

Optimal Design of Pressure Sampling in Water Distribution Networks for Calibration of Hydraulic Models


Massoud Tabesh^{1*}, Vahid Abbasi Moghaddam², Akbar Shirzad³

1- Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, PO. Box: 11155-4563, Tehran, Iran.

2- M.Sc., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, PO. Box: 11155-4563, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Urmia University of Technology, PO. Box: 57155-419, Urmia, Iran.

* mtabesh@ut.ac.ir

Received: 14 November 2020, Accepted: 7 February 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Water distribution networks are complex infrastructures that play a fundamental role in optimal use of limited water resources. Their importance as the main factor in the distribution of drinking water with proper quality, quantity and pressure is undeniable. Simulating and understanding of abnormal conditions is one of the most important applications of hydraulic models of water distribution networks. Hence, existence of calibrated models is essential to network behavior realization. This process requires field data collection to improve model's performance by comparing predicted and actual data. Sampling from network has different constraints. Therefore the sampling design process is performed in order to optimize it, which includes different aspects of sampling, such as location, number and frequency. Indeed, determining the optimal sampling design is often done by performing two-objective optimization or in other words by evaluating the conflict of the accuracy of the calibrated model and the cost of sampling design. This paper focuses on pressure sampling nodes for hydraulic model calibration. To implement sampling design, first by sensitivity analysis, uncertainty of each nodal pressure is divided between model inputs.

Methodology: In this paper, a global sensitivity analysis method, Sobol, is used which divides the variance of model into model inputs and their interactions. Then, two criteria for selecting sampling points are defined. The first criterion maximizes the entropy and magnitude of sensitivity values of each parameter for the set of sampling design points. The second criterion, by replacing number of points with sampling costs, follows minimization of sampling costs. The proposed approach is applied and evaluated on one of the well-known water distribution networks in different scenarios to determine optimal sampling points for pressure. These scenarios include parameters (pipe roughness coefficient, pipe diameter and nodal demand) and their common combinations in calibration of hydraulic models of water distribution networks. The hydraulic model calibrated in this study is built based on the pressure driven simulation method. To solve the integer multi-objective optimization problem, the multi-objective integer genetic algorithm called MI-NSGA-II is employed.

Results and discussion: Investigating different scenarios demonstrates effect of parameter type on the position of selected points. In the case of sampling design based on the coefficient of roughness of pipes (scenario 1) in a period of time with low water demand due to reduced

water velocity in pipes, generally the effect of pipe roughness coefficient on the hydraulic condition of the water distribution network is reduced. In the case of sampling design based on nodal demand (scenario 2) similar to the scenario 1, the points near the tank with a fixed head are among the worst sampling points. Similarity percentage of the results of the first objective function are reduced from scenarios including pipe roughness to scenarios involving nodal demand. The maximum similarity is observed in the scenario 4 (sampling design based on pipe roughness coefficient and pipe diameter in joint form) and the minimum similarity is observed in scenario 2 (sampling design based on nodal demand) and scenario 6 (sampling design based on nodal demand and pipe diameter in joint form). At the same time it should be noted that in all cases and for a specified number of points, most of the selected points are the same and the differences with the optimal state is often observed due to discrepancies in one or two points. High similarity of results which obtained in scenarios including pipe roughness and pipe diameter, is largely due to the similarity of the classification of this two parameters. This indicates effective role of roughness in selecting points in combinatorial scenarios. Also, analysis of combinatorial scenarios suggests that parameter interactions are effective in selecting points.

Conclusion: The results showed that the developed approach offers good performance in selecting sampling points with different scenarios. The MI-NSGA-II algorithm has a good ability to find the solutions of the integer multi-objective optimization problem. The use of pressure driven simulation method is effective on the results of sensitivity analysis and sampling design. It is recommended that when different parameters are used jointly for sampling design or calibration, after evaluating the influence of parameters in their change interval on model results using sensitivity analysis, the complexity of the sampling design and calibration problem can be reduced by eliminating ineffective parameters.

Keywords: Water Distribution Network, Hydraulic Model, Pressure Driven Simulation Method, Calibration, Sampling Design, Sensitivity Analysis.

© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

طراحی بهینه نمونه برداری فشار در شبکه‌های توزیع آب برای واسنجی مدل‌های هیدرولیکی

مسعود تابش^{۱*}، وحید عباسی مقدم^۲، اکبر شیرزاد^۳

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

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

* mtabesh@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: یکی از مهم‌ترین کاربردهای مدل‌های هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب، شبیه‌سازی و درک شرایط غیرنرمال شبکه است. لذا وجود مدل‌های واسنجی شده برای ایجاد درک واقعی از رفتار شبکه ضروری است. انجام این فرایند نیازمند گردآوری داده‌های میدانی از شبکه است تا با مقایسه رفتار پیش‌بینی شده به وسیله مدل با داده‌های واقعی، عملکرد مدل اصلاح شود. نمونه برداری از شبکه محدودیت‌های مختلفی دارد. بنابراین فرآیند طراحی نمونه برداری، جنبه‌های مختلف نمونه برداری مانند مکان، شمار و تناوب را به صورت بهینه تعیین می‌کند. در این مقاله به منظور طراحی نمونه برداری، تمرکز روی مکان‌های اندازه‌گیری فشار به منظور واسنجی مدل هیدرولیکی است. برای اجرای طراحی نمونه برداری، در آغاز با انجام تحلیل حساسیت، عدم قطعیت در فشار هر گره میان فراسنجه‌های ورودی مدل تقسیم می‌شود. در این مقاله از روش تحلیل حساسیت عمومی سوپول و الگوریتم ژنتیک چندهدفه عدد صحیح با عنوان الگوریتم MI-NSGA-II با دو معیار هزینه‌های نمونه برداری کمینه و آنتروپی بیشینه برای انتخاب نقطه‌های نمونه برداری بهینه استفاده شده است. بررسی پیش‌فرض‌های مختلف، بیانگر تأثیر نوع فراسنجه بر موقعیت نقطه‌های منتخب است. در این میان میزان همانندی نتایج پیش‌فرض‌های ترکیبی با پیش‌فرض‌های جدا از حالت‌های شامل زبری، به حالت‌های شامل تقاضا کاهش پیدا می‌کند که بیانگر نقش مؤثرتر زبری در انتخاب نقطه‌ها در پیش‌فرض‌های ترکیبی است. همچنین بررسی حالت‌های ترکیبی فراسنجه‌ها نشان داد که اندرکنش‌های میان فراسنجه‌ها در انتخاب نقطه‌ها مؤثر است.

کلید واژگان: شبکه توزیع آب، مدل هیدرولیکی، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار، واسنجی، طراحی نمونه برداری، تحلیل حساسیت

۱- مقدمه

نمونه برداری استفاده می‌شود. طراحی نمونه برداری که شامل نوع اندازه‌گیری، شمار، مکان، تناوب و شرایط موجود در زمان نمونه برداری است، بر میزان عدم قطعیت‌ها در میزان فراسنجه‌های واسنجی شده تأثیرگذار می‌باشد (Bush and Uber, 1998). لذا روش اتخاذ شده در طراحی نمونه برداری، یک عامل بحرانی و مهم برای انجام موفق واسنجی شبکه‌های توزیع است (Shao et al., 2019). بر این مبنا روش‌های متعددی برای طراحی نمونه برداری ارائه شده است (Bush and Uber, 1998). تعیین طراحی نمونه برداری بهینه اغلب با انجام بهینه‌سازی دوهدفه و یا به عبارتی با ارزیابی تقابل دقت مدل واسنجی شده و

شبکه‌های توزیع آب زیرساخت پیچیده‌ای هستند که در استفاده بهینه از منابع محدود آب نقش بنیادین داشته و اهمیت آن‌ها به عنوان عامل اصلی توزیع آب آشامیدنی با کیفیت، کمیت و فشار مناسب انکارناپذیر است. برای شبیه‌سازی و درک رفتار شبکه نیاز به استفاده از مدل‌های واسنجی شده هیدرولیکی است. برای واسنجی مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب از داده‌های میدانی حاصل از نمونه برداری استفاده می‌شود. با توجه به وجود عامل‌هایی مانند هزینه و زمان که منجر به ایجاد محدودیت برای نمونه برداری می‌شود، از طراحی نمونه برداری^۱ برای بهینه‌سازی

¹ Sampling Design

2000) با ارائه دو روش بر مبنای الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر و روشی بر مبنای آن‌تروپی به‌منظور بهینه‌یابی نقطه‌های اندازه‌گیری، دو تابع هدف بر مبنای میزان‌های ماتریس حساسیت را محاسبه و ترکیب کرده و نقطه‌های بهینه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) به‌دست آوردند. Kapelan et al. (2003) برای طراحی نمونه‌برداری از الگوریتم ژنتیک دودسته استفاده نموده و نشان دادند استفاده از روش‌های بهینه‌یابی بر روش‌های رتبه‌دهی برتری دارد. Soroush and Abedini (2019) برای اولین بار از یک ابزار زمین‌آمار با عنوان Block Ordinary Kriging (BOK) برای طراحی شبکه حسگرها استفاده کرده و نتایجی همانند با نتایج روش‌های پیشین به‌دست آوردند. Shao et al. (2019) از یک روش رتبه‌دهی با عنوان الگوریتم بهینه‌سازی حریصانه (Greedy) برای طراحی نمونه‌برداری استفاده کردند که در هر مرحله از آن نقطه‌ای با بیشترین عدم قطعیت و حساسیت نسبت به دیگر نقطه‌های انتخاب می‌شود.

در بیشتر بررسی‌های پیشین در زمینه واسنجی هیدرولیکی، تنها فراسنجه زبری بررسی شده است. همچنین از تحلیل مبتنی بر تقاضا (DDA) به‌منظور تحلیل هیدرولیکی و از روش‌های تحلیل حساسیت محلی برای انتخاب نقطه‌های نمونه‌برداری استفاده شده است. با توجه به این‌که استفاده از تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار^۲ (PDA) تصویر دقیق‌تری از وضعیت شبکه به‌ویژه در شرایط غیرنرمال ارائه می‌کند، لذا استفاده از این نوع تحلیل هیدرولیکی می‌تواند بر نتایج طراحی نمونه‌برداری تأثیرگذار باشد. بر این مبنای در ادامه بررسی‌های پیشین، در این پژوهش از تحلیل PDA استفاده شده است. همچنین به‌منظور تشکیل ماتریس حساسیت، یک روش تحلیل حساسیت عمومی به‌کار گرفته شده و با تعریف معیاری مبتنی بر آن‌تروپی و میانگین میزان‌های حساسیت، طراحی نمونه‌برداری هیدرولیکی با در نظر گرفتن فراسنجه‌های ضریب زبری، قطر لوله‌ها و تقاضاهای گرهی صورت گرفته است.

هزینه طراحی نمونه‌برداری انجام می‌شود (Behzadian et al., 2008).

در طراحی نمونه‌برداری برای انتخاب نقطه‌های نمونه‌گیری در آغاز لازم است با انجام تحلیل حساسیت، میزان حساسیت کمیت‌های هیدرولیکی و کیفی مانند فشار یا غلظت هر گره نسبت به تغییرپذیری فراسنجه‌های مدل تعیین شود. در واقع تحلیل حساسیت، فرآیندی است که به بررسی تغییرپذیری‌ها در خروجی‌های یک مدل ناشی از تغییر در عامل‌های ورودی آن می‌پردازد. در یک دسته‌بندی کلی روش‌های تحلیل حساسیت به دو دسته محلی و عمومی تقسیم می‌شوند. تحلیل حساسیت محلی، تغییرپذیری خروجی را به‌ازای تغییرپذیری یک ورودی حول یک میزان مشخص در نظر می‌گیرد. به‌عنوان مثال اگر ورودی، یک متغیر تصادفی فرض شود، این میزان مشخص می‌تواند برابر میانگین آن باشد (Iooss and Lemaître, 2015). روش‌های عمومی تغییرپذیری‌ها در کل فضای ورودی‌ها را در نظر می‌گیرند. Saltelli et al. (2019) هر رویکردی را که منجر به تغییرپذیری‌های همزمان ورودی‌ها شود جزو روش‌های عمومی در نظر گرفتند. Kapelan et al. (2003) چهار روش تحلیل حساسیت محلی به‌منظور کاربرد در مدل‌های شبکه توزیع آب را برشمرد. اگرچه تاکنون روش‌های محلی به لحاظ آسانگری استفاده، کاربرد زیادی در زمینه شبکه‌های آب داشته‌اند، ولی محققان، عمده این روش‌ها را برای تحلیل حساسیت مدل‌های غیرخطی نامناسب می‌دانند. روش‌های تحلیل حساسیت عمومی کاربرد زیادی در زمینه شبکه‌های توزیع آب نداشته‌اند. Tang et al. (2006) به ارزیابی چهار روش تحلیل حساسیت PEST^۱، ANOVA^۲ و Sobol^۳ روی یک مدل هیدرولوژیکی پرداخته و نتیجه گرفتند که اگرچه روش Sobol هزینه محاسباتی بیشتری دارد، ولی استحکام^۴، سادگی تفسیر و نتایج دقیق، آن را از سه روش دیگر متمایز می‌کند. Bush and Uber (1998) با استفاده از سه روش مبتنی بر تحلیل حساسیت محلی برای طراحی نمونه‌برداری نشان دادند اندازه‌گیری‌های فشار در نقطه‌های بیرونی و دور از منابع و تانک‌های آب ارزش بیشتری دارند. (De Schaezen et al.)

⁵ Robust

⁶ Demand Driven Analysis

⁷ Pressure Driven Analysis

¹ Parameter Estimation Software

² Regional Sensitivity Analysis

³ Analysis Of Variance

⁴ Sobol's Method

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تحلیل حساسیت به روش سوپول

به منظور انتخاب نقطه‌های نمونه‌گیری در آغاز لازم است میزان حساسیت فشار، غلظت یا ... هر گره نسبت به تغییرپذیری‌های فراسنجه‌های مدل تعیین شود. لذا با اجرای تحلیل حساسیت یک ماتریس حساسیت به دست می‌آید. در روش سوپول واریانس پاسخ‌های مدل به اجزای ناشی از فراسنجه‌ها و اثرهای متقابل آن‌ها تجزیه می‌شود. اگر مدل به صورت رابطه (۱) بیان شود، تجزیه واریانس به روش سوپول به صورت رابطه (۲) خواهد بود:

$$h = g(y) \quad (1)$$

$$V(h) = \sum_i V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + V_{12...m} \quad (2)$$

که h : خروجی مدل، y : بردار ورودی‌ها، V_i : بخشی از واریانس مدل ناشی از i امین جزء بردار ورودی‌ها، V_{ij} : بخشی از واریانس مدل ناشی از اثرهای متقابل فراسنجه‌های x_i و x_j و m : بیانگر شمار کل فراسنجه‌های ورودی است. اجزای رابطه (۲) به صورت روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$V_i = V(E(h|y_i)) \quad (3)$$

$$V_{ij} = V(E(h|y_i, y_j)) - V_i - V_j \quad (4)$$

که E : امید ریاضی است. با محاسبه میزان‌های بالا نمایه‌های حساسیت سوپول برابر رابطه‌های زیر به دست می‌آید. از رابطه (۵) نمایه‌های مرتبه اول^۱ یا اثرهای اصلی^۲ به دست می‌آیند که بیانگر تأثیر مستقیم هر فراسنجه به صورت مستقل هستند. از رابطه (۶) نیز نمایه‌های مرتبه کل^۳ یا اثرهای کل^۴ حاصل می‌شوند که به وسیله Homma and Saltelli (1996) معرفی شدند و بیانگر اثر کلی هر فراسنجه، شامل اثر مستقیم و اثرهای متقابل آن با دیگر فراسنجه‌ها هستند.

$$S_i = V_i / V(h) \quad (5)$$

$$S_T = 1 - \left(\frac{V(E(h|y_i))}{V(h)} \right) \quad (6)$$

با توجه به این که نمایه‌های کل، اثرهای متقابل فراسنجه‌ها را نیز در نظر می‌گیرند، در این پژوهش از این نمایه‌ها برای بررسی اثر فراسنجه‌ها استفاده شده است. خروجی این تحلیل حساسیت برای N فراسنجه و M گره، ماتریس حساسیت اثرهای کل

به صورت
$$\begin{bmatrix} S_T^{11} & \dots & S_T^{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_T^{M1} & \dots & S_T^{MN} \end{bmatrix}$$
 است که در آن S_T^{ij} نشان‌دهنده

اثر کل فراسنجه Z روی خروجی گره i است. برابر رابطه (۶) برای محاسبه نمایه‌های حساسیت هر گره، میزان‌های واریانس شرطی مربوط به هر گره بر کل واریانس آن گره تقسیم می‌شود. لذا هنگامی که نمایه‌های مربوط به گره‌های مختلف در ماتریس حساسیت اثرهای کل کنار هم قرار گیرند، بزرگی آن‌ها نسبت به هم قابل مقایسه نیست. برای حل این مسأله، رابطه (۶) در ضرب $V(y)$ ضرب شده و از رابطه (۷) برای محاسبه ماتریس حساسیت اثرهای کل استفاده شده است.

$$S_T = V(h) - V(E(h|y_i)) \quad (7)$$

به طور معمول خروجی مستقیم مدل با معیارهای ارزیابی مانند ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) جایگزین می‌شود (Tang et al., 2007). در این پژوهش از معیار RMSE که در پیشینه تحقیق کاربرد زیادی در واسنجی شبکه‌های توزیع آب داشته است و همچنین معیار میانگین مطلق خطا (MAE) استفاده شده و نتایج باهم مقایسه شده است.

یکی از مرحله‌های تأثیرگذار در نتایج تحلیل حساسیت، مرحله نمونه‌گیری است. نوع و مشخصات تابع توزیع فراسنجه‌ها و روش نمونه‌گیری از فراسنجه‌ها بر نتایج تحلیل حساسیت تأثیرگذار است. با توجه به کارآمدتر بودن روش نمونه‌گیری چند وجهی‌های لاتین^۵ (LHS) برای نمونه‌گیری تصادفی (Tang et al., 2007)، در این پژوهش از روش فنی LHS و توزیع آماری یکنواخت برای فراسنجه‌ها استفاده شده است. لازم به یادآوری است تحلیل حساسیت سوپول با استفاده از جعبه‌ابزار SAFE در محیط نرم‌افزار Matlab اجرا شده است. جعبه‌ابزار SAFE^۶ یک ابزار رایگان است که امکان استفاده از چندین روش تحلیل حساسیت عمومی را در محیط Matlab و Octave (یک زبان برنامه‌نویسی رایگان در زمینه محاسبات عددی) فراهم می‌کند.

۲-۲- معیارهای انتخاب نقطه‌ها

رویکرد اتخاذ شده برای انتخاب نقطه‌های بهینه، مفهوم‌های پیشینه آنتروپی و حساسیت را در یک تابع هدف و کمترین میزان هزینه نمونه‌برداری را با تابع هدف دیگر در نظر می‌گیرد.

⁴ Total Effects

⁵ Latin Hypercube Sampling

⁶ Sensitivity Analysis for Everybody

¹ First-Order Indices

² Main Effects

³ Total-Order Indices

را نشان می دهند.

مسئله بهینه سازی مطرح در این پژوهش یک مسئله بهینه سازی دوهدفه عدد صحیح است که برای حل آن از الگوریتم ژنتیک چندهدفه عدد صحیح با عنوان MI-NSGA-II که توسط Askari et al. (2017) معرفی شده، استفاده شده است.

۲-۳- تحلیل هیدرولیکی

با توجه به تغییر ویژگی های شبکه طی فرایند تحلیل حساسیت، وضعیت شبکه به احتمال زیاد از حالت نرمال خارج می شود. لذا با توجه به این که در این حالت تحلیل PDA می تواند با ایجاد تصویر دقیق تر از وضعیت هیدرولیکی شبکه موجب تغییر در نتایج تحلیل حساسیت و نقطه های منتخب شود، لذا در این تحقیق از تحلیل PDA استفاده شده است. برای این منظور نسبت به کدنویسی در محیط نرم افزار Matlab همراه با به کارگیری تابع های کتابخانه ای نرم افزار Epanet و استفاده از رابطه فشار- دبی ارائه شده توسط Wagner et al. (1988) اقدام شده است. لازم به یادآوری است در این پژوهش، تحلیل PDA بر مبنای کمترین فشار مورد نیاز برابر با ۳۰ متر صورت گرفته است.

۲-۴- بررسی موردی

شبکه مورد بررسی که در ادبیات فنی به شبکه Anytown معروف است، نخستین بار توسط Walski et al. (1987) ارائه شده است. ویژگی های مورد استفاده برای این شبکه در این پژوهش، بر مبنای اطلاعات ارائه شده توسط Ormsbee (1989) است. این شبکه از ۳۴ لوله، ۱۶ گره مصرف، ۲ تانک، سه پمپ (به صورت موازی) و یک چاه تشکیل شده است (شکل ۱).

در این پژوهش، به منظور کاهش شمار فراسنجه های مورد بررسی، لوله های شبکه بر مبنای ضریب زبری به پنج دسته مطابق جدول ۱ تقسیم شده اند. توزیع آماری مورد استفاده برای هر دسته لوله، توزیع یکنواخت با بازه تغییر پذیری های ± 30 نسبت به میزان ضریب زبری پایه در آن دسته است. میزان زبری پیش فرض برای هر دسته لوله به عنوان میانگین توزیع آماری یکنواخت در نظر گرفته شده است. لوله های شبکه بر مبنای قطر نیز به چهار دسته برابر جدول ۲ تقسیم شده اند. توزیع آماری مورد استفاده برای هر دسته، توزیع یکنواخت با بازه تغییرات 50 ± 8 میلی متر (دو اینچ) نسبت به میانگین در آن دسته است.

Y_k به عنوان مجموعه K نقطه نمونه گیری از میان n نقطه تعریف شده و برای بررسی تأثیر فراسنجه θ_j روی طراحی نمونه برداری Y_k معیاری برابر رابطه (۸) در نظر گرفته شده است.

$$index_j = E(Y_k)_j + S(Y_k)_j \quad (8)$$

که $E(Y_k)_j$ و $S(Y_k)_j$: به ترتیب میانگین و آنتروپی نمایه های حساسیت نقطه های طراحی نمونه برداری برای آن فراسنجه هستند و از رابطه های (۹) و (۱۰) محاسبه می شوند.

$$E(Y_k)_j = 1/K \left(\sum_{i=1}^K S_T^{ij} \right) \quad (9)$$

$$S(Y_k)_j = - \sum_{i=1}^K \left[\left(\frac{S_T^{ij}}{\sum_{i=1}^K S_T^{ij}} \right)_i \ln \left(\frac{S_T^{ij}}{\sum_{i=1}^K S_T^{ij}} \right) \right], \quad \forall i \in [1, K] \quad (10)$$

اگر طراحی نمونه برداری Y_k به ازای فراسنجه های مختلف، بیشترین میزان $index_j$ را دارا باشد، نسبت به دیگر طراحی های نمونه برداری برتر خواهد بود. لذا مجموع میزان های $index_j$ به عنوان معیار برتری هر طراحی نمونه برداری و نخستین تابع هدف، در نظر گرفته شده است (رابطه ۱۱).

$$F_1 = \sum_{j=1}^N index_j \quad (11)$$

که N: نشان دهنده شمار فراسنجه های مدل است. اگر اندازه طراحی نمونه برداری برابر یک باشد، میزان آنتروپی و در نتیجه $index_j$ قابل محاسبه نخواهد بود. لذا در این حالت، تابع هدف اول از رابطه (۱۲) محاسبه می شود که در آن a ضریبی کمتر از یک بوده و میزان آن برابر یا کمتر از $1/N$ فرض می شود.

$$F_1 = a \left(\sum_{j=1}^N S_T^j \right) \quad (12)$$

هزینه طراحی نمونه برداری به عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است. البته از آنجایی که مدل سازی هزینه های گوناگون برای هر طراحی نمونه برداری مشکل است، لذا شمار حسگرها به عنوان جایگزین هزینه های متناظر در نظر گرفته شده است. رابطه (۱۳) تابع هدف دوم را نشان می دهد که در آن Num_{Sens} نشانگر شمار حسگرها در هر طراحی نمونه برداری است.

$$F_2 = Num_{Sens} \quad (13)$$

محدودیت بهینه سازی به صورت رابطه (۱۴) تعریف شده است.

$$Num_{Sens}^{min} \leq Num_{Sens} \leq Num_{Sens}^{max} \quad (14)$$

که Num_{Sens} : شمار حسگرها، Num_{Sens}^{min} : کمترین شمار مورد نیاز حسگرها و Num_{Sens}^{max} : بیشترین شمار مجاز حسگرها

با توجه به اینکه به علت وجود تانک در شبکه، الگوی فشاری گره‌ها در ۲۴ ساعت آغازین تحلیل هیدرولیکی ثابت نبود، لذا دوره زمانی ۴۸ ساعت برای تولید نتایج خام استفاده شده است. نتایج خام شامل میزان‌های فشار در ۱۶ گره مصرف برای ۲۴ ساعت انتهایی دوره زمانی تحلیل هیدرولیکی می‌شود.

گره‌های شبکه با میزان تقاضای همانند نیز در یک دسته قرار گرفته و با این معیار، هفت دسته برای گره‌ها ایجاد شده که جدول ۳ ویژگی‌های مربوط به گره‌های موجود در هر دسته را نشان می‌دهد. توزیع آماری مورد استفاده برای هر دسته گره، توزیع یکنواخت با بازه تغییرپذیری‌های ± 0.25 میزان تقاضای پایه در آن دسته است.

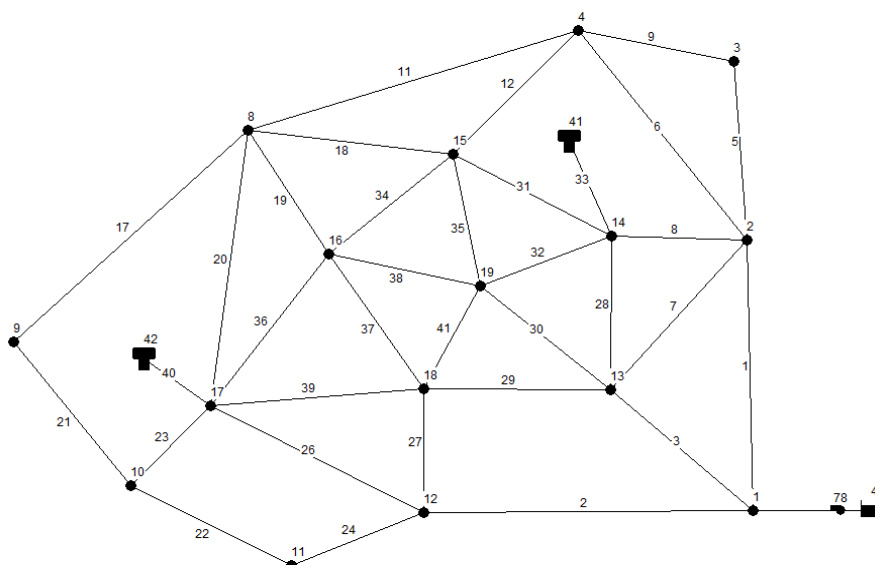


Fig. 1 Layout of the Anytown network (Ormsbee, 1989)
 شکل ۱ ساختار شبکه (Ormsbee, 1989) Anytown

جدول ۳ دسته‌بندی گره‌ها به منظور بررسی فراسنج

تقاضای گرهی

Table 3 Classification of nodes for evaluating the parameter of nodal demand

Class	Nodes	Base demand (l/s)
1	1, 13	31.55
2	2, 3	12.62
3	4, 15	31.55
4	8, 9, 10, 12, 16, 18	12.62
5	11, 17	31.55
6	14	50.47
7	19	63.09

پیش‌فرض‌های مورد بررسی برای طراحی نمونه‌برداری شامل حالت‌های مختلف فراسنج‌های ضریب زبری، قطر لوله‌ها و تقاضای گرهی به منظور واسنجی هیدرولیکی مدل است. این پیش‌فرضها عبارتند از: (۱) طراحی نمونه‌برداری بر مبنای میزان‌های ضریب زبری لوله‌ها؛ (۲) طراحی نمونه‌برداری بر مبنای تقاضای گرهی؛ (۳) طراحی نمونه‌برداری بر مبنای قطر لوله‌ها؛ (۴)

جدول ۱ دسته‌بندی لوله‌ها بر مبنای ضریب‌های هیزن ویلیامز

Table 1 Classification of pipes based on the Hazen-Williams coefficient

Class	Hazen-Williams coefficient	Pipes
1	120	1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 12, 29
2	70	7, 28, 30, 31, 32, 35, 37, 38, 41
3	90	24, 26, 27, 34, 36, 39
4	130	11, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23,
5	110	33, 40

جدول ۲ دسته‌بندی لوله‌ها به منظور بررسی فراسنج قطر

Table 2 Classification of pipes for evaluating the parameter of diameter

Class	Pipes	Diameter (mm)
1	11, 17, 19, 20, 21, 22, 24, 27, 36	203.2
2	5, 6, 8, 9, 12, 18, 23, 26, 30, 32, 34, 35, 38	254
3	7, 28, 29, 31, 33, 37, 39, 40	304.8
4	1, 2, 3	406.4

جدول ۴ نتایج بهینه یابی الگوریتم ژنتیک در حالت طراحی

نمونه برداری بر مبنای میزان های ضریب زبری لوله ها

Table 4 Results of genetic algorithm optimization in the case of sampling design based on the values of pipes' Hazen-Williams coefficient

F ₁	F ₂	points
1.85	1	19
6.14	2	15-19
9.60	3	15-16-19
12.06	4	8-15-16-19
13.80	5	14-15-16-17-19
15.38	6	8-14-15-16-17-19
16.50	7	8-9-14-15-16-17-19
17.46	8	8-9-10-14-15-16-17-19
18.21	9	8-9-10-11-14-15-16-17-19
18.77	10	4-8-9-10-14-15-16-17-18-19
19.40	11	4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19
19.71	12	3-4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19

همان طور که مشاهده می شود نقطه های انتهایی شبکه در این حالت اولویت بالایی دارند. با افزایش تقاضا و در نتیجه تأثیر زبری، اولویت نقطه های منتخب به سمت نقطه های با تقاضای زیاد، گرایش یافته است. به عنوان مثال در حالت تقاضای زیاد، نقطه های ۱۴ و ۱۹ که بیشترین تقاضا را در شبکه دارند، در اولویت انتخاب قرار گرفته اند. مقایسه نتایج با حالت تحلیل ۲۴ ساعته نشان می دهد که نتایج تحلیل ۲۴ ساعته همانندی زیادی با نتایج این سه حالت دارد و در واقع ترکیبی از نتایج این سه

طراحی نمونه برداری بر مبنای ضریب زبری و قطر لوله ها؛ (۵) طراحی نمونه برداری بر مبنای ضریب زبری لوله ها و تقاضای گرهی؛ (۶) طراحی نمونه برداری بر مبنای قطر لوله ها و تقاضای گرهی؛ (۷) طراحی نمونه برداری بر مبنای قطر، ضریب زبری لوله ها و تقاضای گرهی.

۳- یافته ها و بحث

میزان های تابع های هدف و نقطه های بهینه به دست آمده در پیش فرض اول (طراحی نمونه برداری بر مبنای میزان های ضریب زبری لوله ها) در جدول ۴ نشان داده شده است. به منظور تأثیر دوره های تقاضا در طول شبانه روز بر نتایج طراحی نمونه برداری، بر مبنای میزان های ضریب تقاضا در الگوی مصرف ۲۴ ساعته، سه دوره با تقاضای زیاد (High) در ساعت های ۸ تا ۱۶، کم (Low) در ساعت های ۲ تا ۷ و متوسط (Average) برای دیگر ساعت ها در نظر گرفته شده است. دیگر مفروض های مسئله مانند ماتریس نمونه و ... بدون تغییر در نظر گرفته شده است. جدول ۵ نقطه های به دست آمده برای این سه بازه را نشان می دهد. در حالت تقاضای کم به علت کاهش سرعت آب در لوله ها، به طور کلی تأثیر زبری بر وضعیت هیدرولیکی شبکه کاهش پیدا می کند.

جدول ۵ نقطه های بهینه نمونه برداری برای بازه های مختلف تقاضا در حالت طراحی نمونه برداری

بر مبنای میزان های ضریب زبری لوله ها

Table 5 Optimal sampling points for different demand ranges in the case of sampling design based on the values of pipes' Hazen-Williams coefficient

F ₂	Low	Ave	High
1	17	19	14
2	10-17	15-19	14-19
3	9-10-17	15-16-19	14-15-19
4	9-10-11-17	8-11-17-19	14-15-16-19
5	9-10-14-17-19	10-11-15-17-19	8-14-15-16-19
6	9-10-11-14-17-19	8-9-10-11-17-19	8-14-15-16-17-19
7	8-9-10-11-14-17-19	8-9-10-11-15-17-19	4-8-14-15-16-17-19
8	8-9-10-11-14-15-17-19	8-9-10-11-15-16-17-19	4-8-14-15-16-17-18-19
9	8-9-10-11-14-15-16-17-19	4-8-9-10-11-15-16-17-19	4-8-9-14-15-16-17-18-19
10	4-8-9-10-11-14-15-16-17-19	4-8-9-10-11-15-16-17-18-19	4-8-9-10-14-15-16-17-18-19
11	4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19	4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19	3-4-8-9-10-14-15-16-17-18-19
12	3-4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19	3-4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19	3-4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19

هستند. انتخاب نقطه ۱۹ به واسطه اینکه بیشترین تقاضا را دارد، مورد انتظار است. نقطه ۱۵ در مجاورت دو نقطه ۱۴ و ۱۹ قرار دارد که بیشترین تقاضا را دارند بنابراین برتری این نقطه بر دیگر نقطه‌ها نیز توجیه می‌شود. علت برتری این نقطه بر نقطه ۱۴ این است که رفتار آن به واسطه مجاورت با نقطه‌های ۴، ۱۴ و ۱۶ بیشتر تحت تأثیر دسته اول، دوم و سوم لوله‌ها است. نقطه ۸ به واسطه دوری از مخزن‌های سومین نقطه منتخب است. نقطه‌های مجاور نقطه ۸ نقطه‌هایی هستند که تأثیر قطر دسته یک بر رفتار نقطه ۸ را تقویت می‌کنند. نقطه ۹ اگرچه دور از مخزن‌ها است ولی به طور مستقیم تحت تأثیر فراسنجه‌های غیر از قطر دسته اول نیست. نقطه ۱۷ در این حالت نمایه‌های کمتری داشته است لذا در بین آخرین نقطه‌های منتخب است. به منظور بررسی اثرهای توأم فراسنجه‌های ضریب زبری و قطر لوله‌ها بر نتایج طراحی نمونه‌برداری، پیش‌فرض چهارم تعریف شده است. نتایج به دست آمده در پیش‌فرض چهارم (طراحی نمونه‌برداری بر مبنای ضریب زبری و قطر لوله‌ها) در جدول ۷ نمایش داده شده است.

بررسی ماتریس حساسیت نشان می‌دهد اگرچه تأثیرگذارترین فراسنجه، زبری دسته اول بوده ولی در مجموع فراسنجه‌های مربوط به قطر تأثیر خیلی بیشتری بر نتایج داشته‌اند. نمایه‌های مربوط به زبری دسته‌های دو تا پنج میزان‌هایی نزدیک به صفر دارند. تغییرهای نمایه‌های دیگر نیز به گونه‌ای است که مؤید

حالت است. حالت تقاضای زیاد، بیشترین و حالت تقاضای کم، کمترین همانندی نتایج را داشته‌اند.

نتایج طراحی نمونه‌برداری در پیش‌فرض دوم (طراحی بر مبنای تقاضای گرهی) در جدول ۶ نمایش داده شده است. برابر این جدول، نقطه‌های ۸ و ۱۴ نقطه‌هایی هستند که بیشترین تأثیرپذیری را از مجموعه فراسنجه‌ها دارند. نقطه ۱۴ یکی از نقطه‌های با تقاضای زیاد در شبکه و مجاور تانک است. نقطه ۸ نیز جزو نقطه‌های انتهایی شبکه است؛ لذا دیگر فراسنجه‌ها به صورت مستقیم و نامستقیم بر آن تأثیرگذارند. این در حالی است که نقطه‌های ۱۱ یا ۹ بزرگ‌ترین نمایه‌های مربوط به ماتریس حساسیت را به خود اختصاص داده‌اند. علت انتخاب دیر هنگام این دو نقطه، این است که به رغم نمایه‌های بزرگ به ازای برخی فراسنجه‌ها، در مجموع و به ازای سایر فراسنجه‌ها نمایه‌های کوچکی دارند. نقطه‌های نزدیک به مخزن با هد ثابت، در این حالت نیز جزو بدترین نقطه‌های نمونه‌برداری هستند. تغییر مهمی که در این پیش‌فرض نسبت به پیش‌فرض پیش مشاهده می‌شود اولویت گره ۱۹ است. این گره به ازای همه فراسنجه‌ها به جز فراسنجه دسته هفتم (تقاضای گره ۱۹) از همه گره‌های منتخب پیش از خودش، نمایه‌های به نسبت کمتری دارد. جدول ۶ نتایج طراحی نمونه‌برداری در پیش‌فرض سوم (طراحی نمونه‌برداری بر مبنای قطر لوله‌ها) را نیز نشان می‌دهد. در این حالت نقطه‌های ۱۹، ۱۵ و ۸ بهترین نقطه‌های نمونه‌برداری

جدول ۶ نتایج طراحی نمونه‌برداری در پیش‌فرض‌های دوم و سوم

Table 6 Results of sampling design in the scenarios 2 and 3

Sampling design based on nodal demand			Sampling design based on diameter		
F ₁	F ₂	Points	F ₁	F ₂	Points
0.57	1	14	3.46	1	19
2.72	2	8-14	9.11	2	15-19
4.31	3	8-14-17	14.11	3	8-15-19
5.43	4	8-14-15-17	17.37	4	8-15-16-19
6.28	5	8-9-14-16-17	19.88	5	8-14-15-16-19
6.98	6	8-9-14-15-16-17	21.84	6	8-9-10-15-16-19
7.55	7	8-9-10-14-15-16-17	23.56	7	8-9-10-14-15-16-19
8.02	8	8-9-10-14-15-16-17-19	24.56	8	8-9-10-11-14-15-16-19
8.34	9	8-9-10-11-14-15-16-17-19	25.82	9	4-8-9-10-11-14-15-16-19
8.57	10	4-8-9-10-11-14-15-16-17-19	26.80	10	4-8-9-10-11-14-15-16-17-19
8.77	11	4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19	27.11	11	3-4-8-9-10-11-14-15-16-17-19
8.79	12	3-4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19	27.33	12	3-4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19

جدول ۷ نتایج طراحی نمونه برداری در پیش فرض های چهارم و پنجم

Table 7 Results of sampling design in the scenarios 4 and 5

Sampling design based on roughness coefficient and nodal demand			Sampling design based on roughness coefficient and diameter		
F ₁	F ₂	Points	F ₁	F ₂	Points
1.85	1	19	3.71	1	19
10.74	2	15-19	20.69	2	14-19
16.84	3	8-15-19	32.25	3	14-15-19
21.13	4	8-15-16-19	40.05	4	4-14-15-19
24.30	5	8-15-16-17-19	45.86	5	4-8-14-15-19
26.84	6	8-14-15-16-17-19	49.54	6	8-14-15-16-17-19
28.79	7	8-9-14-15-16-17-19	53.35	7	4-8-10-14-15-16-19
30.38	8	8-9-10-14-15-16-17-19	55.99	8	4-8-9-10-14-15-16-19
31.63	9	4-8-9-11-14-15-16-17-19	58.58	9	4-8-9-10-14-15-16-17-19
32.92	10	4-8-9-10-11-14-15-16-17-19	60.62	10	3-4-8-9-10-14-15-16-17-19
33.83	11	4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19	62.13	11	3-4-8-9-10-14-15-16-17-18-19
34.25	12	3-4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19	63.04	12	3-4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19

حالت مشترک نشان می دهد. نتایج ارائه شده در جدول ۷ و شکل ۳ بیانگر این است که انتخاب نقطه ها در این پیش فرض همانندی بیشتری با نتایج پیش فرض زبری داشته و فراسنجه تقاضا تأثیر کمی در انتخاب نقطه ها داشته اند. این تأثیر در تغییرپذیری های کوچک اولویت نقطه هایی مانند گره های ۸ و ۱۴ قابل مشاهده است.

نتایج به دست آمده در پیش فرض ششم (طراحی نمونه برداری بر مبنای قطر لوله ها و تقاضای گرهی) در جدول ۸ نمایش داده شده است. شکل ۴ نیز تغییرپذیری های نسبی تابع F₁ را برای حالت های مختلف نسبت به حالت مشترک نشان می دهد. برابر

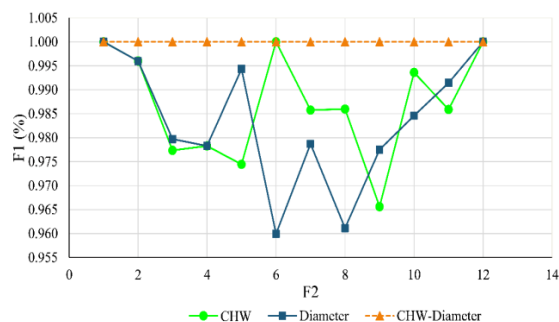


Fig. 2 Relative variations of F1 function for solutions obtained considering roughness and diameter in separate and joint forms

شکل ۲ تغییرپذیری های نسبی تابع F₁ برای پاسخ های به دست آمده با در نظر گرفتن زبری و قطر به صورت مجزا و مشترک

تأثیرهای مشترک زبری و قطر بر یکدیگر است. نقطه های به دست آمده در همه حالت های درصد همانندی زیادی با نقطه های حاصل از بررسی مجزای فراسنجه های زبری و قطر دارد. در عین حال بیشترین تفاوت در اولویت مربوط به گره ۴ مشاهده می شود. اولویت بالای این گره نشان دهنده عدم قطعیت زیاد رفتار آن گره ناشی از تغییرپذیری های توأم زبری و قطر است زیرا این گره در حالت های مجزا اولویت پایینی داشته است. میزان های تابع F₁ برای پاسخ های طراحی نمونه برداری بر مبنای زبری و قطر به صورت مجزا و بر مبنای ماتریس حساسیت این پیش فرض محاسبه شده است. شکل ۲ تغییرپذیری های نسبی تابع F₁ را برای حالت های مختلف نسبت به حالت مشترک نشان می دهد. چنانچه مشاهده می شود میزان های تابع F₁ برای حالت های مجزا بیش از ۹۵ درصد با حالت مشترک همانندی دارد. در مجموع پاسخ های زبری نزدیکی بیشتری به حالت مشترک دارند.

به منظور بررسی اثرگذاری های توأم فراسنجه های ضریب زبری و تقاضای گرهی بر نتایج طراحی نمونه برداری، پیش فرض پنجم تعریف شده است. نتایج به دست آمده در پیش فرض پنجم (طراحی نمونه برداری بر مبنای ضریب زبری لوله ها و تقاضای گرهی) در جدول ۷ نمایش داده شده است. شکل ۳ نیز تغییرهای نسبی تابع F₁ را برای حالت های مختلف نسبت به

حالت‌های مختلف نسبت به حالت اخیر نشان می‌دهند. به‌طور کلی درصد همانندی نتایج F1 از حالت‌های شامل زبری به حالت‌های شامل تقاضا، کاهش می‌یابد. بیشترین همانندی در حالت زبری و قطر توأم و کمترین همانندی در حالت تقاضا به‌صورت مجزا و توأم با قطر مشاهده می‌شود. درعین حال باید توجه کرد که در همه حالت‌ها و به ازای شمار مشخص نقطه‌ها، بخش زیادی از نقطه‌ها همانند هستند و اختلاف‌هایی که با حالت بهینه مشاهده می‌شود اغلب ناشی از اختلاف در یک یا دو نقطه است. همانندی زیاد نتایج در حالت‌های مربوط به زبری و قطر تا حدود زیادی ناشی از همانندی دسته‌بندی این دو فراسنجه است. منظور از همانندی دسته‌بندی، عضویت برخی لوله‌ها در یک دسته به ازای هر دو فراسنجه است. این ویژگی در مورد دسته اول زبری و دسته چهارم قطر (لوله‌های ۱، ۲ و ۳) به طور کامل صادق است و موجب می‌شود اثرگذاری‌های همانندی ناشی از آن دسته به ازای تغییرات قطر یا زبری بر فشار گره‌ها مشاهده شود. یکی از علل تفاوت نتایج مربوط به تقاضا با نتایج دیگر بخش‌ها نیز همین عامل دسته‌بندی است که به‌دلیل ناهمبندی با دسته‌بندی مربوط به زبری یا قطر بیشتر تحت‌الشعاع این فراسنجه‌ها قرار گرفته است.

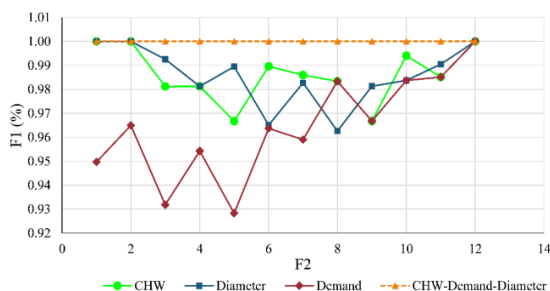


Fig. 5 Relative variations of F1 function for solutions obtained considering roughness, diameter and demand in separate and joint forms

شکل ۵ تغییرپذیری‌های نسبی تابع F1 برای پاسخ‌های به‌دست آمده با در نظر گرفتن زبری، قطر و تقاضا به‌صورت مجزا و مشترک

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

به منظور طراحی بهینه نمونه‌برداری فشار در شبکه‌های توزیع آب برای واسنجی مدل‌های هیدرولیکی، در این پژوهش یک رویکرد جدید مبتنی بر آنتروپی و میانگین میزان‌های حساسیت طراحی نمونه‌برداری نسبت به فراسنجه‌های مختلف ارائه شده

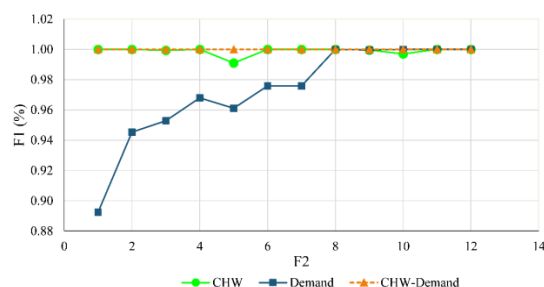


Fig. 3 Relative variations of F1 function for solutions obtained considering roughness and demand in separate and joint forms

شکل ۳ تغییرپذیری‌های نسبی تابع F1 برای پاسخ‌های به‌دست آمده با در نظر گرفتن زبری و تقاضا به‌صورت مجزا و مشترک

شکل ۴ نتایج پیش‌فرض قطر همانندی بیشتری با حالت مشترک داشته‌اند. همانند پیش‌فرض پیش، نتایج این پیش‌فرض نیز بیشتر تحت تأثیر قطر بوده و تقاضا تأثیر کمی بر انتخاب نقطه‌ها داشته است، اگرچه تأثیرهای متقابل فراسنجه‌ها موجب تفاوت‌هایی شده است. نقطه‌های ۹ و ۱۱ اولویت بالاتر و نقطه ۱۴ اولویت پایین‌تری نسبت به هر دو پیش‌فرض قطر و تقاضا گرفته‌اند.

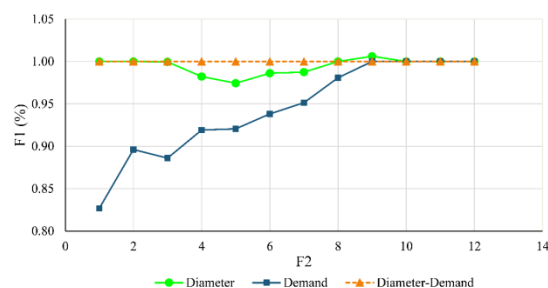


Fig. 4 Relative variations of F1 function for solutions obtained considering diameter and demand in separate and joint forms

شکل ۴ تغییرپذیری‌های نسبی تابع F1 برای پاسخ‌های به‌دست آمده با در نظر گرفتن قطر و تقاضا به‌صورت مجزا و مشترک

به‌منظور بررسی اثرگذاری‌های توأم فراسنجه‌های قطر، ضریب زبری و تقاضای گرهی بر نتایج طراحی نمونه‌برداری، پیش‌فرض هفتم تعریف شده است. نتایج به‌دست آمده در پیش‌فرض هفتم (طراحی نمونه‌برداری بر مبنای قطر، ضریب زبری لوله‌ها و تقاضای گرهی) در جدول ۸ نمایش داده شده است. شکل‌های ۵ و ۶ تغییرپذیری‌های نسبی تابع F1 را برای

جدول ۸ نتایج طراحی نمونه برداری در پیش فرض های ششم و هفتم

Table 8 Results of sampling design in the scenarios 6 and 7

Sampling design based on diameter and nodal demand			Sampling design based on diameter, roughness and nodal demand		
F ₁	F ₂	Points	F ₁	F ₂	Points
2.28	1	19	3.76	1	19
16.45	2	15-19	40.47	2	15-19
25.47	3	9-15-19	63.67	3	14-15-19
31.82	4	9-11-15-19	79.99	4	4-14-15-19
36.61	5	9-10-11-15-19	92.25	5	4-8-14-15-19
40.57	6	8-9-10-11-15-19	100.47	6	4-8-9-14-15-19
43.51	7	8-9-10-11-15-16-19	107.99	7	4-8-10-14-15-16-19
46.02	8	8-9-10-11-14-15-16-19	114.02	8	4-8-9-10-14-15-16-19
47.89	9	8-9-10-11-14-15-16-17-19	119.19	9	4-8-9-10-14-15-16-17-19
49.85	10	4-8-9-10-11-14-15-16-17-19	123.78	10	3-4-8-9-10-14-15-16-17-19
50.48	11	4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19	127.26	11	3-4-8-9-10-14-15-16-17-18-19
51.10	12	3-4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19	129.34	12	3-4-8-9-10-11-14-15-16-17-18-19

بهینه نمونه گیری فشار پیاده سازی و ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که روش توسعه داده شده عملکرد مناسبی در انتخاب نقطه ها با پیش فرض های مختلف از خود ارائه می کند. دیگر نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- الگوریتم MI-NSGA-II توانایی مناسبی در یافتن پاسخ های مسئله بهینه سازی چند هدفه عدد صحیح داشته است.

- در حالت طراحی نمونه برداری بر مبنای میزان های ضریب زبری، نقطه های با تقاضای زیاد و نقطه های مجاور آن ها در اولویت انتخاب قرار می گیرند.

- در حالت طراحی نمونه برداری بر مبنای میزان های تقاضای گرهی، نقطه های مجاور تانک ها و نقطه های دور از مخزن ها در اولویت انتخاب قرار می گیرند.

- در حالت طراحی نمونه برداری بر مبنای میزان های قطر لوله، نقطه های با تقاضای زیاد و نقطه های مجاور آن ها در اولویت انتخاب قرار می گیرند. به طور کلی نقطه های به دست آمده در این حالت همانندی بالایی با نقطه های به دست آمده بر مبنای ضریب زبری لوله دارند.

- در حالت طراحی نمونه برداری مشترک بر مبنای میزان های ضریب زبری و قطر، نقطه ها با تقاضای زیاد اولویت بالایی دارند. به صورت کلی نتایج طراحی نمونه برداری مشترک با حالت های مجزای این دو فراسنجه متفاوت است که نشان می دهد تأثیرهای مشترک این دو فراسنجه روی نتایج اثرگذار است.

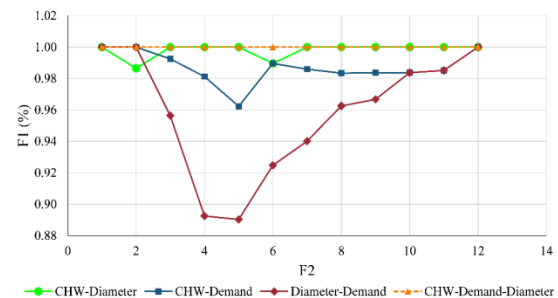


Fig. 6 Relative variations of F1 function for solutions obtained considering roughness, diameter and demand jointly

شکل ۶ تغییرپذیری های نسبی تابع F1 برای پاسخ های به دست آمده با در نظر گرفتن زبری، قطر و تقاضا به صورت مشترک

است. این رویکرد، مجموعه نقطه های بهینه نمونه گیری را به ازای شمار نقطه های متفاوت تشخیص می دهد. در روش ارائه شده از تحلیل PDA استفاده شده و میزان و نحوه اثرگذاری فراسنجه های واسنجی بر عدم قطعیت گره های شبکه شناسایی و مبنای انتخاب نقطه ها قرار گرفته است. در حالی که روش های تحلیل حساسیت مورد استفاده در تحقیقات پیشین اغلب محلی بوده اند، در این تحقیق برای نخستین بار از روش سوپول به عنوان یک روش تحلیل حساسیت عمومی استفاده شده است. رویکرد ارائه شده بر روی یکی از شناخته ترین شبکه های موجود در ادبیات فنی در پیش فرض های مختلفی برای تعیین نقطه های

$RMSE$	ریشه میانگین مربعات خطا
S_T^{ij}	اثر کل فراسنجه z روی خروجی گره i
$S(Y_k)_j$	آنتروپی نمایه‌های حساسیت نقطه‌های طراحی نمونه‌برداری برای هر فراسنجه
V_i	بخشی از واریانس مدل ناشی از i امین جزء بردار ورودی‌ها
V_{ij}	بخشی از واریانس مدل ناشی از اثرهای متقابل فراسنجه‌های x_j و x_i
y	بردار ورودی‌ها
Y_k	طراحی نمونه‌برداری

۶- منبع‌ها

Askari, M., Li, J. and Samali, B. (2017). Cost-effective multi-objective optimal positioning of magnetorheological dampers and active actuators in large nonlinear structures. *Intelligent Material Systems and Structures*, 28(2), 230-253.

Behzadian, K., Ardeshtir, A., Kapelan, Z. and Savic, D. (2008). Stochastic sampling design for water distribution model calibration. *International Journal of Civil Engineering*, 6(1), 48-57.

Bush, C.A. and Uber, J.G. (1998). Sampling design methods for water distribution model calibration. *Water Resources Planning and Management*, 124(6), 334-344.

De Schaezen, W.B.F., Walters, G.A. and Savic, D.A. (2000). Optimal sampling design for model calibration using shortest path, genetic and entropy algorithms. *Urban Water*, 2(2), 141-152.

Homma, T. and Saltelli, A. (1996). Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. *Reliability Engineering & System Safety*, 52(1), 1-17.

Iooss, B. and Lemaître, P. (2015). A review on global sensitivity analysis methods. In: Dellino, G. and Meloni, C. (eds.), *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems*, 101-122, Springer, Boston.

Kapelan, Z.S., Savic, D.A. and Walters, G.A. (2003). Multiobjective sampling design for water distribution model calibration. *Water Resources Planning and Management*, 129(6), 466-479.

Ormsbee, L.E. (1989). Implicit network calibration. *Water Resources Planning and Management*, 115(2), 243-257.

- در حالت طراحی نمونه‌برداری مشترک بر مبنای میزان‌های ضریب زبری و تقاضا، نقطه‌های دارای اولویت به‌صورت کلی همانند با نتایج به‌دست‌آمده بر مبنای ضریب زبری لوله است و میزان‌های تقاضا تأثیر کمی در نتایج داشته‌اند.

- در حالت طراحی نمونه‌برداری مشترک بر مبنای میزان‌های قطر و تقاضا، نقطه‌های دارای اولویت به‌صورت کلی همانند با نتایج به‌دست‌آمده بر مبنای قطر لوله است؛ اگرچه تأثیرهای توأم این دو فراسنجه در مورد برخی نقطه‌ها تأثیرگذار بوده و نتایج متفاوت از حالت‌های طراحی نمونه‌برداری بر مبنای تک‌تک این فراسنجه‌ها به صورت جداگانه ایجاد کرده است.

- حالت طراحی نمونه‌برداری مشترک بر مبنای میزان‌های زبری، قطر و تقاضا بیشترین همانندی را با حالت طراحی نمونه‌برداری مشترک بر مبنای زبری و قطر دارد. به‌طورکلی در حالت‌هایی که فراسنجه زبری در انتخاب نقطه‌ها نقش داشته، همانندی نتایج افزایش داشته ولی با اضافه شدن فراسنجه تقاضا همانندی نتایج کم شده است.

- دوره‌های مختلف تقاضا در طول شبانه‌روز بر اولویت انتخاب نقطه‌ها مؤثر بوده و منجر به انتخاب نقطه‌های متفاوتی نسبت به تحلیل ۲۴ ساعته می‌شوند. نتایج تحلیل ۲۴ ساعته همانندی زیادی با نتایج بازه زمانی با تقاضای زیاد دارد.

۵- فهرست نشانه‌ها

E	امید ریاضی
$E(Y_k)_j$	میانگین نمایه‌های حساسیت نقطه‌های طراحی نمونه‌برداری برای هر فراسنجه
F_1	تابع هدف اول
F_2	تابع هدف دوم
h	خروجی مدل
$index_j$	مجموع میانگین و آنتروپی نمایه‌های حساسیت نقطه‌های طراحی نمونه‌برداری برای هر فراسنجه
m	شمار کل فراسنجه‌های ورودی
MAE	میانگین مطلق خطا
N	شمار فراسنجه‌های مدل
Num_{Sens}	شمار حسگرها در هر طراحی نمونه‌برداری
Num_{Sens}^{min}	کمترین شمار موردنیاز حسگرها
Num_{Sens}^{max}	بیشترین شمار مجاز حسگرها

Saltelli, A., Aleksankina, K., Becker, W., Fennell, P., Ferretti, F., Holst, N., Li, S. and Wu, Q. (2019). Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices. *Environmental Modelling & Software*, 114, 29-39.

Shao, Y., Chu, S., Zhang, T., Yang, Y. J. and Yu, T. (2019). A greedy sampling design algorithm for the model calibration of nodal demand in water distribution systems. *Mathematic Problems in Engineering*, <https://doi.org/10.1155/2019/3917571>.

Soroush, F. and Abedini, M.J. (2019). Optimal selection of number and location of pressure sensors in water distribution systems using geostatistical tools coupled with genetic algorithm. *Journal of Hydroinformatics*, 21(6), 1030-1047.

Tang, T., Reed, P., Wagener, T. and Van Werkhoven, K. (2006). Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(6), 3333-3395.

Tang, Y., Reed, P., Van Werkhoven, K. and Wagener, T. (2007). Advancing the identification and evaluation of distributed rainfall-runoff models using global sensitivity analysis. *Water Resources Research*, 43(6).

Wagner, J.M., Shamir, U. and Marks, D.H. (1988). Water distribution reliability: simulation methods. *Water Resources Planning and Management*, 114(3), 276-294.

Walski, T.M., Brill Jr, E.D., Gessler, J., Goulter, I.C., Jeppson, R.M., Lansey, K., Lee, H.L., Liebman, J.C., Mays, L. and Morgan, D.R. (1987). Battle of the network models: Epilogue. *Water Resources Planning and Management*, 113(2), 191-203.