f_x(x)$: تابع چگالی احتمال متغیر x و a و b : کران پایین و بالای تابع چگالی احتمال یکنواخت هستند (Seifollahi -Aghmiuni et al. 2013).

۳- مطالعه موردی

برای تشریح روش پیشنهادی از دو شبکه توزیع آب استفاده شده است. ساختار شماتیک دو شبکه در شکل ۲ نشان داده شده است. شبکه اول، شبکه نمونه دوحلقه‌ای Alperovits and Shamir (1977) است که دارای ۹ لوله، ۸ گره و یک مخزن است. شبکه دوم، شبکه توزیع آب شهر صوفیان است. این شهر در استان آذربایجان شرقی و در شهرستان شبستر واقع شده است. براساس سرشماری سال ۱۳۹۵ دارای حدود ۹۹۰۰ نفر جمعیت بوده است. سرانه مصرف در این شهر در حدود ۱۸۰ لیتر برای هر نفر در روز است. توزیع آب شهر به صورت ثقلی از تنها مخزن شهر با تراز ارتفاعی ۱۴۲۸ متر از سطح دریا و در قالب ۶۰۸ لوله و ۵۹۵ گره اتفاق می‌افتد. بلندترین نقطه شهر دارای تراز ارتفاعی ۱۴۰۷ متر در نزدیکی مخزن و پست‌ترین نقطه دارای تراز ارتفاعی ۱۳۵۵ متر است. مجموع طول لوله‌های شبکه ۵۱/۵ کیلومتر است که ۱۸/۵ کیلومتر آن آزبست سیمان با قطر حداکثر و حداقل به ترتیب ۳۰۰ و ۸۰ میلی‌متر و ۳۲/۷ کیلومتر آن پلی‌اتیلن با قطر حداکثر و حداقل به ترتیب ۱۱۰ و ۲۵ میلی‌متر و ۰/۳ کیلومتر آن آهن گالوانیزه با قطر برابر ۲۰۰ میلی‌متر است. در شبکه توزیع آب صوفیان، گره‌های نشان‌دار شده، به‌عنوان گره‌های نمونه برای تحلیل نتایج شبکه مورد استفاده قرار گرفته است.

شبکه در طول ۲۴ ساعت دوره شبیه‌سازی حداقل می‌شود.

$$F = \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T (PO_{tj} - PS_{tj})^2 \quad (2)$$

که N : تعداد گره‌های نمونه‌برداری از شبکه، T : دوره شبیه‌سازی مدل شبکه (ساعت)، PO_{tj} : فشار مشاهداتی، PS_{tj} : فشار محاسباتی در گره j در ساعت t ، و F : مقدار توابع هدف است که باید حداقل شود.

در این تحقیق از الگوریتم دسته ذرات (PSO) به دلیل سرعت بالای همگرایی آن به جواب بهینه برای بهینه‌سازی استفاده شده است. در ابتدا تعدادی مشخص از ذرات به صورت تصادفی، در فضای جستجوی مسئله پخش می‌شوند و برای هر ذره مقدار تابع هدف در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از اطلاعات محل فعلی و بهترین محلی قبلی ذرات و هم‌چنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود، موقعیت جدید ذرات تعیین می‌شود و یک تکرار از الگوریتم به پایان می‌رسد. این تکرارها تا رسیدن به جواب بهینه ادامه پیدا می‌کند.

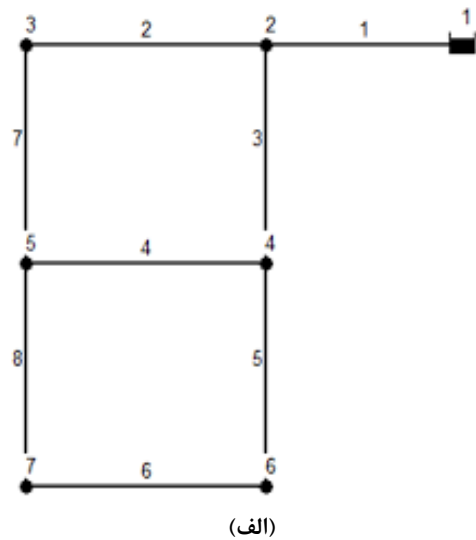
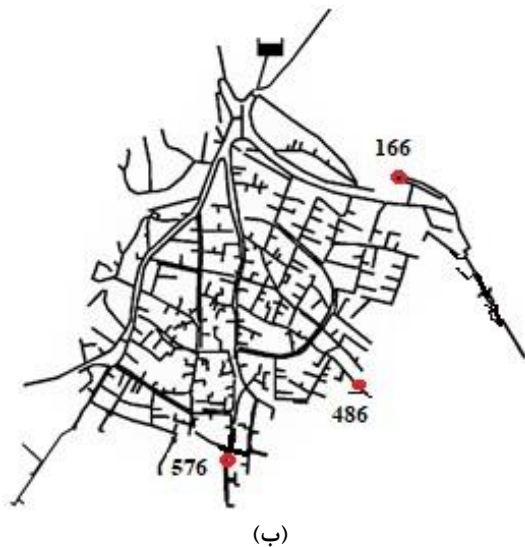
در الگوریتم PSO هر جزء، دارای S بعد است که بیانگر تعداد متغیرهای مسئله است. مقادیر متغیرهای تصمیم، موقعیت یک پاسخ را در مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌کنند. هر ذره i ، توسط سه بردار: موقعیت کنونی $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{is})$ ، بهترین موقعیت قبلی $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{is})$ و سرعت حرکت ذره $B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{is})$ تعیین می‌شوند. در هر تکرار پس از تعیین شدن بهترین جواب عمومی (G)، مکان هر کدام از ذرات گروه تغییر می‌کند که این موقعیت با رابطه (۳) تعیین می‌شود (Kennedy and Elberhat, 1995).

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \quad (3)$$

که $X_i(t)$ و $V_i(t)$: به ترتیب، مکان و سرعت جدید ذره هستند. سرعت جدید ذرات از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$V(t) = W \times V(t-1) + C_1 \times \text{rand}(B_i - X_i) + C_2 \times \text{rand}(G - X_i) \quad (4)$$

که C_1 و C_2 : به ترتیب ضرایب یادگیری شخصی و اجتماعی و W : نیز ضریب اینرسی وزنی ذرات هستند. در این تحقیق برای بهینه‌سازی از پارامترهای الگوریتم دسته ذرات با مقادیر $C_1 = C_2$



شکل ۲- ساختار شماتیک شبکه‌های مورد مطالعه: الف) شبکه دو حلقه‌ای؛ ب) شبکه توزیع آب صوفیان

۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج استفاده از روش پیشنهادی برای تنظیم ضرایب هیزن-ویلیامز بر روی دو شبکه نمونه و واقعی ارائه و بررسی می‌شود.

۴-۱- شبکه نمونه دو حلقه‌ای

در این بخش، ابتدا با فرض معلوم بودن ضرایب هیزن-ویلیامز، مقادیر قطعی فشار در گره‌های شبکه دو حلقه‌ای با استفاده از مدل شبیه‌ساز شبکه EPANET تعیین شد. برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی با عوض کردن جای مقادیر ورودی و خروجی، مقادیر فشار به‌عنوان ورودی مدل کالیبراسیون وارد مدل شده و ضرایب هیزن-ویلیامز تعیین شد. نتایج ۱۰ اجرای متوالی مدل در جدول ۱ آورده شده است. در این مرحله برای ۱۰ بار اجرای مدل کالیبراسیون، در بیش از ۷۰ درصد موارد، مدل پیشنهادی پاسخ قطعی ضرایب هیزن-ویلیامز را پیدا کرد و در بقیه موارد جواب‌های بسیار نزدیک به جواب واقعی را پیدا کرده است. به‌طور مثال در اجرای پنجم که مدل کالیبراسیون، جواب قطعی را پیدا نکرده است، مقادیر ضرایب هیزن-ویلیامز به‌دست آمده برای لوله‌ها، بسیار نزدیک به مقادیر واقعی است که با دقت‌های مهندسی می‌توان آن را معادل جواب واقعی در نظر گرفت. در مجموع مقایسه نتایج در شرایط داده‌های قطعی نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل پیشنهادی در کالیبراسیون ضرایب مدل شبکه را دارد.

در ادامه با استفاده از روش مونت کارلو به تعداد مشخص، سری داده‌های فشار برای گره‌های شبکه تولید شد. در این مرحله از

توزیع نرمال برای تولید سری داده‌های فشار استفاده شده است. هرکدام از سری داده‌های فشار به‌صورت مجزا به مدل کالیبراسیون اعمال شدند و سری پارامترهای هیزن-ویلیامز معادل آن‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات به‌دست آمدند. برای تحلیل نتایج، سری داده‌های فشار اولیه که با استفاده از توزیع نرمال و بر پایه داده‌های فشار قطعی در گره‌های شبکه تولید شده است، به‌عنوان داده‌های مشاهداتی در نظر گرفته شد. سپس با تولید سری داده‌های هیزن-ویلیامز شبکه با استفاده از توزیع یکنواخت از محدوده جواب غیرقطعی کالیبره شده و اعمال آن به شبیه‌ساز شبکه، داده‌های محاسباتی فشار گرهی به‌دست آمد و نتایج با هم مقایسه شدند. در این مرحله ۱۰۰ سری داده فشار گرهی مشاهداتی برای کالیبراسیون در نظر گرفته شد و برای تولید داده‌های محاسباتی براساس ضرایب غیرقطعی هیزن-ویلیامز به‌دست آمده از مدل کالیبراسیون، ۱۰۰۰ داده فشار گرهی محاسباتی با استفاده از مدل شبیه‌ساز شبکه تولید شد.

برای کالیبراسیون شبکه دو حلقه‌ای، ۱۰۰ سری داده‌های فشار گرهی با استفاده از توزیع نرمال تولید و به مدل کالیبراسیون اعمال و ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه تعیین شدند. در جدول ۲ ضرایب هیزن-ویلیامز لوله‌های شبکه در حالت قطعی و غیرقطعی به‌صورت میانگین، میانه ضرایب، دامنه تغییرات و انحراف معیار آن‌ها برای لوله‌های مختلف آورده شده است. همان‌طور که از نتایج جدول ۲ مشخص است، مقادیر میانگین و میانه در کالیبراسیون غیرقطعی با اختلاف کمی نزدیک مقادیر قطعی داده‌ها است، ولی با این وجود، اختلاف موجود می‌تواند در مقادیر خروجی شبکه تغییرات قابل توجهی ایجاد کند که لزوم توجه به عدم قطعیت‌ها در مدل‌سازی و تنظیم ضرایب مدل‌ها را بهتر نشان می‌دهد. در

در بین لوله‌ها، با دور شدن از مخزن شبکه، دامنه تغییرات و انحراف معیار ضرایب لوله‌ها بیشتر شده است.

بین لوله‌های شبکه نمونه دوحلقه‌ای، لوله ۲ کمترین دامنه تغییرات و انحراف معیار و لوله ۵ بیشترین دامنه تغییرات و انحراف معیار را دارد. در مجموع با چشم‌پوشی از برخی حالت‌های خاص

جدول ۱- ضرایب هیزن-ویلیامز لوله‌های شبکه دوحلقه‌ای برای ده اجرای متوالی مدل کالیبراسیون

شماره اجرا	لوله ۱	لوله ۲	لوله ۳	لوله ۴	لوله ۵	لوله ۶	لوله ۷	لوله ۸	F
جواب قطعی	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۱	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۲	۱۳۰	۷۴	۱۳۰	۱۲۹	۱۱۰	۷۶	۹۳	۷۰	۰/۶۴۳۳۶
اجرای ۳	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۴	۱۳۰	۷۱	۱۳۰	۱۳۰	۱۱۴	۹۳	۹۴	۷۰	۱/۷۳۳۴۳
اجرای ۵	۱۳۰	۸۰	۱۲۹	۷۳	۱۰۰	۷۲	۱۰۰	۷۱	۰/۰۰۰۸۰۸
اجرای ۶	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۷	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۸	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۹	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶
اجرای ۱۰	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶

جدول ۲- ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه دوحلقه‌ای در حالت قطعی و غیرقطعی

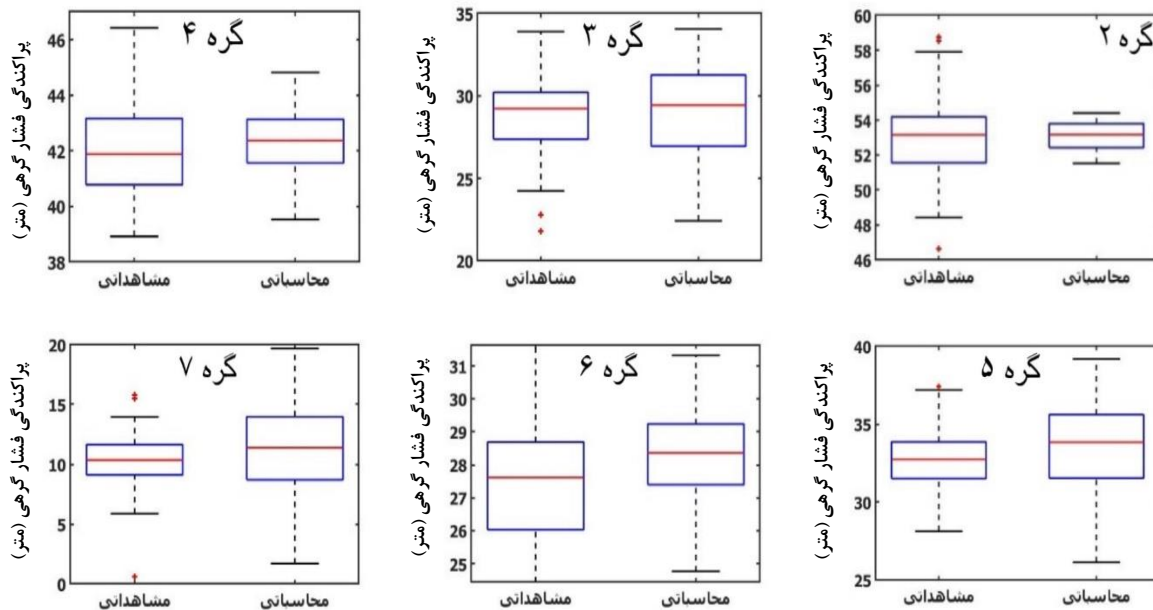
لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
مقادیر قطعی	۱۳۰	۸۰	۱۳۰	۷۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۷۰
میانگین	۱۳۳/۰۷	۸۱/۵۸	۱۳۲/۸۱	۷۲/۴۵	۱۰۷/۵۳	۷۳/۵۸	۱۰۰/۹۶	۷۳/۹۶
میانه	۱۳۴/۸۶	۸۱/۱۰	۱۳۷/۵۹	۶۷/۹۶	۱۰۲/۹۱	۷۴/۴۳	۹۵/۰۵	۷۱/۲۰
دامنه تغییرات	۲۲/۳۷	۱۷/۴۵	۲۷/۶۳	۳۲/۸۹	۴۴/۲۱	۴۱/۳۲	۴۳/۱۶	۲۱/۵۸
انحراف معیار	۱۲/۶۱	۷/۹۸	۱۷/۱۲	۲۳/۳۵	۲۵/۹۳	۲۱/۲۴	۲۳/۵۷	۱۰/۴۳

در تولید داده‌های محاسباتی از مدل شبیه‌ساز شبکه به تنهایی استفاده می‌شود و زمان اجرای مدل کوتاه است، درحالی‌که در مدل کالیبراسیون، مدل شبیه‌ساز شبکه در فرایند بهینه‌سازی صدها بار فراخوانی و اجرا می‌شود. همین مسئله باعث بالا رفتن زمان اجرای مدل‌های کالیبراسیون می‌شود. مقادیر میانه، میانگین، دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی برای این حالت در جدول ۳ آورده شده است. در شکل ۳ پراکندگی داده‌های فشار مشاهداتی و محاسباتی در گرهِهای شبکه دوحلقه‌ای به ترتیب برای گرهِهای ۲ تا ۷ نشان داده شده است.

بعد از تعیین ضرایب هیزن-ویلیامز لوله‌های شبکه مطابق جدول ۲، با تولید ۱۰۰۰ سری ضرایب هیزن-ویلیامز از مقادیر غیرقطعی با استفاده از توزیع یکنواخت و اعمال آن به مدل شبیه‌ساز شبکه، سری مقادیر فشار گرهی محاسباتی به دست آمد. مدت زمان اجرای مدل کالیبراسیون با ۱۰۰ سری داده مشاهداتی و ۵ تکرار آن برای هر حالت، برای انتخاب بهترین از بین ۵ تکرار، بسیار بالا و در حدود بیش از ۴۰ ساعت است، که یکی از دلایل آن استفاده از تعداد سری داده‌های کم برای کالیبراسیون در مقابل انتخاب ۱۰۰۰ داده برای تولید داده‌های مشاهداتی است. چرا که

جدول ۳- مقادیر میانه، میانگین، دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی مشاهداتی و محاسباتی در شبکه دوحلقه‌ای

شماره گرهِ شاخص‌ها	۲		۳		۴		۵		۶		۷	
	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی
میانگین (متر)	۵۳/۱۰	۵۳/۱۱	۲۸/۸۳	۲۹/۰۵	۴۲/۰۲	۴۲/۳۴	۳۲/۸۱	۳۳/۵۱	۲۷/۳۹	۲۸/۳۲	۱۰/۴۰	۱۱/۱۵
میانه (متر)	۵۳/۱۶	۵۳/۱۸	۲۹/۲۲	۲۹/۴۴	۴۱/۸۸	۴۲/۳۷	۳۲/۷۵	۳۳/۸۵	۲۷/۶۱	۲۸/۳۶	۱۰/۳۶	۱۱/۳۷
دامنه تغییرات (متر)	۹/۴۱	۲/۸۷	۹/۶۴	۱۱/۶۲	۷/۵۶	۵/۲۹	۸/۹۴	۱۳/۰۴	۸/۰۰	۶/۵۵	۸/۶۷	۱۹/۰۷
انحراف معیار (متر)	۲/۲۰	۰/۸۲	۱/۹۹	۲/۶۸	۱/۶۶	۱/۰۹	۱/۸۶	۲/۶۲	۲/۰۳	۱/۲۶	۱/۹۹	۳/۶۰



شکل ۳- پراکندگی فشار گرهی مشاهده‌ای و محاسباتی (متر) برای گره‌های مختلف شبکه دو حلقه‌ای

خوبی بین این شاخص‌ها با دامنه تغییرات و انحراف معیار مقادیر فشار در گره‌ها برقرار است. به طوری که بیشترین ضریب همبستگی مربوط به دامنه تغییرات با هد گرهی، متوسط ضریب هیزن-ویلیامز لوله‌ها و حاصل ضرب متوسط قطر و متوسط هیزن-ویلیامز است که در تمامی آن‌ها مقدار ضریب از ۰/۹۶- بیشتر است و نشان می‌دهد که بین دامنه تغییرات فشار با این شاخص‌ها همبستگی منفی قوی وجود دارد. این مقادیر برای انحراف معیار داده‌های فشار با شاخص‌های فوق بیش از ۰/۹۴- است که با توجه به مقادیر ضرایب همبستگی بین شاخص‌های شبکه و دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی در گره‌های شبکه، می‌توان نتیجه گرفت که نوسان مقادیر فشار گرهی در گره‌های شبکه در برابر عدم قطعیت داده‌ها، با فاصله هر گره از مخزن رابطه مستقیم (ضریب همبستگی مثبت) و با مقادیر هد گرهی، متوسط قطر و ضریب هیزن-ویلیامز و حاصل ضرب قطر و ضریب هیزن-ویلیامز، رابطه عکس (بیشترین مقادیر منفی) را دارد که براساس رابطه هیزن-ویلیامز و ارتباط بین متغیرهای دخیل در آن نیز قابل تفسیر خواهد بود. به طور کلی گره‌هایی که این خصوصیات را دارند، سبب ایجاد نوسان در شبکه شده و از حساسیت بالایی برخوردار هستند. در شبکه دو حلقه‌ای، گره ۷ با بیشترین فاصله از مخزن و کمترین مقادیر هد، قطر و ضریب هیزن-ویلیامز بیشترین نوسان فشار را در بین ۶ گره به خود اختصاص داده است. در مقابل گره ۲ با کمترین فاصله از مخزن و با بیشترین هد گرهی، قطر و ضریب هیزن-ویلیامز، کمترین نوسان فشار را دارا است.

برای بررسی بهتر نتایج، دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی در کنار شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه نمونه مورد بررسی قرار گرفته است تا تاثیر پذیری دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها از شاخص‌ها بررسی شود. شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی مورد بررسی شامل متوسط قطر دسترسی به مخزن (در صورتی که چند مسیر وجود داشته باشد، مسیر با بزرگترین متوسط قطر انتخاب می‌شود) (D_a)، کوتاه‌ترین فاصله از مخزن (L)، متوسط ضریب هیزن-ویلیامز دسترسی به مخزن در مسیر بزرگترین متوسط قطر (CHW_a)، مصرف گرهی (q)، هد گرهی (H)، انرژی در دسترس ($E = 9810QH$) و حاصل ضرب متوسط قطر در متوسط ضریب هیزن-ویلیامز ($D_a \times CHW_a$) است. در جدول ۴ ضریب همبستگی بین دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها با شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه دو حلقه‌ای آورده شده است. همان‌طور که از نتایج جدول ۴ مشخص است، با توجه به این که مقادیر داده‌های مشاهده‌ای به صورت احتمالاتی براساس توزیع نرمال و در اطراف میانگین مقادیر فشار در هر گره تولید شده است، لذا همبستگی خاصی بین شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه با آن‌ها وجود ندارد یا در صورت وجود کمتر از ۰/۵ و ضعیف است. این در حالی است که برای داده‌های محاسباتی، با توجه به این که هر یک از مقادیر فشار محاسباتی براساس باز تولید سری ضرایب هیزن-ویلیامز از ضرایب غیر قطعی به روش توزیع یکنواخت به دست می‌آیند و به طور کامل تحت تاثیر شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه هستند، همبستگی

جدول ۴- ضریب همبستگی بین دامنه تغییرات و انحراف معیار با شاخص‌ها

$D_a \times CHW_a$	E	H	Q	CHW_a	L	D_a	فشار گرهی
-۰/۰۸	-۰/۴۲	-۰/۰۵	-۰/۳۹	-۰/۳۶	-۰/۲۹	۰/۳۴	مشاهداتی
-۰/۰۹۶	۰/۱۵	-۰/۰۹۸	۰/۲۶	-۰/۰۹۷	۰/۸۲	-۰/۸۳	محاسباتی
۰/۱۶	-۰/۰۶	-۰/۱۲	-۰/۰۷	-۰/۰۲	-۰/۲۱	-۰/۳۶	مشاهداتی
-۰/۰۹۴	۰/۰۵	-۰/۰۹۴	۰/۱۵	-۰/۰۹۸	۰/۷۲	-۰/۷۴	محاسباتی

۲-۴- شبکه توزیع آب صوفیان

در این بخش، کالیبراسیون شبکه توزیع آب صوفیان مورد بررسی قرار می‌گیرد. مراحل کار مشابه شبکه دوحلقه‌ای است که در آن، کالیبراسیون شبکه برای مدل استاتیک شبکه در حالت متوسط مصرف از شبکه با ضریب الگوی مصرف برابر یک انجام می‌شود. علت استفاده از مدل استاتیک به جای مدل دینامیک زمان بسیار بالای اجرای مدل در حالت دینامیک است که با توجه به تعداد ۱۰۰ سری داده فشار مشاهداتی و ۵ تکرار مدل کالیبراسیون برای هر سری داده فشار مشاهداتی برای انتخاب بهترین حالت از بین ۵ تکرار، مدل کالیبراسیون ۵۰۰ بار اجرا می‌شود و این کار زمانبر خواهد بود. برای کالیبراسیون شبکه صوفیان ابتدا ۱۰۰ سری داده فشار مشاهداتی از گره‌های شبکه انتخاب و با ۵ اجرای متوالی مدل کالیبراسیون، ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه تعیین شد. با توجه تعداد زیاد لوله‌ها در شبکه توزیع آب صوفیان (۶۰۸ لوله)، تعیین ضرایب برای همه لوله‌ها به صورت غیرقطعی، امکان همگرایی مدل به جواب بهینه را پیچیده می‌کرد. از این رو، براساس سرعت جریان در لوله‌ها، لوله‌های با حساسیت کم بالا از سایر لوله‌ها جدا شدند، ضرایب لوله‌های با حساسیت کم به صورت ثابت و حالت قطعی نگه‌داشته شده و ضرایب لوله‌های با حساسیت بالا به صورت غیرقطعی تنظیم شد. از مجموع ۶۰۸ لوله موجود در شبکه توزیع آب صوفیان حدود ۴۵ لوله دارای سرعت جریان بیش از ۰/۳ متر بر ثانیه است که تنظیم ضرایب به صورت

غیرقطعی برای آن‌ها انجام شده ولی ضرایب برای ۱۰ لوله با حساسیت خیلی بالا ارائه شده است.

در جدول ۵ مقادیر میانگین، میانه و دامنه تغییرات و انحراف معیار ضرایب هیزن-ویلیامز برای لوله‌های انتخابی شبکه توزیع آب صوفیان ارائه شده است. براساس نتایج جدول ۵، دامنه تغییرات و انحراف معیار ضرایب هیزن-ویلیامز لوله‌های انتخابی شبکه توزیع آب صوفیان بسیار بالا است، به طوری که برای لوله ۱۸۴ با میانگین ضریب هیزن-ویلیامز ۱۳۹/۱۰ دامنه تغییرات ضریب برابر ۵۰/۵۹ است. این مقدار نشان می‌دهد محدوده تغییرات ضریب هیزن-ویلیامز می‌تواند بسیار بزرگ باشد، به خصوص وقتی شبکه بزرگ و تعداد ضرایب قابل تنظیم زیاد بوده و مقادیر فشار گرهی نیز دارای عدم قطعیت باشند، بی‌نهایت ترکیب بین ضرایب لوله‌ها وجود خواهد داشت که بتوانند با آن ترکیب، مقادیر نزدیک به فشار گره‌های شبکه در حالت غیرقطعی را تولید کنند. این امر با بالا یا پایین شدن ضرایب لوله‌ها اتفاق خواهد افتاد. به طور مثال اگر دو لوله متوالی با طول یکسان دارای ضریب هیزن-ویلیامز به ترتیب برابر ۱۳۵ و ۱۲۵ باشند که متوسط ضریب هیزن-ویلیامز آن‌ها برابر ۱۳۰ است، در حالت تنظیم ضرایب با مقادیر ضرایب ۱۴۵ و ۱۱۵ و میانگین ضریب برابر ۱۳۰ نیز تقریباً مشابه همان رفتار را خواهد داشت. این مورد، زمانی که تعداد لوله‌ها و تعداد ترکیب‌ها زیاد می‌شود، دامنه تغییرات ضرایب و انحراف معیار آن‌ها را بزرگتر می‌کند.

جدول ۵- ضرایب هیزن-ویلیامز لوله‌های منتخب شبکه صوفیان

شماره لوله	مقادیر قطعی	میانگین	میانه	دامنه تغییرات	انحراف معیار
۲۰۶	۱۴۲/۴	۱۴۲/۵۹	۱۴۱/۹۰	۵۰/۱۰	۱۶/۲۸
۲۰۴	۱۴۰/۴	۱۴۵/۲۳	۱۴۴/۰۵	۵۰/۱۵	۱۲/۵۷
۲۰۰	۱۳۱/۸	۱۳۵/۵۵	۱۳۸/۳۰	۴۴/۱۰	۱۴/۹۵
۱۹۹	۱۴۳/۶	۱۳۷/۱۳	۱۳۴/۲۶	۴۹/۴	۱۶/۳۰
۱۹۶	۱۴۲/۵	۱۳۰/۳۹	۱۲۴/۲۷	۴۹/۸	۲۱/۳۸
۱۸۶	۱۳۹/۳	۱۴۸/۰۵	۱۵۹/۲۸	۴۹/۴۳	۱۶/۷۱
۱۸۴	۱۴۱/۵	۱۳۹/۱۰	۱۴۲/۲۵	۵۰/۵۹	۱۷/۶۹
۱۸۲	۱۳۳/۸	۱۴۶/۰۶	۱۵۱/۴۰	۴۸/۸۲	۱۵/۳۹
۱۶۷	۱۳۸/۷	۱۳۸/۹۲	۱۴۲/۵۰	۳۴/۱۱	۱۹/۴۱
۲۰۱	۱۳۸/۲	۱۳۹/۷۵	۱۴۴/۲۷	۳۹/۴۱	۱۸/۲۸

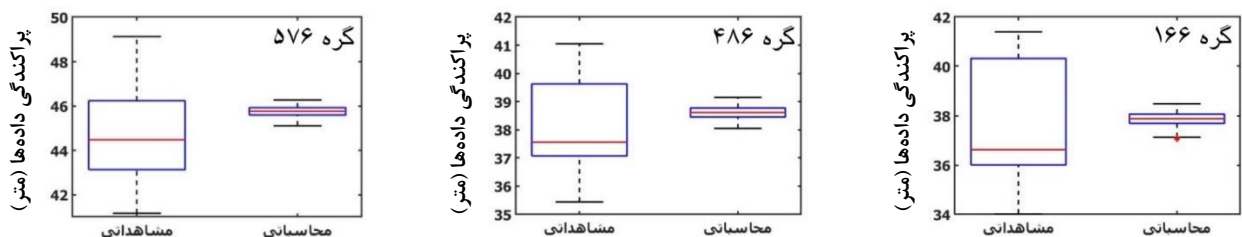
نکته دیگری که در جدول ۶ و شکل ۴ به وضوح قابل مشاهده است، مربوط به دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و محاسباتی در گره‌های منتخب است که در داده‌های مشاهداتی همواره بزرگتر از داده‌های محاسباتی است. دلیل این موضوع مربوط به این است که داده‌های مشاهداتی با استفاده از توزیع نرمال و براساس مقادیر فشار گرهی در مدل استاتیک شبکه برای ۱۰۰ سری داده‌های مشاهداتی ساخته شده است که در آن توزیع نرمال بدون دخالت شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه، مقادیر فشار گرهی را تولید کرده است. به همین دلیل دامنه تغییرات و انحراف معیار آن‌ها بزرگتر شده است. این در حالی است که در داده‌های محاسباتی مقادیر فشار گرهی براساس ضرایب هیزن-ویلیامز تنظیم شده در شبکه به دست آمده‌اند و در فرایند محاسبات تحت‌تاثیر محدودیت‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه بوده‌اند. لذا ناشی از این محدودیت‌ها، نوسان کوچکتری دارند و دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی در آن پایین است

برای مقایسه بهتر نتایج، مقادیر مشاهداتی و محاسباتی فشار گرهی در سه گره انتخابی شبکه به همراه فاصله از مخزن و هد گرهی آن‌ها در جدول ۶ آورده شده است. در شکل ۴ نیز Boxplot مربوط به مقادیر فشار مشاهداتی و محاسباتی گره‌های انتخابی نشان داده شده است.

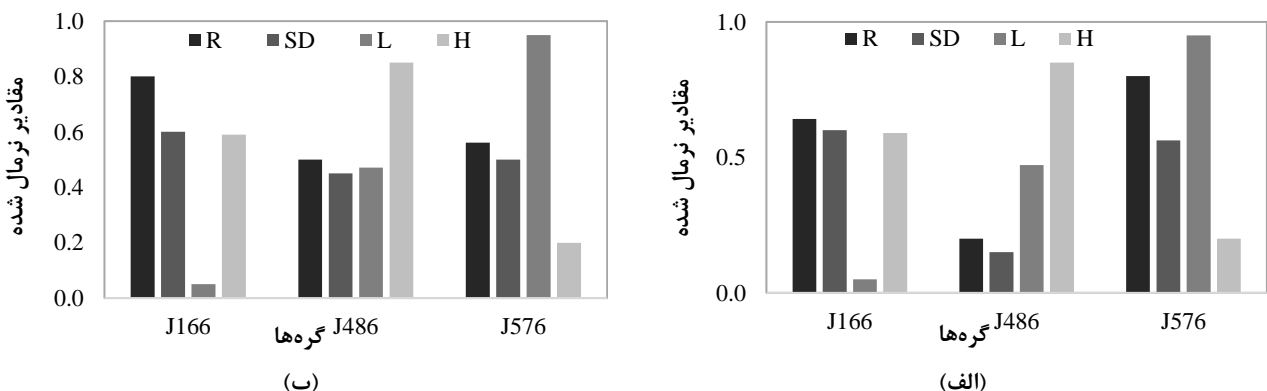
همچنین در شکل ۵-الف برای داده‌های فشار محاسباتی و در شکل ۵-ب برای داده‌های فشار مشاهداتی، هیستوگرام دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها در کنار فاصله از مخزن و هد گرهی آورده شده است. به‌طورکلی در شبکه توزیع آب شهر صوفیان نیز بین دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی با فاصله از مخزن همبستگی مثبت و بین دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی با هد گرهی همبستگی منفی وجود دارد، به‌طوری‌که در گره ۵۷۶، با بیشترین طول و کمترین هد، دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها زیاد و در گره ۴۸۶ با طول متوسط و بیشترین هد، دامنه تغییرات و انحراف معیار داده‌ها کم است.

جدول ۶- مقادیر میانه، میانگین، دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی در گره‌های انتخابی شبکه صوفیان

گره		۱۶۶		۴۸۶		۵۷۶	
فشار گرهی		محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی
میانگین (متر)		۳۷/۸۸	۳۷/۸۵	۳۸/۶۲	۳۸/۰۰	۴۵/۷۶	۴۴/۹۰
میانه (متر)		۳۷/۸۸	۳۶/۶۲	۳۸/۶۱	۳۷/۵۶	۴۵/۷۶	۴۴/۴۷
دامنه تغییرات (متر)		۱/۴۴	۷/۴۶	۱/۱۰	۵/۶۲	۱/۱۷	۸/۱۲
انحراف معیار (متر)		۰/۲۳	۲/۴۰	۰/۲۰	۱/۶۸	۰/۲۱	۲/۴۳
فاصله (متر)		۷۵۸		۱۳۹۴		۱۹۷۲	
H (متر)		۱۴۲۳/۱		۱۴۲۴/۱		۱۴۲۱/۶	



شکل ۴- پراکندگی داده‌های محاسباتی و مشاهداتی برای گره‌های انتخابی شبکه توزیع آب صوفیان



شکل ۵- نوسان دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی در مقابل فاصله از مخزن و هد گرهی: (الف) داده‌های مشاهداتی؛ (ب) داده‌های محاسباتی

۵- نتیجه گیری

تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن انواع متغیرهای تنظیم و شرایط مصرف، نشریه هیدرولیک، ۴(۳)، ۶۹-۷۸.

دینی، م.، و تابش، م.، (۱۳۹۲)، "کالیبراسیون هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن عدم قطعیت داده‌ها"، *دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران*، ۷ آبان، کرج، ایران.

دینی، م.، و تابش، م.، (۱۳۹۵)، "مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری با در نظر گرفتن تاثیر جنس، قطر و سن لوله‌ها در تنظیم ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه"، *نهمین کنگره ملی مهندسی عمران*، ۲۱ و ۲۲ اردیبهشت، مشهد، ایران.

دینی، م.، محمدی کلیبر، ا.، نورانی، و.، و هاشمی، س.، (۱۴۰۰)، "پهنه‌بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب با اعمال عدم قطعیت پارامترهای کلیدی"، *نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تبریز*، ۵۳(۲)، ۵۰-۶۰.

<https://doi.org/10.22034/JCEE.2021.44669.2007>.
Branisavljevic, N., Prodanovic, D., and Ivetic, M., (2009), "Uncertainty reduction in water distribution network modelling using system inflow data", *Urban Water Journal*, 6(1), 69-79, <https://doi.org/10.1080/15730620802600916>.

Dini, M., Mohammadikaleibar, A., Hashemi, S., and Nourani, V., (2022), "Stochastic long-term reliability of water distribution networks using Monte Carlo simulation", *Urban Water Journal*, 19(2), 151-160, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1971264>.

Geranmehr M., Asghari K., and Chamani M.R., (2019), "Uncertainty analysis of water distribution networks using type-2 fuzzy sets and parallel genetic algorithm", *Urban Water Journal*, 16(3), 193-204, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1648527>.

Kang, D.S., Pasha, M.F.K., and Lansey, K., (2009), "Approximate methods for uncertainty analysis of water distribution systems", *Urban Water Journal*, 6(3), 233-249, <https://doi.org/10.1080/15730620802566844>.

Kennedy, J., and Elberhart, R., (1995), "Particle swarm optimization", *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948.

Pasha, M.F.K., and Lansey, K., (2010), "Effect of parameter uncertainty on water quality predictions in distribution systems-case study", *Journal of Hydroinformatics*, 12(1), 1-21, <https://doi.org/10.1080/15730620802566844>.

Tabesh, M., Jamasb, B., and Moieni, R., (2011), "Calibration of water distribution hydraulic models: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses", *Urban Water Journal*, 8(2), 93-102, <https://doi.org/10.2166/hydro.2010.053>.

Sumer, D., and Lansey, K., (2009), "Effect of uncertainty on water distribution system model design decisions", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(1), 38-47, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-)

در این تحقیق، کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن عدم قطعیت متغیر فشار در گره‌های شبکه بررسی شد. روش پیشنهادی، بر روی شبکه نمونه دو حلقه‌ای و شبکه توزیع آب صوفیان پیاده شد. برای صحت‌سنجی روش پیشنهادی، در شبکه دو حلقه‌ای، ابتدا با فرض معلوم بودن ضرایب هیزن-ویلیامز، مقادیر قطعی فشار گرهی تعیین شد. سپس با تعریف مقادیر فشار به عنوان ورودی مدل کالیبراسیون، ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه تنظیم شد. مقایسه مقادیر قطعی و به دست آمده از مدل کالیبراسیون نشان‌دهنده صحت عملکرد مدل کالیبراسیون شبکه بود. در ادامه کالیبراسیون هر دو شبکه در حالت غیرقطعی بررسی شد. برای این منظور با استفاده از داده‌های غیرقطعی فشار گرهی که به روش مونت کارلو و توزیع یکنواخت و نرمال تولید شده بود، ضرایب غیرقطعی هیزن-ویلیامز شبکه با استفاده از مدل کالیبراسیون محاسبه شد. در ادامه با ضرایب غیرقطعی هیزن-ویلیامز شبکه و با استفاده از مدل شبیه‌ساز شبکه، مقادیر غیرقطعی فشار گرهی محاسبه شد.

برای بررسی عملکرد مدل کالیبراسیون، داده‌های فشار مشاهداتی (اولیه) با داده‌های فشار محاسباتی به صورت غیرقطعی مقایسه شد که نشان دهنده هم‌خوانی مناسب بین آن‌ها در هر دو شبکه بوده و عملکرد مناسب مدل کالیبراسیون شبکه در حالت غیرقطعی را تایید می‌کند. هم‌چنین برای بررسی بیشتر تغییرات فشار گرهی در حالت غیرقطعی، روند تغییرات این مقادیر با شاخص‌های هندسی و هیدرولیکی شبکه بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد بین دامنه تغییرات و انحراف معیار فشار گرهی با فاصله از مخزن همبستگی قوی مثبت و با هد گرهی همبستگی قوی منفی وجود دارد. به عبارت دیگر با افزایش فاصله از مخزن و کاهش هد گرهی، نوسانات فشار گرهی تشدید می‌شود.

۶- پی‌نوشت‌ها

1- Particle Swarm Optimization (PSO)

۷- مراجع

تائی، ا.، و چمنی، م.ر.، (۱۳۹۷)، *شبکه‌های توزیع آب شهری*، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۶۰۴ ص.

تابش، م.، جاماسب، م.، و معینی، ر.، (۱۳۸۸)، "کالیبره‌سازی مدل

[9496\(2009\)135:1\(38\).](https://doi.org/10.1007/s11269-015-1165-x)

- Sivakumar, P., Prasad, R.K., and Chandramouli, S., (2016), "Uncertainty analysis of looped water distribution networks using linked EPANET-GA method", *Water Resources Management*, 30(1), 331-358, <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1165-x>.
- Seifollahi-Aghmiuni, S., Haddad, O.B., and Mariño, M.A., (2015), "Water distribution network risk analysis under simultaneous consumption and roughness uncertainties", *Water Resources Management*, 27(7), 2595-2610, <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0305-4>.
- Pérez, R., Sanz, G., Cugueró, M.Á., Blesa, J., and Cugueró, J., (2015), "Parameter uncertainty modelling in water distribution network models", *Procedia Engineering*, 119, 583-592, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.911>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.