

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

Mohammad Shahsavandi¹, Jafar Yazdi^{2*}, Mohammadreza Jalili-Ghazizadeh³, Abdollah Rashidi Mehrabadi³

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.

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 realworld 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 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 (ε), 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 (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 (Fig.10) revealed an 8.5% error in the first experiment and 2.5% in the second, confirming 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).



واسنجی مدل هیدرولیکی با استفاده از اندازه گیریهای کمی و کیفی شبکه توزیع آب آزمایشگاهی

محمد شاهسوندی ، جعفر یزدی *، محمدرضا جلیلی قاضیزاده"، عبداله رشیدی مهر آبادی "

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

چکیده: واسنجی مدلهای شبکه توزیع آب برای پیش بینی 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 مرحله سوم، صحتسنجی هیدرولیکی شبکه از نظر دبی در لولهها با مدلسازی کیفی یک ماده واکنش ناپذیر (Conservative) صورت گرفته مرحله سوم، صحتسنجی هیدرولیکی شبکه از نظر دبی در لولهها با مدلسازی کیفی یک ماده واکنش ناپذیر (Conservative) صورت گرفته با طول ۵/۰ و ۱ متر نشان میدهد. نتایج واسنجی مدل بیانگر آن است که بیشینه خطای مدل در واسنجی برابر با ۳٪ است. همچنین بیشینه ی خطا در صحتسنجی با استفاده از دادههای فشار برابر با ۲/۰٪ و بر اساس دیم ماده در واسنجی برابر با ۳٪ است. همچنین بیشینهی خطا در صحتسنجی با استفاده از دامه مد. اینگر آن است که بیشینه خطای مدل در واسنجی برابر با ۳٪ است. همچنین اساس مدلسازی کیفی نیز متوسط خطای ۵/۵ ٪ را نشان میدهد. اختلاف کم نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل شبیه سازی نشاندهنده آن است که مدل هیدرولیکی واسنجی شده است.

كليدواژگان: شبكه توزيع آب، مدل آزمايشگاهي، واسنجي هيدروليكي، پيزومتر، كل جامدات محلول (TDS).

۱– مقدمه

در حوزه مدلسازی هیدرولیکی شبکههای توزیع آب، فرآیند واسنجی، یک سنگ بنای حیاتی است. واسنجی، عمل تنظیم دقیق یک مدل برای مطابقت با دادههای مشاهداتی 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 زمانی که دادههای واقعی کمیاب بوده یا در دسترس نیستند. در این شرایط، مدل های آزمایشگاهی به عنوان ابزاری ارزشمند برای بررسی پدیدهها در شرایط نزدیک به واقعیت مورد استفاده قرار می گیرند. استفاده از این مدل ها در کنار مدل های کامپیوتری شبکه توزیع آب میتواند به درک صحیحتر از واقعیت کمک کرده و در صحتسنجی نتایج عددی کمک شایانی کند. مدل های

مقاله پژوهشی

https://doi.org/

در صورت واسنجی بودن میتوانند معرف شرایط واقعی بوده و مورد استفاده قرار گیرند. این در حالی است که وجود عدم قطعیت در پارامترهای مختلف، نظیر 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 تطابق نداشته باشد. عدم وجود تطابق بدین معنا است که در صورت استفاده از مدل رایانهای برای مسائلی نظیر نشتیابی و یا یافتن منبع آلودگی، نتوان به نتایج آن اطمینان کرد. در ادامه برخی از تحقیقاتی که به موضوع واسنجی و استفاده از مدل آزمایشگاهی شبکه توزیع آب پرداختهاند ارائه شده است.

روش جدیدی را برای واسنجی Kapelan et al. (2007) میدرولیکی شبکه توزیع آب ارائه دادند که در آن از تلفیق الگوریتم بهینهسازی SCEM-UA و مدل هیدرولیکی

ی شبکه فرضی و یک شبکه آزمایشگاهی بررسی شده است. ی نتایج تحلیلهای صورت گرفته بر روی هر دو شبکه، ضمن د. تأیید امکان نشتیابی با استفاده از واسنجی فشارهای ه، گرهی، سرعت و همگرایی روش کلونی مورچهها را مورد R تأیید قرار میدهد. R تأیید قرار میدهد. ی با وجود مطالعات گسترده بر روی مدلهای کامپیوتری، لر توسعه مدلهای آزمایشگاهی شبکه توزیع آب و واسنجی ن آنها، عمدتاً به دلیل چالشها و هزینههایی که دارند، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مدلهای آزمایشگاهی چندین

مورد توجه قرار گرفته است. مدلهای آزمایشگاهی چندین مزیت منحصربهفرد برای درک و پرداختن به مسائل 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 ضرایب زبری و افت موضعی در آن تعیین شده است. بررسی ضریب زبری لولههای پلیاتیلن و همچنین ضرایب افت موضعی در این لولهها و پژوهش مورد بحث قرار گرفته 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 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 میدرولیکی 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 متوسط سرعت در این شبکه برابر با ۱۳۶/ و ۲۰/۰ متر بر ثانیه است). مراحل انجام واسنجی و صحتسنجی شبکه در شکل ۲ نشان داده شده است.

صحتسنجی مدل در دو مرحله، هم بر اساس دادههای فشار

EPANET استفاده شده است. (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 اندازه گیری 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) نتايج رقابت ۱۴ تيم شركتكننده از مراکز دانشگاهی، شرکتهای آب و مشاوران خصوصی بر روی واسنجی یک مدل شبکه توزیع آب واقعی را مورد بررسی قرار دادند. مدلهای واسنجی شده هر تیم از نظر میزان تقاضا، فشار، سطح آب مخزن و ضرایب زبری با دادههای واقعی مورد ارزیابی قرار گرفتند. Dini and (2014) Tabesh واسنجى همزمان الكوهاي تقاضا و ضرايب زبری Hazen-Williams را با استفاده از الگوریتمهای بهینهسازی کلونی مورچهها و شبیهسازیهای هیدرولیکی Dini and Tabesh انجام دادند. MATLAB در EPANET (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 مسأله بهینهسازی چندهدفه و با استفاده از نیازهای گرهای و ضرایب زبری انجام دادند. Moghaddam et al, (2020) واسنجی خودکار مدل هیدرولیکی و کیفی یک شبکه واقعی را با استفاده از الگوریتم PSO و با اندازه گیری فشار و کلر باقیمانده انجام دادند. Moasheri et al. (2021) واسنجی همزمان تقاضای گرهی و ضرایب زبری لولهها را توسط الگوریتم رقابتی امپریالیستی در ساعات مختلف روز بررسی کردند. آنها در نهایت از مدل واسنجی شده برای شناسایی زونهای نشت استفاده کردند. Dini et al. (2023) واسنجی خودکار مدل شبکه توزیع آب شهر صوفیان را با درنظر گرفتن عدم قطعیت متغیر فشار در گرهها و با استفاده از الگوریتم بهینهسازی PSO انجام دادند. دقت Nasirian and Faghfour Maghrebi, (2014) نشتیابی مبتنی بر واسنجی به روش کلونی مورچهها را مورد بررسی قرار دادند. این روش برای دو شبکه شامل یک

¹ Imperialist Competitive Algorithm

(پیزومتریک) و دبی خروجی از شبکه (حاصل از تقسیم حجم جریان خروجی از سیستم به مدت زمان تخلیه) و هم بر اساس نسبت دبی موجود در لولهها (با مدلسازی کیفی نمک به عنوان یک ماده واکنشناپذیر^۲) انجام شده است. از آنجایی که اضمحلال یک ماده شیمیایی واکنشناپذیر تنها در اثر اختلاط در گرهها و بر اساس تقسیم دبی جریان انجام میشود، در صورتی که خطای مدل کیفی کم باشد می توان نتیجه گرفت که نسبت دبی در لولهها در مدل و واقعیت با یکدیگر مطابقت 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 اندازه گیری 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.







² Conservative

میدهد که در آن یک لوله شفاف و یک خط کش (شکل ۳a) برای اندازه گیری ارتفاع آب استفاده شده است. شکل ۳b نحوهی اتصال پیزومتر به لوله را نشان میدهد. آزمایش کیفی در این پژوهش با استفاده از نمک طعام انجام شده است؛ چرا که به صورت یک ماده واکنشناپذیر عمل شده است؛ چرا که به صورت یک ماده واکنشناپذیر عمل کرده (Sheefa and Barkdoll, 2023) و آزمایش آن به سادگی امکانپذیر است. برای اندازه گیری غلظت نمک از اندازه گیری شده است. استفاده شد. حسگر TDS مورد اندازه گیری شده است، استفاده شده است.

شکل ۳ نمونه پیزومتر نصب شده را درون شبکه نشان



End Fig. 2 Flowchart of the Study شکل ۲ فلوچارت مراحل انجام کار



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





شکل ۵ جزئیات مراحل واسنجی مدل

مختلف نشان داده شده است. از میان این دادهها، ردیفهای ۲، ۳، ۵، ۶، ۸ و ۹ برای واسنجی و مابقی دادهها برای برای ساخت این حسگر از میکروکنترلر ATmega32 ، ماژول ساعت DS3231 برای ثبت زمان، ماژول کارت حافظه برای ذخیرهسازی اطلاعات، حسگر دماسنج و ماژول اندازه گیری TDS (با دقت ۹۷/۷ ٪) استفاده شده است. مطابق با برنامه نوشته شده، مقدار TDS با فواصل زمانی ۳ ثانیه در داخل کارت حافظه ذخیره میشود. لازم به ذکر است که ولتاژ، میزان هدایت الکتریکی و به تبع آن TDS را برآورد میکنند. با توجه به آنکه رابطه ولتاژ و TDS متأثر از دمای آب است؛ حسگر دماسنج برای اصلاح مقدار SDT در نظر گرفته شده است. ضریب اصلاح، مطابق با رابطه ارائه شده توسط شرکت سازنده ماژول SDS انجام شده است. d نشان داده شده است. برنامهنویسی این حسگر توسط زبان S و درون محیط IDS انجام پذیرفته است.



Fig. 4 Constructed TDS Sensor, a) Physical Sample, b) Schematic and Connections (b، ساخته شده، a) نمونه ساخته شده، b) شکل ۴ حسگر TDS ساخته شده، a) نمونه ساخته شده، b)

برای واسنجی و صحتسنجی مدل، شیر ورودی شبکه با درصد بازشدگیهای مختلف تنظیم شد و ارتفاع آب در پیزومترهای مربوطه قرائت شد. شکل ۵ جزئیات مراحل اجرای واسنجی و صحتسنجی را در این پژوهش نشان میدهد. در شکل ۶ اعداد دبی ثبت شده برای ۱۰ آزمایش

صحتسنجی استفاده شد. دبی آزمایش و همچنین مقادیر پیزومترها در هر کدام از این حالتها نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

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 مساله واسنجی خودکار استفاده شد.



آزمایشهای انجام	بی و ارتفاع پیزومتری در	جدول ۱ مقادیر د
	0: \	

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

	Pi	ezomete	Discharge		
Number	1	2	3	4	(LPM)
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، تغییرات هد پیزومتری مقادیر کمی را نشان می دهد (در حد چند میلیمتر). باید در نظر داشت که برای بررسی تغییرات ضریب زبری نیاز به داشتن شیب خط انرژی بوده که یک پارامتر بدون بعد است، از اینرو به نظر می رسد می توان در آزمایشگاه به شیب خط انرژی در طول شبکه دست پیدا کرد. بدیهی است که اگر امکان انجام آزمایش ها در یک مدل بسیار بزرگ و با دبی زیاد می بود، دقت نتایج بیشتر می شد.

ضمن آنکه در شبکههای واقعی نیز مقدار افت انرژی در طول شبکه اعداد بزرگی نیست.

افت اصطکاکی بیان کننده تلفات انرژی در طول لوله ناشی از اصطکاک جریان با دیواره است و به طول، قطر و خواص سیال مربوط میشود. برای محاسبه میزان تلفات اصطکاکی میتوان از یکی از سه فرمول محاسبه میزان تلفات اصطکاکی Weisbach و Chezy-Manning استفاده کرد. معادله افت هد اصطکاکی ارائه میدهد. در استفاده از این رابطه 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 کلی تر بر اساس شده است. معادله دارسی- ویسباخ فرمولی کلی تر بر اساس محاسبه افت هد ناشی از اصطکاک بوده و برای طیف وسیعی اور شرایط جریان قابل کاربرد است (... Roberson et al., یشتر برای جریان کانال از شرایط جریان قابل کاربرد است (... 1998). فرمول Roming می دهد (2020). اورههای نو نشان می دهد (2020).

(Rossman et al., 2020) جدول ۲ ضریب زبری لولههای نو Table 2 Roughness Coefficients for New Pipe

	(Rossman et	al., 2020)	
Material	Manning's n (unitless)	Darcy- Weisbach ε (millifeet)	Hazen- Williams C (unitless)
Cast Iron	0.012-0.015	0.85	130-140
Concrete	0.012-0.017	1.0-10	120-140
Galvanized Iron	0.015-0.017	0.5	120
Plastic	0.011-0.015	0.005	140-150
Steel	0.015-0.017	0.15	140-150

علاوه بر افت اصطکاکی در لولهها، در محل اتصالات نیز هد جریان کاهش مییابد. در جدول ۳ ضرایب افت موضعی برای چند نمونه از اتصالات 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، دقیق ترین رابطه برای کارهای پژوهشی و آزمایشگاهی، رابطه دارسی ویسباخ است. ضریب زبری در این رابطه بیبعد بوده و تابعی از زبری لوله و مشخصات جریان است، حال آنکه در رابطه هیزن ویلیامز ضریب زبری بی بعد نبوده و تنها تابع زبری لوله است. ضمن آنکه ضریب زبری هیزن- ویلیامز با استفاده از دادههای تجربی بدست

واسنجی مدل هیدرولیکی با استفاده از اندازه گیریهای ...

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

در این رابطه، F معرف دبی، H معرف هد و ns معرف تعداد نمونه در فرایند واسنجی است که برابر با r انتخاب شده است. اندیسهای m و l نیز به ترتیب به مدل رایانهای و مدل آزمایشگاهی اشاره دارند. همچنین اندیس i برای بیان شماره آزمایش استفاده شده است. دامنهی تغییرات ضریب زبری دارسی–ویسباخ ($rac{3}$) مطابق با محدوده مقادیر ارائه شده در راهنمای نرمافزار و برای لولههای پلاستیکی بین ۲۰۰۱ و $rac{1}$ در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب افت نیز مطابق با مقادیر ارائه شده در این راهنما بین $rac{1}$ انتخاب شد.

همانطور که پیشتر بیان شد، علاوه بر دادههای پیزومترها، 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 اساس نسبت دبی در لولههای متصل به هر گره انجام می شود. 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 اندازه گیری 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، ۲۵/۰، ۵/۰ و ۱ گرم بر لیتر ساخته شد و عدد TDS نظیر هر کدام از نمونهها توسط هر دو حسگر موجود، اندازه گیری شد. شکل ۶ رابطهی بین TDS و غلظت نمک را برای این دو حسگر نشان میدهد.

پس از انجام واسنجی هیدرولیکی شبکه و تعیین روابط بین مقدار TDS و غلظت محلول آب نمک (شکل ۷)، تزریق آلودگی در محل گره ورودی به شبکه (شکل ۱) انجام شد. همانطور که در شکل ۵ نیز نشان داده شد، در ابتدا شیر متصل به منبع اصلی باز شده تا جریان در شبکه برقرار شود. آمده و ممکن است استفاده از آن برای شرایط آزمایشگاهی با محدوده مقادیر سرعت آن کارایی نداشته باشد.

جدول ۳ ضرایب تلفات موضعی برای برخی از اتصالات Table 3 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

در سابقه تحقیق مقادیری نظیر ۰/۰۰۵ (Padilla et al., 2013) و Padilla et al., 2013) و Pipe Institute, 2008) برای ضریب زبری دارسی– ویسباخ لولههای نو ارائه شده است. از آنجایی که جنس تمامی لولهها یکسان است و عمر گرفته شد. اما با توجه به آنکه در لولههای قرار گرفته در دو متغیر گرفته شد. اما با توجه به آنکه در لولههای قرار گرفته در دو متغیر تصمیم برای بیان تمایز افت در دو دسته لوله موجود (۵/۰ محور وسط، تعداد اتصالات بیشتری وجود دارد، دو متغیر تصمیم در این مسأله شامل یک مقدار برای ضریب زبری و دو مقدار برای ضریب افت است. این مسأله شامل یک مقدار برای ضریب زبری و دو مقدار برای ضریب زبری و دو مقدار برای ضریب زبری و دو مقدار در این مسأله شامل یک مقدار برای ضریب زبری و دو مقدار در این مطالعه، الگوریتم تکامل تفاضلی^۳ (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. مقادیر اختلاف دبی و هد در این رابطه به مقادیر نظیر آن در مدل آزمایشگاهی تقسیم شده تا پیش از محاسبه تابع هدف نرمال شوند. رابطه ۲ تابع هدف مسأله بهینهسازی (واسنجی خودکار) را نشان میدهد. همانطور که در این رابطه دیده می شود دو پارامتر ضریب زبری و ضریب افت موضعی لوله ابرای انجام فرآیند واسنجی در نظر گرفته شده است.

³ Differential Evolution Algorithm

در این شرایط دبی خروجی اندازه گیری 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 اندازه گیری غلظت نمک مخزن آلودگی صورت گرفته 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، مقادیر TDS در دو گره محل حسگرها قرائت شد. در ادامه نتایج واسنجی و صحتسنجی مدل هیدرولیکی ارائه شده است.



پس از اجرای مدل بهینهسازی و مطابق با تابع هدف ارائه شده در رابطه ۱، مقادیر ۰/۰۰۸ برای ضریب زبری دارسی-ویسباخ (ع) و ضرایب افت ۱/۲۰ و ۰/۸۹ برای لولههای ۰/۵ و ۱ متری بدست آمده است. با توجه به محدوده تغییرات ضریب زبری دارسی-ویسباخ، مقدار محاسبه شده به خوبی معرف نو بودن لولههای شبکه است. مقدار بدست آمده در

این پژوهش نیز همخوانی خوبی با مقادیر ارائه شده در سابقه تحقیق دارد. همچنین مقادیر بهینه بدست آمده برای افت موضعی، اختلاف افت ایجاد شده به واسطه تعداد اتصالات در لولههای ۵/۰ و ۱ متری را به خوبی نشان میدهد. ضمن آنکه مطابق با جدول ۳ مقادیر بدست آمده در محدوده مقادیر پیشنهاد شده در مراجع علمی است. در شکل ۸ و شکل ۹ دادهای اندازه گیری 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 اندازه گیری شده و شبیهسازی

شده در خروجی مدل



جدول ۴ مقادیر خطای محاسبه شده برای هر دو دسته داده واسنجی و صحتسنجی را به کمک دادههای 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 ۴ نتایج واسنجی و صحتسنجی مدل هیدرولیکی بر اساس اندازه گیریهای هیدرولیکی Table 4 Results of Hydraulic Model Calibration for

Hydra	ulic Measu	rements	11 101
V-1: 1-4:		Calibration	

v anua	uion		Cambration	
Piezometer Head Error	Outlet Discharge Error	Piezometer Head Error	Outlet Discharge Error	Cost Function
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 مراحل بیان شده در بخش روش تحقیق انجام شد و مقادیر غلظت نمک در مدل و واقعیت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. جدول ۵ مقادیر دبی آزمایش را در طی این مراحل نشان می دهد. با توجه به آنکه حسگرهای کیفی مقادیر TDS را گزارش می دهند، مقادیر غلظت نمک، از روی مقادیر TDS ثبت شده و روابط ارائه شده بین TDS و غلظت نمک (شکل ۷)، محاسبه شده ارائه شده بین TDS و غلظت نمک (شکل ۷)، محاسبه شده

جدول ۵ دبی خروجی شبکه در شرایط مختلف Table 5 Network Output Flow under Various Conditions

State	Discharge (LPM)		
	First test	Second test	
Open water tank -	21.07	7.50	
Closed pollution tank	21.97		
Open water tank -	25 55	11 10	
Open pollution tank	23.33	11.19	
Closed water tank -	1 19	2.58	
Open pollution tank	4.10	3.38	

شکل ۱۰ مقادیر اندازه گیری شده را برای دو حسگر و برای آزمایشهای انجام شده نشان می دهد. همانطور که در این شکل دیده می شود، غلظت نمک در انتهای 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 بعد از گذشت زمان، آب ورودی به شبکه به طور کامل از آن خارج

شامسوندی و همکاران، ؟؟؟؟ است که مرمدی شبکه نیز جاری

شده است. لازم به ذکر است که ورودی شبکه نیز حاوی جامدات محلول است و میبایست در مدلسازی در نظر گرفته شود. میزان جامدات محلول در آب مخزن اصلی معادل ۲/۱۹ گرم بر لیتر نمک اندازه گیری شده است. در ادامه غلظت اولیه و غلظت تزریقی در مدل رایانه ای شبکه قرار داده شده و مدل برای آن اجرا شده است. نتایج مدل EPANET در جدول ۶ 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، نشان دهنده آن است که مدل آزمایشگاهی و مدل رایانه ای شبکه تطابق 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

Table 6 Salt Concentration Results at Two Sensor Locations in the Laboratory Model and Computer Model Test Sensor #1 Е Sensor #2 Е Number (%) SData (%) SData MData MData 2.9 1 0.687 0.675 0.319 0.270 8.5 0.330 2 0.820 0.791 0.325 1.2 2.5

SData : Simulated Data, MData: Measured Data

میزان حساسیت دبی لولههای شبکه نسبت به تغییرات دو پارامتر واسنجی ضریب زبری و ضرایب افت نیز در این پژوهش انجام شده است. برای این منظور مقادیر ضریب زبری و ضرایب افت موضعی لولهها به میزان ۲۰٪± و ۵۰٪

تغییر داده شد و میانگین تغییرات دبی در کل لولههای شبکه محاسبه شد. جدول ۷ این نتایج را برای شبکه مورد مطالعه نشان می دهد. همانطور که دیده می شود دبی شبکه به ازای تغییر ۲۰ تا ۵۰ درصدی افت موضعی به میزان ۸ تا ۳۲ درصد تغییر می کند که نشان دهنده تأثیر زیاد پارامتر افت موضعی در هیدرولیک شبکه است. این در صورتی است که دبی شبکه نسبت به ضریب زبری لوله تغییرات ناچیزی نشان داده است.

جدول ۷ نتایج تحلیل حساسیت دبی لولهها نسبت به تغییرات

ضریب زبری و افت موضعی

Table 7 Sensitivity Analysis of Flow at Links versus variations in roughness and minor loss coefficients

Test	Percent of	Average Flow	Variations (%)
Number	Variations	F (Darcy-	Loss
		Weisbach)	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

۶- جمعبندی و نتیجه گیری

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 مساله كمينه كردن مجموع درصد وزنى 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 اندازه گیری 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 واکنشناپذیر استفاده شد؛ چرا که ماده واکنش نایذیر 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 تمامی لولهها در نظر گرفته شده) و ضرایب افت موضعی لولهها (برای لولههای به طول ۱ و ۸/۰ متر) انتخاب شد. نتایج واسنجی مدل هیدرولیکی اختلاف ۲/۰ 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 بدست آمده است که با توجه به مقادیر کم آن می توان از واسنجی بودن شبکه مطمئن بود. در این مرحله نتایج بهینهسازی مقدار ۰/۰۰۸ را برای ضریب زبری دارسی- ویسباخ (٤) و مقادیر ۱/۲ و ۰/۸۹ را برای ضرایب افت لولههای به طول ۰/۵ و ۱ متری بدست 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 طعام به عنوان ماده واکنشنایذیر و از حسگر TDS برای اندازه گیری 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 مراحل واسنجى و صحتسنجى مدل مىتوان اطمينان حاصل نمود که از لحاظ هیدرولیکی مدل واسنجی شده است و میتوان از آن برای بررسی بیشتر مسائلی نظیر نشتیابی، شناسایی محل آلودگی و یا جانمایی حسگر استفاده کرد. در راستای تکمیل کار صورت گرفته پیشنهاد می شود امکان واسنجی مدل با استفاده از رابطه -Hazen Williams نیز بررسی شده و نتایج آن با مقادیر 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 موضوعاتی است که میتواند مورد توجه قرار گیرد.

۷- فهرست نشانهها

SData	دادەھاى شبيەسازى
MData	دادههای اندازه گیری
ns	تعداد نمونهها در فرآيند واسنجي
F	دبی (LPM)
Н	هد پیزومتری (m)
т	اندازهگیری
S	شبيەسازى

۷– منابع

Dini, M., Abbaspoor, G., & Saghebian, S. A. (2023). Calibration of water distribution networks by Fluid Dynamics in Physics, Engineering and Environmental Applications, 449-454.

Price, K. V., R. M. Storn, and J. A. Lampinen. (2005). The differential evolution algorithm. In Differential evolution: A practical approach to global optimization, 37–134. Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/3

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.

Sheefa, D.E. and Barkdoll, B.D., (2023). Spread of salt through municipal water distribution systems. Environment, Development and Sustainability, 25(6), pp.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 10, 0977613100, ISBN 13: 9780977613106

Zanfei A, Menapace A, Santopietro S, Righetti M. Calibration Procedure for Water Distribution Systems: Comparison among Hydraulic Models. Water. (2020); 12(5):1421. https://doi.org/10.3390/w12051421. 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. and Tabesh, M., (2017). Water distribution network quality model calibration: a case study– Ahar. Water Science and Technology: Water Supply, 17(3), pp.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.

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; Ab va Fazilab (in persian), 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 distribution network. Journal of Water Resources Planning and Management, 146(6), 06020007.

Padilla, E. A., Begovich, O., & Pizano-Moreno, A. (2013). Friction Coefficient in plastic pipelines.