

# Hydraulic Model Calibration of a Laboratory Water Distribution Network Using Hydraulic and Water Quality Measurements

Mohammad Shahsavandi<sup>1</sup>, Jafar Yazdi<sup>2\*</sup>, Mohammadreza Jalili-Ghazizadeh<sup>3</sup>, Abdollah Rashidi Mehrabadi<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Department of Water and Wastewater, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

\*j\_yazdi@sbu.ac.ir

Received: 5 October 2023

Accepted: 1 January 2024

Discussion: 21 December 2024



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** In the realm of hydraulic modeling for water distribution networks, the calibration process plays a pivotal role. Calibration involves precise adjustments to align a model with observed data. However, when the measured data is scarce, the calibration process becomes challenging. In such cases, laboratory models prove valuable for simulating real-world conditions. Variability in parameters like pipe dimensions, length, roughness coefficients, and nodal demand as well as nodal elevations often leads to disparities between computer-based model outcomes and reality. Despite extensive research on computer-based models, laboratory water distribution network models and their calibration have received relatively limited attention due to the challenges and costs associated with them. In this study, a laboratory model of a water distribution network was constructed and subjected to hydraulic calibration. Roughness coefficients and minor head losses within the network were determined using a meta-heuristic method. Then, pipe roughness coefficients for polyethylene pipes were assessed and compared with values from scientific references. In the following, hydraulic validation of the network was conducted using the water quality simulation of a conservative substance. This approach illustrates the level of concurrence of flow ratios in the network pipes between the model and reality.

**Methodology:** Fig.1 illustrates the schematic and image of the laboratory model of the investigated network. The laboratory network was made of PE40 and consists of a square looped system with 1-meter pipe lengths, employing a 1000-liter tank to maintain a constant water head. The Algorithm of the study is demonstrated in Fig.2. This research was conducted in three stages. In the first stage, network calibration was performed using piezometric pressure and output flow data. Roughness coefficient and pipe minor head loss coefficients were selected as decision variables. The objective function was defined to minimize the total weighted difference in piezometric head and discharge between the model and reality (Eq.1). In the second stage, validation was performed based on pressure

and output flow data. In the third stage, the network's hydraulic validation with respect to pipe flow rates was performed through the modeling of a conservative substance. This is because the dissolution of a conservative substance occurs solely due to mixing at nodes and flow division, allowing it to represent the correspondence of flow ratios in network pipes between the model and reality. In this research, pressure data was recorded using piezometers, and salt concentration was calculated using TDS (Total Dissolved Solids) sensor.

**Results and Discussion:** After performing the optimization, a value of 0.008 was obtained for the Darcy-Weisbach friction coefficient ( $\epsilon$ ), this value aligns well with the assumption of new pipes in the network, in agreement with previous research (e.g., 0.050 by The Plastics Pipe Institute, 2008, and 0.070 by Padilla et al., 2013). Also, values of 1.20 and 0.89 were obtained for the minor loss coefficients of 0.5 and 1-meter pipes, respectively. Furthermore, the optimized minor loss values effectively reflect differences attributed to the number of connections in the 0.5 and 1-meter pipes, falling within recommended scientific ranges. The calculated error values in this section can be observed in Table 4. Notably, unlike previous field studies, this research uniquely focuses on a laboratory model.

After hydraulic calibration and validation using pressure and output flow data, further validation was conducted using the water quality model. The saltwater solution was injected at a specific point in the network, and the TDS quality parameter was measured at the two points in the network. Subsequently, utilizing the TDS values and the established relationship between TDS and salt concentration calculated in the laboratory (as shown in Fig.7), the salt concentration at the location of two sensors was determined. It's worth mentioning that the network's water supply contained dissolved solids. Subsequently, initial and injection concentrations were applied to the model and, the simulation was performed. A comparison of salt concentration results at two sensor locations (as shown in Fig.10) revealed an error of 8.5% in the first experiment and 2.5% in the second. These findings confirm excellent agreement between the laboratory and computer-based network hydraulic model.

**Conclusion:** In hydraulic modeling for water distribution networks, calibration is essential to ensures that the model's predictions align closely with actual observed data. Laboratory models prove valuable when measured data is scarce. This study constructed and hydraulically calibrated a laboratory water distribution network model, determining roughness coefficients and head losses. Optimization yielded a Darcy-Weisbach friction coefficient of 0.008 and minor loss coefficients for 0.5m and 1m pipes of 1.20 and 0.89 respectively. The water quality simulation confirmed good agreement between the laboratory and computer-based network model. Salt concentration validation exhibited an 8.5% error in the first experiment and 2.5% in the second, affirming hydraulic model accuracy.

**Keywords:** Water distribution network, laboratory model, hydraulic calibration, piezometer, Total Dissolved Solids (TDS).



© 2024 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/>)

# واسنجی مدل هیدرولیکی با استفاده از اندازه‌گیری‌های کمی و کیفی شبکه توزیع آب آزمایشگاهی

محمد شاه‌سوندی<sup>۱</sup>، جعفر یزدی<sup>۲\*</sup>، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده<sup>۳</sup>، عبدالله رشیدی مهرآبادی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳ و ۴- دانشیار گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

\*j\_yazdi@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** واسنجی مدل‌های شبکه توزیع آب برای پیش‌بینی رفتار آنها در شرایط مختلف هیدرولیکی و کیفی ضروری است. در مقاله حاضر شرح نتایج واسنجی و صحت‌سنجی هیدرولیکی مدل کامپیوتری یک شبکه آزمایشگاهی ارائه شده است. واسنجی مدل با استفاده از داده‌های فشار و دبی صورت گرفته است. صحت‌سنجی مدل نیز به کمک داده‌های هیدرولیکی و کیفی شبکه انجام شده است. داده‌های کیفیت آب برای صحت‌سنجی نسبت دبی در لوله‌های شبکه استفاده شده است. این پژوهش در سه مرحله دنبال شده است. در مرحله نخست، واسنجی شبکه به کمک داده‌های فشار پیزومتریک و دبی خروجی شبکه انجام شد. متغیر تصمیم در فرآیند بهینه‌سازی، ضریب زبری و ضرایب افت موضعی لوله‌ها انتخاب شده است. در مرحله دوم، صحت‌سنجی شبکه بر اساس داده‌های فشار و دبی خروجی شبکه انجام شده است. در مرحله سوم، صحت‌سنجی هیدرولیکی شبکه از نظر دبی در لوله‌ها با مدلسازی کیفی یک ماده واکنش‌ناپذیر (Conservative) صورت گرفته است. نتایج واسنجی، مقادیر ۰/۰۰۸ و ۰/۰۸ را برای ضریب زبری داری و ویسباز لوله‌ها و مقادیر ۱/۲ و ۰/۸۹ را برای ضرایب افت موضعی در لوله‌های با طول ۰/۵ و ۱ متر نشان می‌دهد. نتایج واسنجی مدل بیانگر آن است که بیشینه خطای مدل در واسنجی برابر با ۳٪ است. همچنین بیشینه خطای استفاده از داده‌های فشار برابر با ۲٪ و بر اساس دبی خروجی برابر با ۵/۹٪ است. نتایج صحت‌سنجی بر اساس مدلسازی کیفی نیز متوسط خطای ۵/۵٪ را نشان می‌دهد. اختلاف کم نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی نشان‌دهنده آن است که مدل هیدرولیکی واسنجی شده است.

**کلیدواژگان:** شبکه توزیع آب، مدل آزمایشگاهی، واسنجی هیدرولیکی، پیزومتر، کل جامدات محلول (TDS).

## ۱- مقدمه

واقعیت استفاده می‌شود. استفاده از این مدل‌ها در کنار مدل‌های رایانه‌ای شبکه توزیع آب می‌تواند به درک بهتری از واقعیت کمک کرده و در صحت‌سنجی نتایج عددی کمک شایانی کند. مدل‌های رایانه‌ای که مبنای بسیاری از بررسی و ارزیابی‌ها قرار می‌گیرند تنها در صورت واسنجی بودن می‌توانند معرف شرایط واقعی بوده و استفاده شوند. این در حالی است که وجود عدم قطعیت در پارامترهای مختلف، مانند قطر، طول، ضریب زبری لوله‌ها و همچنین تراز ارتفاعی گره‌ها در مدل سبب شده تا در بسیاری از موارد، نتایج مدل رایانه‌ای با شرایط واقعی آن همخوانی

در زمینه مدلسازی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب، فرآیند واسنجی، یک سنگ بنای حیاتی است. واسنجی، عمل تنظیم دقیق یک مدل برای همخوانی با داده‌های مشاهده‌ای است و این مرحله برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی بسیار مهم و ضروری است. با این وجود، واسنجی شبکه اغلب با چالش‌هایی همراه است، به ویژه هنگامی که داده‌های واقعی کمیاب بوده یا در دسترس نیستند. در این شرایط، مدل‌های آزمایشگاهی به عنوان ابزاری ارزشمند برای بررسی پدیده‌ها در شرایط نزدیک به

نداشته باشد. نبود همخوانی بدین معنا است که در صورت استفاده از مدل رایانه‌ای برای مسئله‌هایی مانند نشت‌یابی (Zandi et al., 2021) یا یافتن منبع آلودگی (Shahsavandi et al., 2023)، نتوان به نتایج آن اطمینان کرد. در ادامه خلاصه برخی از تحقیقاتی که به موضوع واسنجی و استفاده از مدل آزمایشگاهی شبکه توزیع آب پرداخته‌اند ارائه شده است.

Kapelan et al. (2007) روش جدیدی را برای واسنجی هیدرولیکی شبکه توزیع آب ارائه دادند که در آن از تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی SCEM-UA و مدل هیدرولیکی EPANET استفاده شده است. (Tabesh et al. 2011) یک روش بهینه‌سازی برای واسنجی هر دو نوع مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی (مبتنی بر تقاضا و مبتنی بر فشار) ارائه دادند. متغیرهای مورد استفاده در واسنجی، ضریب زبری لوله، تقاضای گره و قطر لوله انتخاب شده است. (Ramos et al. 2010) به منظور اندازه‌گیری نرخ زوال کلر، از یک مدل آزمایشگاهی استفاده کردند. در این آزمایش، از لوله با قطر اسمی پنج سانتی‌متر استفاده شده است. طول لوله آزمایش ۲۰۰ متر بوده که به صورت حلقوی ساخته شده است. (Ostfeld et al. 2012) نتایج رقابت ۱۴ گروه شرکت‌کننده از مرکزهای دانشگاهی، شرکت‌های آب و مشاوران خصوصی بر روی واسنجی یک مدل شبکه توزیع آب واقعی را بررسی کردند. مدل‌های واسنجی شده هر گروه از نظر میزان تقاضا، فشار، سطح آب مخزن و ضریب‌های زبری با داده‌های واقعی ارزیابی شدند. (Dini and Tabesh 2014) واسنجی همزمان الگوهای تقاضا و ضریب‌های زبری Hazen-Williams را با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها و شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی EPANET در MATLAB انجام دادند. (Dini and Tabesh 2017) واسنجی خودکار مقدار ضریب زوال دیواره در یک مدل شبکه توزیع آب با دو حلقه را انجام دادند. (Zanfei et al. 2020) واسنجی هیدرولیکی مدل شبکه توزیع آب را در قالب یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه و با استفاده از نیازهای گره‌ای و ضریب‌های زبری انجام دادند. (Moghaddam et al. 2020) واسنجی خودکار مدل هیدرولیکی و کیفی یک شبکه

واقعی را با استفاده از الگوریتم PSO و با اندازه‌گیری فشار و کلر باقی‌مانده انجام دادند. (Moasheri et al. 2021) واسنجی همزمان تقاضای گرهی و ضریب‌های زبری لوله‌ها را توسط الگوریتم رقابتی امپریالیستی<sup>۱</sup> در ساعت‌های مختلف روز بررسی کردند. آنان در نهایت از مدل واسنجی شده برای شناسایی ناحیه‌های نشت استفاده کردند. (Dini et al. 2023) واسنجی خودکار مدل شبکه توزیع آب شهر صوفیان را با در نظر گرفتن عدم قطعیت متغیر فشار در گره‌ها و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO انجام دادند. (Nasirian and Faghfour Maghrebi 2014) نشت‌یابی مبتنی بر واسنجی به روش کلونی مورچه‌ها را بررسی کردند. این روش برای دو شبکه شامل یک شبکه فرضی و یک شبکه آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته بر روی هر دو شبکه، ضمن تأیید امکان نشت‌یابی با استفاده از واسنجی فشارهای گرهی، سرعت و همگرایی روش کلونی مورچه‌ها را تأیید می‌کند.

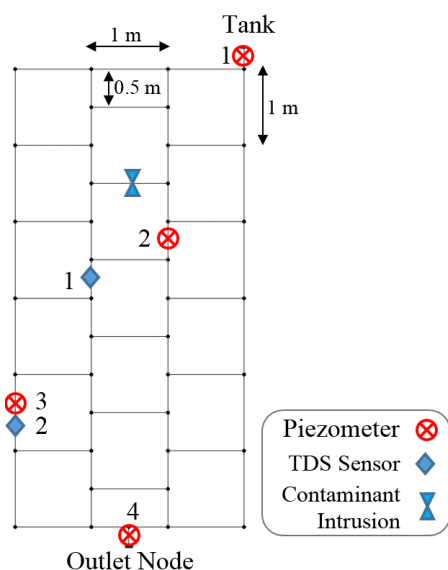
با وجود بررسی‌های گسترده بر روی مدل‌های رایانه‌ای، توسعه مدل‌های آزمایشگاهی شبکه توزیع آب و واسنجی آن‌ها به طور عمده به دلیل چالش‌ها و هزینه‌هایی که دارند، کمتر توجه شده است. مدل‌های آزمایشگاهی چندین برتری منحصربه‌فرد برای درک و پرداختن به مسئله‌ها در شبکه‌های توزیع آب ارائه می‌دهند که انجام این موضوع توسط مدل‌های شبیه‌سازی به سادگی امکان‌پذیر نیست. از این‌رو در این پژوهش ساخت و واسنجی هیدرولیکی یک مدل آزمایشگاهی دنبال شده و ضریب‌های زبری و افت موضعی در آن تعیین شده است. بررسی ضریب زبری لوله‌های پلی‌اتیلن و همچنین ضرایب افت موضعی در این لوله‌ها و مقایسه آن‌ها با مقدارهای ارائه شده در مرجع‌های علمی در این پژوهش بحث شده است. همچنین استفاده از اندازه‌گیری کیفی برای صحت‌سنجی هیدرولیکی شبکه نوآوری است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

شبکه آزمایشگاهی ساخته شده یک شبکه حلقوی با ابعاد

1. Imperialist Competitive Algorithm

انجام شده است؛ چرا که به صورت یک ماده واکنش‌ناپذیر عمل کرده (Sheefa and Barkdoll, 2023) و آزمایش آن به سادگی امکان‌پذیر است. برای اندازه‌گیری غلظت نمک از اندازه‌گیری TDS و رابطه آن با میزان نمک که در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است، استفاده شد. حسگر TDS مورد استفاده در شکل ۴-ا نشان داده شده است.



**Fig. 1** The Laboratory Model and The Hydraulic Model of the Investigated Network

شکل ۱ مدل آزمایشگاهی و مدل هیدرولیکی شبکه مورد بررسی

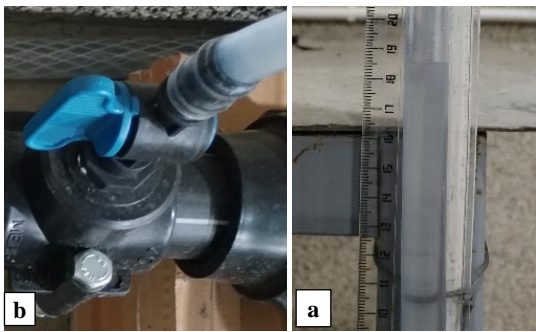
برای ساخت این حسگر از میکروکنترلر ATmega32، ماژول ساعت DS3231 برای ثبت زمان، ماژول کارت حافظه برای ذخیره‌سازی اطلاعات، حسگر دماسنج و ماژول اندازه‌گیری TDS (با دقت ۰.۹۷٪) استفاده شده است. برابر با برنامه نوشته شده، مقدار TDS با فاصله‌های زمانی ۳ ثانیه در درون کارت حافظه ذخیره می‌شود. لازم

مربعی به طول یک متر است. این شبکه از ۴۴ گره، ۶۴ لوله دو مخزن و دو شیر تشکیل شده است. برای تأمین آب با هد ثابت، از یک مخزن ۱۰۰۰ لیتری استفاده شده و سطح آب در آن با استفاده از شناور، ثابت شده است. ورودی مخزن دارای ظرفیت ۳۰ لیتر بر دقیقه است. شکل ۱ مدل هیدرولیکی شبکه (در نرم‌افزار EPANET) و مدل فیزیکی ساخته شده را نشان می‌دهد. لوله‌های شبکه از جنس پلی‌اتیلن با قطر خارجی چهار سانتی‌متر است. این قطر به گونه‌ای انتخاب شده تا سرعت آب در شبکه با توجه به دبی منبع تأمین آن در بازه معقولی باشد (بیشینه و میانگین سرعت در این شبکه برابر با ۰/۳۶ و ۰/۰۸ متر بر ثانیه است). مرحله‌های انجام واسنجی و صحت‌سنجی شبکه در شکل ۲ نشان داده شده است. صحت‌سنجی مدل در دو مرحله، هم بر مبنای داده‌های فشار (پیزومتریک) و دبی خروجی از شبکه (ناشی از تقسیم حجم جریان خروجی از سامانه به مدت زمان تخلیه) و هم بر مبنای نسبت دبی موجود در لوله‌ها (با مدلسازی کیفی نمک به عنوان یک ماده واکنش‌ناپذیر) انجام شده است. از آنجایی که اضمحلال یک ماده شیمیایی واکنش‌ناپذیر تنها در اثر اختلاط در گره‌ها و بر مبنای تقسیم دبی جریان انجام می‌شود، در صورتی که خطای مدل کیفی کم باشد می‌توان نتیجه گرفت که نسبت دبی در لوله‌ها در مدل و واقعیت با یکدیگر همخوانی دارند.

برای انجام واسنجی هیدرولیکی شبکه از چهار پیزومتر (دو پیزومتر نصب شده در ورودی و خروجی مدل و همچنین در دو نقطه درون شبکه) استفاده شده است. برای اندازه‌گیری کیفی در شبکه نیز از دو حسگر TDS استفاده شده است. موقعیت نصب حسگرهای هیدرولیکی (پیزومتر) و کیفی (TDS) در شکل ۱ مشخص شده است.

شکل ۳ نمونه پیزومتر نصب شده را درون شبکه نشان می‌دهد که در آن یک لوله شفاف و یک خط‌کش (شکل ۳-ا) برای اندازه‌گیری ارتفاع آب استفاده شده است. شکل ۳-ب چگونگی اتصال پیزومتر به لوله را نشان می‌دهد.

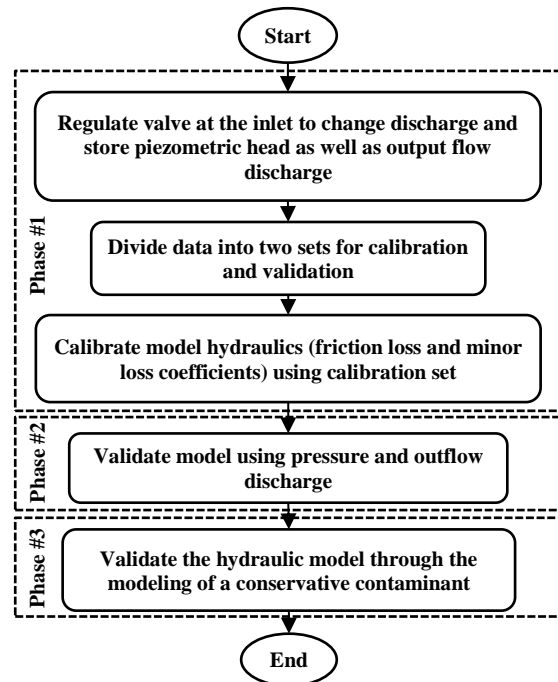
آزمایش کیفی در این پژوهش با استفاده از نمک خوراکی



**Fig. 3** An Example of a Piezometer Installed in the Laboratory Network, a) Piezometer and b) Its Connection to the Network

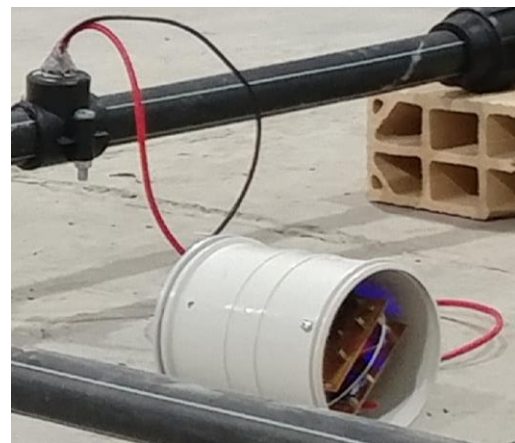
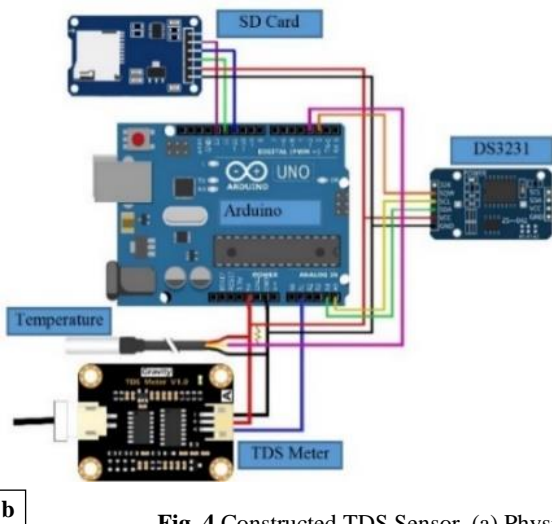
شکل ۳ نمونه پیزومتر نصب شده در شبکه (a) پیزومتر و (b) شیوه اتصال به شبکه

TDS متأثر از دمای آب است؛ حسگر دماسنج برای اصلاح مقدار TDS در نظر گرفته شده است. ضریب اصلاح، برابر با رابطه ارائه شده توسط شرکت سازنده ماژول TDS انجام شده است. نمای کلی و چگونگی اتصال ماژول‌های بیان شده در شکل ۴- b نشان داده شده است. برنامه‌نویسی این حسگر توسط زبان C و درون محیط Arduino IDE انجام پذیرفته است.



**Fig. 2** Flowchart of the Study  
شکل ۲ روندنمای مرحله‌های انجام کار

به یادآوری است که حسگرهای ساخته شده آنالوگ بوده و با اندازه‌گیری میزان ولتاژ، میزان هدایت الکتریکی و در پی آن TDS را برآورد می‌کنند. با توجه به آنکه رابطه ولتاژ و



**Fig. 4** Constructed TDS Sensor, (a) Physical Sample, (b) Schematic and Connections

شکل ۴ حسگر TDS ساخته شده، (a) نمونه ساخته شده، (b) نمای کلی و اتصال‌ها

برای ۱۰ آزمایش مختلف نشان داده شده است. از میان این داده‌ها، ردیف‌های ۲، ۳، ۵، ۶، ۸ و ۹ برای واسنجی و مابقی داده‌ها برای صحت‌سنجی استفاده شد. دبی آزمایش و همچنین مقدار پیزومترها در هر کدام از این حالت‌ها نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل، شیر ورودی شبکه با درصد بازشدگی‌های مختلف تنظیم شد و ارتفاع آب در پیزومترهای مربوطه خوانده شد. شکل ۵ جزئیات مرحله‌های اجرای واسنجی و صحت‌سنجی را در این پژوهش نشان می‌دهد. در شکل ۶ اعداد دبی ثبت شده

از میان داده‌های چهار پیزومتر، داده‌های پیزومتر ۱ و ۴ (ورودی و خروجی مدل) به عنوان ورودی به مدل داده شد و از داده‌های دو پیزومتر دیگر برای محاسبه تابع هدف در مسئله واسنجی خودکار استفاده شد.

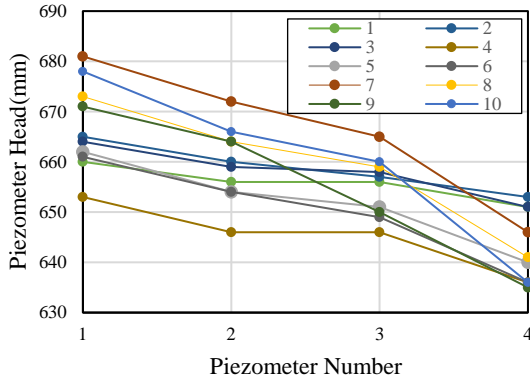


Fig. 6 Water Level Curve in Piezometers  
شکل ۶ منحنی ارتفاع آب در پیزومترها

جدول ۱ میزان دبی و ارتفاع پیزومتری در آزمایش‌های انجام شده

Table 1 Flow Rate and Piezometric Height Values in the Conducted Experiments

Number	Piezometer Head (m)				Discharge (LPM)
	1	2	3	4	
1	0.660	0.656	0.656	0.651	9.16
2	0.665	0.660	0.657	0.653	10.68
3	0.664	0.659	0.658	0.651	12.07
4	0.653	0.646	0.646	0.636	14.98
5	0.662	0.654	0.651	0.640	16.00
6	0.661	0.654	0.649	0.636	16.77
7	0.681	0.672	0.665	0.646	19.75
8	0.673	0.664	0.659	0.641	19.93
9	0.671	0.664	0.650	0.635	20.74
10	0.678	0.666	0.660	0.636	22.77

همان‌طور که در شکل ۶ و جدول ۱ قابل مشاهده است، دامنه‌ی تغییر هد پیزومتری مقادیر کمی را نشان می‌دهد (در حد چند میلی‌متر). باید در نظر داشت که برای بررسی مقدار ضریب زبری نیاز به داشتن شیب خط انرژی بوده که یک پارامتر بدون بعد است، از این‌رو به نظر می‌رسد می‌توان در آزمایشگاه به شیب خط انرژی در طول شبکه دست پیدا کرد. بدیهی است که اگر امکان انجام آزمایش‌ها در یک مدل بسیار بزرگ و با دبی زیاد می‌بود، دقت نتایج بیشتر می‌شد. ضمن آنکه در شبکه‌های واقعی

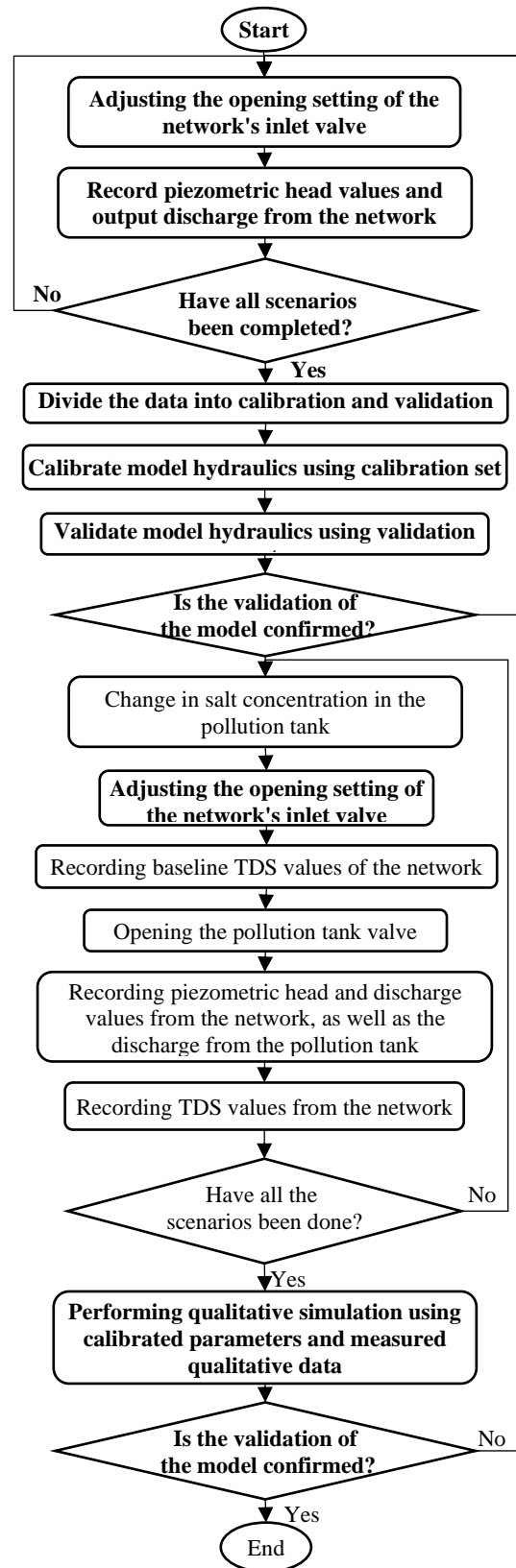


Fig. 5 The Detailed Workflow of the Model Calibration  
شکل ۵ جزئیات مرحله‌های واسنجی مدل

نظر گرفته شد. اما با توجه به آنکه در لوله‌های قرار گرفته در دو محور وسط، شمار اتصال‌های بیشتری وجود دارد، دو متغیر تصمیم برای بیان تمایز افت در دو دسته لوله موجود (۵/۰ و ۱ متر) تعریف شد.

جدول ۲ ضریب‌های هدررفت موضعی برای برخی از اتصال‌ها  
Table 2 Minor Loss Coefficients for Some Fittings

Fitting	Loss Coefficient
Globe valve, fully open	10.0
Angle valve, fully open	5.0
Swing check valve, fully open	2.5
Gate valve, fully open	0.2
Short-radius elbow	0.9
Medium-radius elbow	0.8
Long-radius elbow	0.6
45 degree elbow	0.4
Closed return bend	2.2
Standard tee - flow through run	0.6
Standard tee - flow through branch	1.8
Square entrance	0.5

به این ترتیب رشته متغیر تصمیم در این مسئله شامل یک مقدار برای ضریب زبری و دو مقدار برای ضریب‌های افت لوله‌ها است. الگوریتم جستجوی فراکوشی در این تحقیق، الگوریتم تکامل تفاضلی<sup>۱</sup> (Price et al, 2005) انتخاب شده است.

تابع هدف به صورت مجموع درصد وزنی اختلاف هد پیزومتری در مدل و واقعیت و همچنین اختلاف دبی خروجی در مدل و واقعیت تعریف شد. مقدارهای اختلاف دبی و هد در این رابطه به مقدارهای مانند آن در مدل آزمایشگاهی تقسیم شده تا پیش از محاسبه تابع هدف نرمال شوند. رابطه ۱ تابع هدف مسئله بهینه‌سازی (واسنجی خودکار) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این رابطه دیده می‌شود دو پارامتر ضریب زبری و ضریب افت موضعی لوله‌ها برای انجام فرآیند واسنجی در نظر گرفته شده است.

$$Obj: \min (0.5 \times \sum_{i=1}^{ns} abs(\frac{F_{mi}-F_{li}}{F_{li}})) + (1) \\ 0.5 \times \sum_{i=1}^{ns} abs(\frac{H_{mi1}-H_{li1}}{H_{li1}}) + abs(\frac{H_{mi2}-H_{li2}}{H_{li2}}))$$

در این رابطه،  $F$  معرف دبی،  $H$  معرف هد و  $ns$  معرف تعداد نمونه در فرآیند واسنجی است که برابر با ۶ انتخاب

نیز مقدار افت انرژی در طول شبکه اعداد بزرگی نیست. افت اصطکاکی بیان‌کننده هدررفت انرژی در طول لوله ناشی از اصطکاک جریان با دیواره است و به طول، قطر و ویژگی‌های سیال مربوط می‌شود. برای محاسبه میزان هدررفت اصطکاکی می‌توان از یکی از سه فرمول Hazen-Williams، Darcy-Weisbach و Chezy-Manning استفاده کرد. معادله Hazen-Williams یک فرمول تجربی است که برآوردی از افت هد اصطکاکی ارائه می‌دهد. در استفاده از این رابطه باید دقت داشت که این رابطه برای جریان‌های آشفته ارائه شده است. معادله دارسی-ویسباخ فرمولی کلی‌تر بر مبنای اصول بنیادی مکانیک سیالات است و یک روش دقیق برای محاسبه افت هد ناشی از اصطکاک بوده و برای طیف گسترده‌ای از شرایط جریان قابل کاربرد است (Roberson et al., 1998). فرمول Hazen-Williams بیشتر برای جریان آبراهه باز استفاده می‌شود.

افزون بر افت اصطکاکی در لوله‌ها، در محل اتصال‌ها نیز هد جریان کاهش می‌یابد. در جدول ۲ ضریب‌های افت موضعی برای چند نمونه از اتصال‌ها ارائه شده است.

در این پژوهش از ضریب زبری دارسی-ویسباخ برای واسنجی استفاده شد. این موضوع به این دلیل است که از میان روابط هیزن ویلیامز، دارسی-ویسباخ و شزی-مانینگ، دقیق‌ترین رابطه برای کارهای پژوهشی و آزمایشگاهی، رابطه دارسی ویسباخ است. ضریب زبری در این رابطه بی‌بعد بوده و تابعی از زبری لوله و ویژگی‌های جریان است، حال آنکه در رابطه هیزن ویلیامز ضریب زبری بی‌بعد نبوده و تنها تابع زبری لوله است. ضمن آنکه ضریب زبری هیزن-ویلیامز با استفاده از داده‌های تجربی به‌دست آمده و ممکن است استفاده از آن برای شرایط آزمایشگاهی با محدوده مقدارهای سرعت آن کارایی نداشته باشد.

در پیشینه تحقیق مقدارهایی مانند ۰/۰۰۵ (The Plastics Pipe Institute, 2008) و ۰/۰۰۷ (Padilla et al., 2013) برای ضریب زبری دارسی-ویسباخ لوله‌های نو ارائه شده است. از آنجایی که جنس همه‌ی لوله‌ها یکسان است و عمر یکسانی دارند، عدد ضریب زبری برای آن‌ها ثابت در

1. Differential Evolution Algorithm

است. غلظت نمک ورودی به شبکه و همچنین غلظت TDS پایه ورودی به آن در مدل شبکه اعمال شد و پس از اجرای مدل کیفی، مقادیرهای TDS در دو گره محل حسگرها خوانده شد. در ادامه نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرولیکی ارائه شده است.

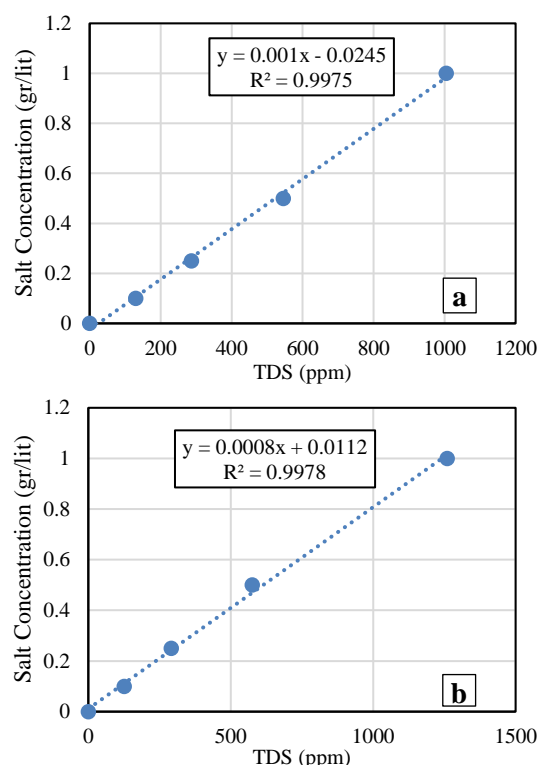


Fig. 7 Fitted Curve Between TDS and Salt Concentration (a) Sensor One, (b) Sensor Two

شکل ۷ منحنی برازش یافته بین TDS و غلظت نمک (a) حسگر یک، (b) حسگر دو

### ۳- نتایج

پس از اجرای مدل بهینه‌سازی و با استفاده از تابع هدف ارائه شده در رابطه ۱، مقادیرهای ۰/۰۰۸ برای ضریب زبری دارسی- ویسباخ (ε) و ضریب‌های افت ۱/۲۰ و ۰/۸۹ برای لوله‌های ۰/۵ و ۱ متری به‌دست آمده است. با توجه به دامنه‌ی تغییر ضریب زبری دارسی- ویسباخ، مقدار محاسبه شده به خوبی معرف نو بودن لوله‌های شبکه است. مقدار به‌دست آمده در این پژوهش نیز همخوانی خوبی با مقادیرهای ارائه شده در پیشینه تحقیق دارد. همچنین مقادیرهای بهینه به‌دست آمده برای افت موضعی، اختلاف افت ایجاد شده به واسطه شمار اتصال‌ها در لوله‌های ۰/۵ و

شده است. نمایه‌های *m* و *l* نیز به ترتیب به مدل رایانه‌ای و مدل آزمایشگاهی اشاره دارند. همچنین نمایه *i* برای بیان شماره آزمایش استفاده شده است. دامنه‌ی تغییرپذیری ضریب زبری دارسی- ویسباخ (ε) برابر با محدوده مقادیرهای ارائه شده در راهنمای نرم‌افزار و برای لوله‌های پلاستیکی بین ۰/۰۰۱ و ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب افت نیز برابر با مقادیرهای ارائه شده در این راهنما بین ۰ تا ۱۱ انتخاب شد.

همان‌طور که پیشتر بیان شد، افزون بر داده‌های پیژومترها، نسبت دبی لوله‌ها نیز صحت‌سنجی شد. این موضوع توسط مدلسازی یک ماده واکنش‌ناپذیر انجام شده است؛ چرا که تغییر غلظت یک ماده‌ی واکنش‌ناپذیر تنها بر اثر اختلاط در گره‌ها و بر مبنای نسبت دبی در لوله‌های متصل به هر گره انجام می‌شود. برای تزریق آلودگی در شبکه از یک مخزن ۵۰۰ لیتری استفاده شد و پس از تهیه محلول آب نمک با یک درصد غلظت مشخص، در یک گره از شبکه و با نرخ مشخص تزریق صورت گرفت. برای اندازه‌گیری غلظت نمک در شبکه از حسگر TDS استفاده شد. به منظور تعیین رابطه‌ی بین مقدار TDS و میزان نمک موجود در آب نیز چند نمونه آزمایشگاهی با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر ساخته شد و عدد TDS نظیر هر کدام از نمونه‌ها توسط هر دو حسگر موجود، اندازه‌گیری شد. شکل ۷ رابطه‌ی بین TDS و غلظت نمک را برای این دو حسگر نشان می‌دهد.

پس از انجام واسنجی هیدرولیکی شبکه و تعیین رابطه‌ها بین مقدار TDS و غلظت محلول آب نمک، تزریق آلودگی در محل گره ورودی به شبکه (شکل ۱) انجام شد.

همان‌طور که در شکل ۵ نیز نشان داده شد، در آغاز شیر متصل به منبع اصلی باز شده تا جریان در شبکه برقرار شود. در این شرایط دبی خروجی اندازه‌گیری و میزان TDS پایه برای آن ثبت شده است. در ادامه شیر متصل به مخزن آب نمک باز شده و تا ثبت داده‌ها توسط حسگرها این روند ادامه یافته است. سپس شیر مخزن اصلی بسته شده و اجازه داده شده تا تنها آب آلوده وارد شبکه شود و مقدار TDS آن توسط حسگرها ثبت شود. این کار برای اندازه‌گیری غلظت نمک مخزن آلودگی صورت گرفته

پیزومترها نشان می‌دهد. بیشینه خطا در این جدول مقدار ۵/۹ درصد را نشان می‌دهد. اندک بودن مقدار خطای محاسبه شده نشان می‌دهد که شبکه واسنجی شده است.

**جدول ۳** نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرولیکی بر مبنای اندازه‌گیری‌های هیدرولیکی

**Table 3** Results of Hydraulic Model Calibration for Hydraulic Measurements

Validation		Calibration		Cost Function
Piezometer Head Error	Outlet Discharge Error	Piezometer Head Error	Outlet Discharge Error	
0.2 %	5.9 %	0.5 %	3%	0.106

پس از انجام واسنجی هیدرولیکی و همچنین انجام صحت‌سنجی به کمک داده‌های فشار و دبی خروجی از شبکه، صحت‌سنجی مدل هیدرولیکی به کمک مدل کیفی شبکه انجام شد. بدین منظور مرحله‌های بیان شده در بخش روش تحقیق انجام شد و مقدارهای غلظت نمک در مدل و واقعیت بررسی و مقایسه شد. جدول ۴ مقدارهای دبی آزمایش را در طی این مرحله‌ها نشان می‌دهد. با توجه به آنکه حسگرهای کیفی مقدارهای TDS را گزارش می‌دهند، مقدارهای غلظت نمک، از روی مقدارهای TDS ثبت شده و رابطه‌های ارائه شده بین TDS و غلظت نمک (شکل ۷)، محاسبه شده است.

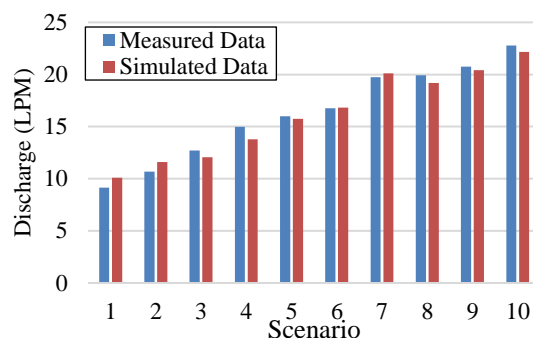
**جدول ۴** دبی خروجی شبکه در شرایط مختلف

**Table 4** Network Output Flow under Various Conditions

State	Discharge (LPM)	
	First test	Second test
Open water tank - Closed pollution tank	21.97	7.50
Open water tank - Open pollution tank	25.55	11.19
Closed water tank - Open pollution tank	4.18	3.58

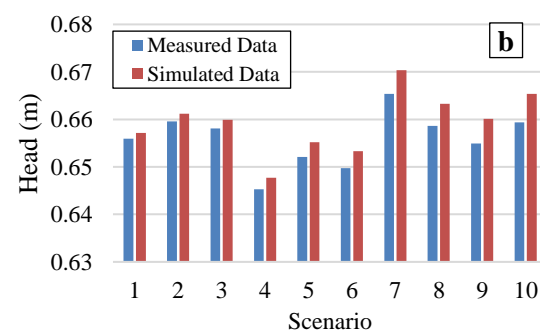
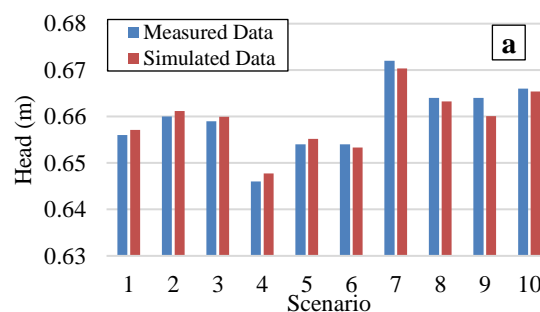
شکل ۱۰ مقدارهای اندازه‌گیری شده را برای دو حسگر و برای آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، غلظت نمک در پایان آزمایش برای آزمایش اول و دوم به ترتیب برابر با ۱/۰۲۴ و ۰/۹۲۰ گرم بر لیتر است که بیانگر غلظت نمک در مخزن آلودگی است؛ چرا که تنها محلول آب نمک وارد شبکه شده و پس

۱ متری را به خوبی نشان می‌دهد. ضمن آنکه برابر با جدول ۲ مقدارهای به‌دست آمده در محدوده مقدارهای پیشنهاد شده در مرجع‌های علمی است. در شکل ۸ و شکل ۹ داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی برای دبی خروجی شبکه و فشار در محل دو پیزومتر برای ۱۰ آزمایش انجام شده، ارائه شده است.



**Fig. 8** Comparison of Measured and Simulated Flow Data in the Output of the Model

شکل ۸ مقایسه‌ی داده‌های دبی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در خروجی مدل



**Fig. 9** Comparison of Measured and Simulated Pressure Data (a) Sensor 2, (b) Sensor 3

شکل ۹ مقایسه‌ی داده‌های فشار اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده؛ (a) حسگر ۲، (b) حسگر ۳

جدول ۳ مقدارهای خطای محاسبه شده برای هر دو دسته داده واسنجی و صحت‌سنجی را به کمک داده‌های

میزان حساسیت دبی لوله‌های شبکه نسبت به تغییرپذیری دو پارامتر واسنجی ضریب زبری و ضریب‌های افت نیز در این پژوهش انجام شده است. برای این منظور مقدارهای ضریب زبری و ضریب‌های افت موضعی لوله‌ها به میزان  $\pm 20\%$  و  $\pm 50\%$  تغییر داده شد و میانگین تغییر دبی در کل لوله‌های شبکه محاسبه شد. جدول ۶ این نتایج را برای شبکه مورد بررسی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود دبی شبکه به ازای تغییر ۲۰ تا ۵۰ درصدی افت موضعی به میزان ۸ تا ۳۲ درصد تغییر می‌کند که نشان دهنده تأثیر زیاد پارامتر افت موضعی در هیدرولیک شبکه است. این در صورتی است که دبی شبکه نسبت به ضریب زبری لوله‌ها تغییرپذیری ناچیزی نشان داده است.

**جدول ۶** نتایج تحلیل حساسیت دبی لوله‌ها نسبت به

تغییرپذیری‌های ضریب زبری و افت موضعی

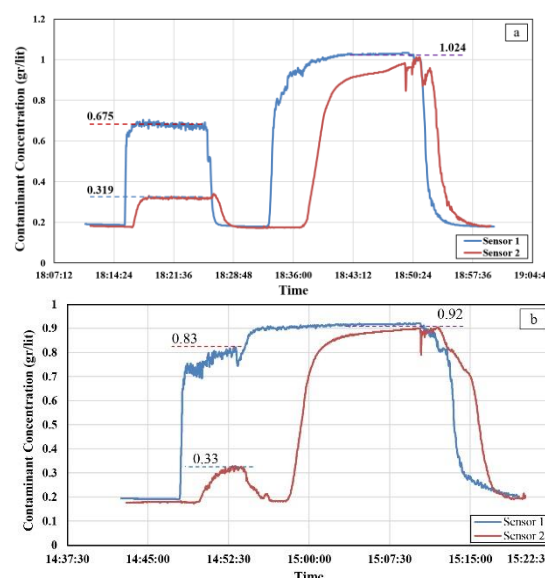
**Table 6** Sensitivity Analysis of Flow at Links Versus Variations in Roughness and Minor Loss Coefficients

Test Number	Percent of Variations	Average Flow Variations (%)	
		F (Darcy-Weisbach)	Loss Coefficient
1	+20%	0.06	8.0
2	-20%	0.06	10.2
3	+50%	0.15	32.5
4	-50%	0.15	17.1

**۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری**

در این پژوهش نتایج واسنجی هیدرولیکی یک شبکه آزمایشگاهی ارائه شده است. شبکه مورد بررسی از جنس پلی‌اتیلن بوده که به صورت حلقوی بسته شده است. تابع هدف مسئله کمینه کردن مجموع درصد وزنی اختلاف هد پیزومتری در مدل و واقعیت و همچنین اختلاف دبی خروجی در مدل و واقعیت تعریف شد. بدین ترتیب از چهار پیزومتر در شبکه برای اندازه‌گیری فشار و از اندازه‌گیری حجمی جریان در خروجی و تقسیم آن بر زمان برای اندازه‌گیری دبی استفاده شد. صحت‌سنجی شبکه در این پژوهش به دو صورت انجام شده است. به این ترتیب که در مرحله اول بخشی از داده‌های پیزومترها که در واسنجی شبکه استفاده نشدند برای صحت‌سنجی شبکه استفاده شد. در مرحله دوم برای صحت‌سنجی دبی در لوله‌های شبکه از مدلسازی کیفی یک ماده

از گذشت زمان، آب ورودی به شبکه به طور کامل از آن خارج شده است. لازم به یادآوری است که ورودی شبکه نیز حاوی مواد جامد محلول است و می‌بایست در مدلسازی در نظر گرفته شود. میزان مواد جامد محلول در آب مخزن اصلی معادل ۰/۱۹ گرم بر لیتر نمک اندازه‌گیری شده است. در ادامه غلظت اولیه و غلظت تزریقی در مدل رایانه‌ای شبکه قرار داده شده و مدل برای آن اجرا شده است. نتایج مدل EPANET در جدول ۵ ارائه شده است. مقایسه نتایج غلظت نمک در محل دو حسگر، بیانگر خطای ۸/۵ درصدی در آزمایش اول و خطای ۲/۵ درصد در آزمایش دوم است. نتایج، نشان‌دهنده آن است که مدل آزمایشگاهی و مدل رایانه‌ای شبکه همخوانی خوبی با یکدیگر دارند.



**Fig. 10** Salt Concentration Curves at the Two Sensor Locations (a) Test Number 1, (b) Test Number 2

شکل ۱۰ منحنی غلظت نمک در محل دو حسگر

(a) آزمایش شماره ۱، (b) آزمایش شماره ۲

**جدول ۵** نتایج غلظت نمک در محل دو حسگر در مدل

آزمایشگاهی و مدل رایانه‌ای

**Table 5** Salt Concentration Results at Two Sensor Locations in the Laboratory Model and Computer Model

Test Number	Sensor #1		E (%)	Sensor #2		E (%)
	SData	MData		SData	MData	
1	0.687	0.675	2.9	0.319	0.270	8.5
2	0.820	0.791	1.2	0.325	0.330	2.5

SData : Simulated Data, MData: Measured Data

### ۵- فهرست نشانه‌ها

<i>SData</i>	داده‌های شبیه‌سازی
<i>MData</i>	داده‌های اندازه‌گیری
<i>ns</i>	شمار نمونه‌ها در فرآیند واسنجی
<i>F</i>	دبی (LPM)
<i>H</i>	هد پیزومتری (m)
<i>m</i>	اندازه‌گیری
<i>S</i>	شبیه‌سازی

### ۶- منبع‌ها

- Dini, M., Abbaspoor, G. & Sagheblian, S.A. (2023). Calibration of water distribution networks by considering the uncertainty of nodal pressure. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 8(3), 13-24. doi: 10.22112/jwwse.2023.350090.1320.
- 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.
- Dini, M. & Tabesh, M., (2017). Water distribution network quality model calibration: a case study-Ahar. *Water Science and Technology: Water Supply*, 17(3), 759-770.
- Kapelan, Z.S., Savic, D.A. & Walters, G.A. (2007). Calibration of water distribution hydraulic models using a Bayesian-type procedure. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 927-936.
- Moasheri, R., Ghazizadeh, M.J. & Tashayoei, M. (2021). Leakage detection in water networks by a calibration method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 80, 101995, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101995>.
- Nasirian, A. & Faghfour Maghrebi, M. (2014). Performance Evaluation of Optimization Models for Calibration and Leakage Detection of Water Distribution Network Using Laboratorial Model. *Journal of Water and Wastewater*, 25(2), 36-47. (In Persian)
- Ostfeld, A., Salomons, E., Ormsbee, L., Uber, J.G., Bros, C. M., Kalungi, P., ... & McKillop, R. (2012). Battle of the water calibration networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 523-532.
- Moghaddam, A., Mokhtari, M., Afsharnia, M. & Minaee, R.P. (2020). Simultaneous hydraulic and quality model calibration of a real-world water

واکنش‌ناپذیر استفاده شد؛ چرا که ماده واکنش‌ناپذیر تنها در اثر اختلاط در گره‌ها رقیق شده و به خوبی تقسیم جریان را در شبکه نشان می‌دهد.

پارامترهای واسنجی مدل هیدرولیکی، ضریب زبری لوله‌ها (که به صورت یکسان برای همه‌ی لوله‌ها در نظر گرفته شده) و ضریب‌های افت موضعی لوله‌ها (برای لوله‌های به طول ۱ و ۰/۵ متر) انتخاب شد. نتایج واسنجی مدل هیدرولیکی اختلاف ۳/۰ و ۵/۹ درصدی را به ترتیب در داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی برای دبی خروجی نشان می‌دهد. همچنین درصد خطای هد پیزومتری در این فرآیند برابر با ۰/۵ و ۰/۲ درصد به ترتیب برای داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی به‌دست آمده است که با توجه به مقدارهای کم آن می‌توان از واسنجی بودن شبکه مطمئن بود. در این مرحله نتایج بهینه‌سازی مقدار ۰/۰۰۸ را برای ضریب زبری دارسی-ویسباخ (ε) و مقدارهای ۱/۲ و ۰/۸۹ را برای ضریب‌های افت لوله‌های به طول ۰/۵ و ۱ متری به‌دست داده است. پس از انجام فرآیند واسنجی هیدرولیکی و همچنین انجام صحت‌سنجی فشار و دبی خروجی، واسنجی شبکه به کمک شبیه‌سازی کیفی یک ماده واکنش‌ناپذیر انجام شد. برای این منظور از نمک خوراکی به عنوان ماده واکنش‌ناپذیر و از حسگر TDS برای اندازه‌گیری غلظت آن استفاده شد. داده‌های کیفیت ثبت شده برای دو آزمایش انجام شده به ترتیب، اختلاف ۸/۵ درصدی و ۲/۵ درصدی را با مدل شبیه‌سازی نشان می‌دهند. با توجه به نتایج ارائه شده در مرحله‌های واسنجی و صحت‌سنجی مدل می‌توان اطمینان حاصل کرد که از لحاظ هیدرولیکی مدل واسنجی شده است و می‌توان از آن برای بررسی بیشتر مسئله‌هایی مانند نشست‌یابی، شناسایی محل آلودگی یا جانمایی حسگر استفاده کرد. در راستای تکمیل کار صورت گرفته پیشنهاد می‌شود امکان واسنجی مدل با استفاده از رابطه Hazen-Williams نیز بررسی شده و نتایج آن با مقدارهای خطای ارائه شده در این پژوهش مقایسه شود. همچنین دقت استفاده از مدل‌سازی کیفی در صحت‌سنجی هیدرولیکی شبکه به کمک حسگرهای اندازه‌گیری جریان یکی از موضوع‌هایی است که می‌تواند مورد توجه بیشتری قرار گیرد.

Hydraulic Models. *Water*, 12(5), 1421, <https://doi.org/10.3390/w12051421>.

distribution network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(6), 06020007, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001209](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001209).

Padilla, E.A., Begovich, O. & Pizano-Moreno, A. (2013). Friction Coefficient in Plastic Pipelines. In: Klapp, J., Medina, A., Cros, A., Vargas, C. (eds) *Fluid Dynamics in Physics, Engineering and Environmental Applications*. Environmental Science and Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg.

Price, K.V., Storn, R.M. & Lampinen, J.A. (2005). The differential evolution algorithm. In: *Differential evolution: A practical approach to global optimization*, 37–134. Berlin, Springer.

Ramos, H.M., Loureiro, D., Lopes, A., Fernandes, C., Covas, D., Reis, L.F. & Cunha, M. C. (2010). Evaluation of chlorine decay in drinking water systems for different flow conditions: from theory to practice. *Water Resources Management*, 24(4), 815-834.

Roberson, J.A., Cassidy, J.J. & Chaudhry, M.H. (1998). *Hydraulic Engineering*. John Wiley & Sons.

Rossman, L.A., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R. & Haxton, T. (2020). *EPANET 2.2 user's manual*, water infrastructure division. Center for Environmental Solutions and Emergency Response.

Shahsavandi, M., Yazdi, J., Jalili Ghazizadeh, M. & Rashidi Mehrabadi, A. (2023). The Use of Graph Theory for Search Space Reduction in Contaminant Source Identification. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 14(2), 04023016, <https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1402>.

Sheefa, D.E. & Barkdoll, B.D., (2023). Spread of salt through municipal water distribution systems. *Environment, Development and Sustainability*, 25(6), 5539-5559.

Tabesh, M., Jamasb, M. & Moeini, R. (2011). Calibration of water distribution hydraulic models: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses. *Urban Water Journal*, 8(2), 93-102.

The Plastics Pipe Institute (2008) *Handbook of Polyethylene Pipe*, ISBN: 9780977613106, 542p.

Zandi, R., Yazdi, J. & Shahsavandi, M. (2021). Leakage Detection in Water Distribution Systems by Considering the Uncertainty of Node Demands Using Harmony Search Algorithm. *MCEJ*, 21(4), 205-217. (In Persian)

Zanfei, A., Menapace, A., Santopietro, S., Righetti M. (2020). Calibration Procedure for Water Distribution Systems: Comparison among